

На правах рукописи



Цыганков Никита Сергеевич

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СОЗДАНИЯ АДДИТИВНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЭКСТРУЗИОННЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация
производства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск

2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

Научный руководитель:	Москалев Александр Константинович кандидат физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», кафедра Экспериментальной физики и инновационных технологий, профессор.
Официальные оппоненты:	Антипов Дмитрий Вячеславович доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, заведующий кафедрой. Кольчурина Ирина Юрьевна кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» кафедра менеджмента качества и инноваций, заведующая кафедрой.
Ведущая организация:	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени Первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «19» ноября 2022 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета У.2.5.22.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 4 аудитория 311).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (<https://library.spbstu.ru/ru/>)

Автореферат разослан «___» октября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.5.22.01,
кандидат технических наук



Газизулина А.Ю.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Аддитивная отрасль – одна из новых и быстро развивающихся отраслей экономики Российской Федерации. Отрасль не только содействует переходу к цифровой экономике и Индустрии 4.0, но и, создавая возможность организации гибкого производства и прототипирования, является одним из основных драйверов промышленного развития. Особенно это важно для дальнейшей успешной реализации концепции импортозамещения в рамках государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» и переходе обрабатывающих отраслей экономики на современное высокотехнологичное оборудование.

Широкое распространение 3D-принтеров при существенном отставании научно-теоретического осмысления процессов, происходящих в аддитивных технологиях, обуславливает актуальность данного исследования. Важнейшим направлением развития аддитивной отрасли является обеспечение удовлетворенности потребителей качеством оборудования. Действующие стандарты зафиксировали терминологию, используемую в процессах, и определили параметры качества производимой с помощью аддитивных технологий продукции. Однако практически отсутствуют критерии качества экструзионного оборудования, что вызывает проблемы в процессе производства.

Современный потребитель высокотехнологического оборудования стал активно формировать требования к параметрам качества, он является одним из участников создания продукции уже на стадии её проектирования. Отсюда актуальность в формировании гибкой модели, позволяющей эффективно организовать процесс создания нового аддитивного оборудования, все более нарастает. Для этого необходимо обеспечить решение задачи планирования и оперативного управления качеством экструзионных 3D-принтеров на этапе разработки устройств при участии потребителя продукции.

Степень изученности и разработанности проблемы

Теория, методы и инструменты в области организации и управления производством, разработанные такими учеными, как И. Адизес, Р. Каплан, Д. Нортон, С. Уйлрайт, и создаваемые на этой теоретической основе программные средства, показывают эволюцию подходов к процессу производства, охватывая не только процесс изготовления, но и разработку с последующей утилизацией изделий.

В отечественной науке развитием теорий организации, управления производством и разработкой в различных аспектах занимались и занимаются такие ученые, как А. Н. Галкина, А. В. Трачук, И. В. Логунова, В. Н. Родионова, Ю. В. Козырь, Ю. С. Клочков, И.Л. Туккель, Д.В. Антипов, М.А. Полякова и другие.

На предприятиях, связанных с производством новой продукции, является важным учет инновационных процессов, что рассматривалось и изучается такими учеными, как К. Фриман, Б. Лундвалл, Л. Лейдесдофф, О. А. Адрюшкевич, А. А. Гретченко и другими.

Цель диссертационной работы – разработка научно-методического обеспечения, которое включает технические решения, методы и модели организации процесса разработки экструзионных 3D-принтеров заданного качества.

Объектом исследования являются процессы создания 3D-принтеров.

Предмет исследования – методы и модели планирования и управления разработкой 3D-принтеров.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи**:

1. Создать модель планирования процесса разработки экструзионных 3D-принтеров, учитывающую на этапах жизненного цикла взаимное влияние параметров изделия.

2. Создать метод оценки эффективности функционирования организационных структур разработки экструзионных 3D-принтеров, обеспечивающий возможность их оперативного управления.

3. Создать метод определения требований к разрабатываемым экструзионным 3D-принтерам.

4. Построить процессную модель функционирования организационных структур, разрабатывающих экструзионные 3D-принтеры.

5. Сформулировать правила построения имитационной модели оперативного управления процессом разработки экструзионных 3D-принтеров.

6. Провести апробацию имитационной модели функционирования организационных структур, разрабатывающих экструзионные 3D-принтеры на конкретном предприятии.

Соответствие исследования паспорту специальностей ВАК. Работа выполнена в соответствии с паспортом специальности ВАК 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства. В области исследования: «19. Разработка и реализация принципов производственного менеджмента, включая подготовку и совершенствование форм управления и организации производства»; «23. Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами»; «25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике».

Теоретическую основу исследования составили классические и современные теоретические разработки отечественных и зарубежных ученых, научные публикации и методические материалы научно-практических конференций и семинаров в области организации разработки инновационной продукции, в частности, аддитивного оборудования.

Методологическая основа исследования. Исследование основывается на следующих методах: контент-анализ нормативно-правовых документов, теория управления, имитационное моделирование, логико-структурный подход, процессное моделирование, теория массового обслуживания. Для

моделирования, обработки и анализа полученных данных применялись пакеты программ Microsoft Excel, AnyLogic 8.7.9, ER Studio Business Architect 18.0.

Информационно-эмпирическая база. Исследование базируется на информации, полученной из нормативно-правовых актов, данных государственной службы статистики РФ, научных публикаций российских и иностранных ученых, публикаций в периодической печати, отображающих актуальные тенденции и передовой опыт по исследуемой теме, а также личного опыта деятельности на предприятии, занимающемся разработкой и продажей аддитивного оборудования.

Научная новизна работы состоит в развитии научно-технических положений планирования и оперативного управления процессами разработки экструзионных 3D-принтеров требуемого качества, включающих в себя:

1. Модель планирования процесса разработки новой продукции, учитывающая взаимное влияние параметров качества создаваемой продукции в процессе проектирования и позволяющая формировать сквозную систему управления разработкой продукта на предприятии. В модели присутствуют обратные связи между этапами разработки новой продукции, что позволяет осуществлять качественное оперативное управление.

2. Метод оценки состояния организационных структур, проектирующих новую продукцию – экструзионные 3D-принтеры. Разработанный метод обеспечивает оценку и оперативное управление деятельностью организационных структур разработки новой продукции и учитывает влияние трех векторов показателей эффективности их работы: общие параметры функционирования организационной структуры; показатели работы с проектами по разработке 3D-принтеров; значения выполнения плановых заданий на уровне организационной структуры.

3. Метод определения требований к новой продукции, учитывающий влияние технических, временных значений выпуска и экономических параметров модифицируемой модели 3D-принтера. Разработанный метод позволяет определить характеристики создаваемой продукции и оптимальное время вывода на рынок очередной модификации продукта, а также объем продаж.

4. Процессную модель и правила формирования имитационного представления о разработке экструзионных 3D-принтеров, позволяющие производить сценарный анализ и оптимизацию функционирования организационных структур разработки, включая такие параметры, как максимальная нагрузка организационных структур, время обслуживания разработки, требования к параметрам качества создаваемой продукции.

Теоретическая ценность работы заключается в том, что выводы, полученные в результате исследования, были использованы для улучшения теории управления качеством в части планирования и оперативного управления процессами разработки новой продукции. **Практическая ценность работы** заключается в том, что определены условия реализации методов и моделей

планирования и оперативного управления процессами разработки экструзионных 3D-принтеров.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Модель организации разработки экструзионных 3D-принтеров на предприятии ООО «Компания ИМПРИНТА» с пятью этапами жизненного цикла продукции и необходимым временным ограничением для каждого этапа, которая позволила увеличить количество успешных проектов на 21% и уменьшить количество исключенных разработок на 30%.

2. Метод, позволяющий производить оценку состояния трех организационных структур разработки экструзионных 3D-принтеров предприятия. Анализ мероприятий по улучшению их работы позволил сформировать четыре действия для целей дальнейшего эффективного развития данных структур.

3. Метод определения требований к качеству экструзионных 3D-принтеров модельного ряда Hercules ООО «Компания ИМПРИНТА», гарантирующий нахождение оптимальных технических параметров и времени выпуска модификации экструзионного 3D-принтера. Метод позволил сформировать условие оценки эффективности изменений в продукте и определить возможное увеличение выручки эквивалентное 97 единиц оборудования при значительном улучшении продукта.

4. Параметры качества экструзионных 3D-принтеров, позволяющие повысить эффективность планирования их изменения в процессе разработки.

5. Имитационная модель создания 3D-принтеров в ООО «Компания ИМПРИНТА», учитывающая особенности процесса разработки и позволяющая производить оперативный анализ требуемых изменений в организационных структурах предприятия. Модель позволила оптимизировать стратегию компании на 2022–2024 годы и увеличить целевую выручку на 167%.

Полученные результаты использованы в учебных материалах дисциплин «Теоретическая инноватика», «Управления инновационными проектами», «Моделирование инновационных объектов и процессов», «Технологии нововведений» и «Типовые задачи прикладной инноватики» в Сибирском федеральном университете.

Апробация и внедрение результатов работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры Экспериментальной физики и инновационных технологий ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Основные положения и результаты исследования докладывались и получили положительные отклики на **следующих научно-практических конференциях**: XII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и наука: Проспект Свободный-2016» (Красноярск, 15-25 апреля 2016 г. СФУ); XV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и наука: Проспект Свободный-2019» (Красноярск, 22-26 апреля 2019 г. СФУ); Национальная научно-практическая конференция «Комплексное развитие

территориальных систем и повышение эффективности регионального управления в условиях цифровизации экономики» (Орёл, 01 ноября 2019 г., ОГУ им. И.С. Тургенева); «Quality Management and Reliability of Technical Systems» (Санкт-Петербург, 20-21 июня 2019 г., СПбПУ); «III Quality Management and Reliability of Technical Systems» (Санкт-Петербург, 27-29 августа 2020 г., СПбПУ); XVI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и наука: Проспект Свободный-2020» (Красноярск, 06 апреля-16 мая 2020 г. СФУ); Конференция с международным участием «Байкальская наука: идеи, инновации, инвестиции» (Иркутск, 26 марта 2021 г., ИРНТУ); XVII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и наука: Проспект Свободный-2021» (Красноярск, 19-24 апреля 2021 г. СФУ); «Energy Systems Environmental Impacts» (Санкт-Петербург, 24-26 сентября 2021 г., СПбПУ); XVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодежь и наука: Проспект Свободный-2022» (Красноярск, 19-24 апреля 2022 г. СФУ).

Научные результаты использованы в процессе выполнения работы по гранту Российского фонда фундаментальных исследований по теме «Разработка модели автономной инновационной инфраструктуры Красноярского края с высокой эффективностью коммерциализации» (№19-37-90023), а также внедрены в практическую деятельность ООО «Компания ИМПРИНТА» и наноцентра ООО «СИГМА.Новосибирск» в части разработки планов и стратегий развития компаний в отрасли аддитивных технологий.

Публикации

По теме диссертации автором было опубликовано 15 научных работ общим объемом 42,02 п.ч. (участие соискателя 22,39 п.ч.), в т. ч.: 3 учебных пособия; 4 статьи в научных изданиях, индексируемых международной базой Scopus; 6 статей в журналах, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал изложен на 125 страницах, содержит 15 таблиц, 23 рисунка, 120 литературных источника, 4 приложения. Общий объем диссертации, включая приложения, составляет 149 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и значимость диссертационной работы, определены предмет и объект исследования, обозначены цель и задачи проводимого исследования, показана его научная и практическая значимость, изложены основные полученные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе «ХАРАКТЕРИСТИКА И ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ 3D-ПРИНТЕРОВ» охарактеризован объект исследования – экструзионные 3D-принтеры и процесс их разработки, осуществлен анализ действующих стандартов, регламентирующих качество аддитивного оборудования, определены основные требования к этапам жизненного цикла

разработки экструзионных 3D-принтеров. Выполнен анализ отечественной и зарубежной научной литературы в предметной области исследования и показаны основные научные направления. На базе полученных результатов осуществлена постановка научной задачи и сформированы направления ее решения.

Анализ тенденций и проблем в области управления аддитивного оборудования позволил выявить потребность в развитии теории планирования разработки новой продукции путем создания модели планирования процесса разработки экструзионных 3D-принтеров, учитывающую на этапах жизненного цикла взаимное влияние параметров изделия.

С учетом изучения и рассмотрения наиболее распространенных экструзионных 3D-принтеров были определены основные технические параметры, которые можно использовать для определения параметров качества экструзионных 3D-принтеров, представленные таблице 1.

Таблица 1 – Параметры качества экструзионных 3D-принтеров

Параметр	Единицы измерения
Количество экструдеров	Штук
Диапазон разрешений печати (размера слоя)	Микроны или миллиметры
Максимальная скорость перемещения печатной головки в процессе печати (без учета холостого хода)	мм/с
Максимальная производительность экструдера в разных режимах печати (различными материалами)	см ³ /ч
Максимальная линейная скорость холостого хода	мм/с
Ускорение печатной головки	мм/с ²
Точность позиционирования по осям XY и Z	Микроны или миллиметры
Повторяемость изготовления изделия в части геометрических форм и размеров	Доля идентичных изделий из выборки в 100 единиц с учетом допустимого отклонения
Количество часов до отказа отдельных модулей или замены расходных материалов (тефлоновая трубка, поверхность для печати и прочее).	час

Анализ существующих подходов к планированию и оценке эффективности организации разработки инновационной продукции на предприятии позволяет сделать выводы:

– для планирования качества разработки новой продукции на различных этапах жизненного цикла возможно использование процессного подхода. Требуется построить процессную модель функционирования организационных структур, разрабатывающих экструзионные 3D-принтеры.

– наблюдается необходимость создать метод оценки эффективности функционирования организационных структур разработки экструзионных 3D-принтеров, обеспечивающий возможность оперативного управления. В методе должно учитываться разделение концепции управления традиционными бизнес-процессами компании и процессами, связанными с исследованиями, разработками и производством новой продукции.

Во второй главе «ОРГАНИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ 3D-ПРИНТЕРОВ НА ПРЕДПРИЯТИИ» для выстраивания эффективной системы планирования и оперативного управления структурами организации, отвечающими за разработку новой продукции, сформирована **Система сбалансированных показателей организационных структур разработки аддитивного оборудования**, состоящая из пяти перспектив стратегической карты функционирования организационной структуры разработки новой продукции с учетом ключевой стратегии – поиск, отбор, разработка и коммерциализация результатов интеллектуальной деятельности в области аддитивных технологий. Для каждой проекции определены конкретные цели: одна для проекции «Финансы», шесть для проекции «Рынок», четыре для проекции «Процессы», три для проекции «Потенциал», шесть для проекции «Удовлетворенность заказчика». Для данных целей определено 40 индикаторов отслеживания их выполнения.

В целях повышения эффективности организации разработки 3D-принтеров требуемого качества разработана **Модель планирования процесса разработки экструзионных 3D-принтеров**, обеспечивающая формирование такой структуры разработки, которая позволяет осуществлять выпуск новой продукции заданного качества.

Процесс разработки 3D-принтера был представлен в виде последовательных этапов (Рисунок 1). На вход поступает множество S_1 разработок, каждая из которых обладает параметрами качества, характеризующимися множеством X . При поступлении и последующему прохождению по этапам осуществляется проверка соответствия барьеру, представляющему собой совокупность требований качества Y . Множество разработок K , параметры качества (X) которых не удовлетворяет требованиям Y , выводится из процесса разработки, а остальная часть поступает на следующий этап. На выходе процесса разработки формируется множество P успешных разработок.

Формализация указанных предложений будет иметь следующий математический вид, учитывая проверку внутренних разработок на этапе n (1):

$$x_i^{s_a} \geq y_i \quad (x_i^{s_a} \in X_{s_a}; y_i \in Y_n; i = 1, 2, \dots, k; a = 1, 2, \dots, p), \quad (1)$$

где $x_i^{s_a}$ – i -й параметр множества X_{s_a} , характеризующего качество разработки s_a , являющейся элементом множества S_n , находящегося на этапе n ;

y_i – i -й параметр, являющийся элементом множества требований Y_n , характеризующего требование к качеству разработки барьера этапа n ;

k – количество параметров, характеризующие качество разработки продукции;

p – количество разрабатываемой продукции на этапе n .

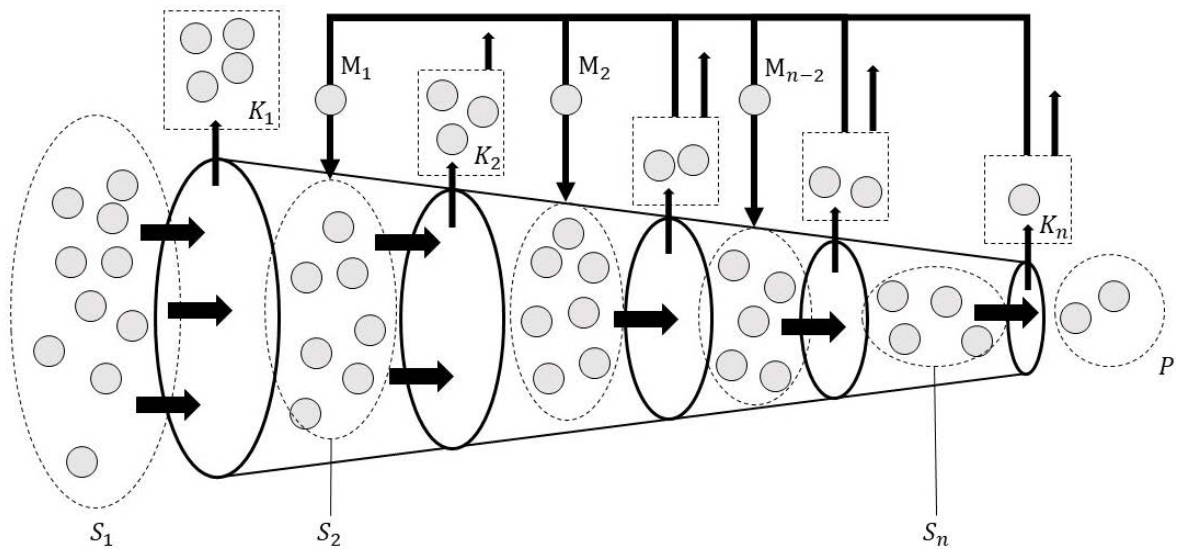


Рисунок 1 – Этапы разработки продукции заданного качества с обратными и внутренними связями

Разработанный алгоритм работы с моделью предполагает выполнение 8 шагов.

Шаг 1. Определить вектор показателей качества разработки продукции.

Шаг 2. Определить возможные диапазоны значений векторов показателей качества разработки продукции, отобранные на шаге 1.

Шаг 3. Определить количество этапов разработки на основе анализа процессов рассматриваемого предприятия.

Шаг 4. Определить взаимное влияние разработок внутри каждого этапа используя логистическую модель (2):

$$p_j = \left[1 + \frac{1-p_j^0}{p_j^0} \exp(-\sum_{k \neq j}^n c_{jk} p_k) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где p_j – вероятность достижения показателем качества j -й разработки требуемого значения с учетом взаимного влияния результатов работы по остальным связанным разработкам; p_j^0 – базовая вероятность достижения показателем качества j -й разработки требуемого значения; c_{jk} – коэффициент взаимовлияния k и j разработки; p_k – базовая вероятность достижения показателем качества k -й разработки требуемого значения; n – количество разрабатываемой продукции.

Также требуется определить на основе статистических данных или экспертным путем вероятности $p(j|p_k=1)$ и $p(j|p_k=0)$ и найти c_{jk} , используя (3):

$$c_{jk} = \ln \frac{p(j|p_k=1)}{1-p(j|p_k=1)} - \ln \frac{p(j|p_k=0)}{1-p(j|p_k=0)} \quad (3)$$

Шаг 5. Выбрать один из двух подход к оценке выполнения критериев для каждого из барьеров на основе действующей на предприятии стратегии

функционирования и разработки: использование интегрального показателя качества или отдельных параметров качества.

Шаг 6. Определить значения критериев барьера.

Шаг 7. Провести оценку полученных результатов. Количество поступивших разработок на первый этап (S_1) к моменту времени t выразим как стационарный поток (4):

$$S_1(t) = \lambda_1 t, \quad (4)$$

где λ_1 – интенсивность поступления разработок в единицу времени.

Вероятность выполнения разработкой ($s_{1,j}$) требований входного барьера Y_1 по каждому показателю найдем, используя нормальное распределение (5):

$$P(x_{i,s_{1,j}} \geq y_{1,i}) = 1 - \left(\Phi\left(\frac{y_{1,i} - M_{1,i}}{\sqrt{M_{1,i}}}\right) - \Phi\left(\frac{0 - M_{1,i}}{\sqrt{M_{1,i}}}\right) \right), \quad (5)$$

где $x_{i,s_{1,j}}$ – значение i -го показателя качества $s_{1,j}$ разработки; $y_{1,i}$ – значение требования к i -му показателю качества на входном барьере Y_1 ; $M_{1,i}$ – среднее значение i -го показателя разработки на этапе S_1 . Определяется на основе статистических наблюдений.

Вероятность изменения показателя качества за единицу времени с учетом экспоненциального распределения и взаимовлияния (2), рассчитывается с помощью (6):

$$P(x_{i,s_{n,j}} \geq y_{n,i}) = \left[1 - \left(e^{-\frac{1}{M_{n,i}} * x_{i,s_{n-1,j}}} - e^{-\frac{1}{M_{n,i}} * y_{n,i}} \right) \right] \times \left[1 + \frac{1 - p_{s_{n,j}}^0}{p_{s_{n,j}}^0} \exp\left(-\sum_{k \neq j}^v c_{s_{n,j},s_{n,k}} p_{s_{n,k}}^0\right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $x_{i,s_{n,j}}$ – значение i -го показателя качества $s_{n,j}$ разработки; $y_{n,i}$ – значение требования к i -му показателю качества барьера Y_n ; $M_{n,i}$ – среднее значение i -го показателя разработки на этапе S_n . Определяется на основе статистических наблюдений; $p_{s_{n,j}}^0$ – базовая вероятность достижения i -м показателем качества $s_{n,j}$ разработки требуемого значения без учета взаимовлияния; v – количество взаимосвязанных разработок; $c_{s_{n,j},s_{n,k}}$ – коэффициент взаимовлияния $s_{n,j}$ и $s_{n,k}$ разработки.

А за время $T_{n,\max}$ (8):

$$P(x_{i,s_{n,j}} \geq y_{n,i}, T_{n,\max}) = P_1 + \sum_{l=1}^{T_{n,\max}-1} \left(\prod_{k=1}^l (1 - P_k) P_{l+1} \right) \quad (8)$$

В рамках диссертации разработан **Метод оценки состояния организационных структур, разрабатывающих экструзионные 3D-принтеры**, состоящий из общей модели оценки состояния, порядка определения составляющих модели оценки и подхода к управлению ресурсами организационной структуры.

Метод основан на оценке трех составляющих деятельности структуры разработки: общие характеристики инновационной активности подразделения, результативность работы с новой продукцией и выполнением целей функционирования компании.

Для получения интегральной оценки состояния подразделения используем (9):

$$F(t) = f_0(t_0) * k_0 + f_1(X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)) * k_1 + f_2(r, a, t) * k_2, \quad (9)$$

где $F(t)$ – интегральный показатель оценки; $f_0(t_0)$ – вектор показателей, характеризующих базовые параметры функционирования подразделения на начало рассматриваемого периода t_0 ; f_1 – вектор показателей, характеризующий эффективность разработки новой продукции X_n , с которыми ведется работа, к моменту времени t ; f_2 – вектор показателей, характеризующих выполнение плановых заданий r с учетом имеющихся ресурсов a в момент времени t ; n – количество разработок, с которыми работает подразделение.

Анализ применяемых на практике показателей, позволил выделить 16 показателей, которые применимы к отдельному подразделению в качестве f_0 .

В качестве показателей f_1 были предложены 6 параметров оценки проекта разработки:

- значение технологического или интегрального уровня готовности технологии;
- количество внесенных изменений в разработку;
- индекс выполнения стоимости относительно работ, планируемых к выполнению подразделением;
- индекс выполнения сроков относительно работ, планируемых к выполнению подразделением;
- изменение бюджета по завершению относительно базового периода;
- коэффициент выполнения показателей качества разработки.

Третий вектор показателей f_2 определяется в соответствии с действующей на конкретном предприятии системы сбалансированных показателей с учетом пятой проекции «Удовлетворенность заказчика».

Разработанный метод оценки позволяет определять необходимое управляющее воздействие по корректировке использования ресурсов подразделениям для достижения поставленных целей в соответствии с f_2 при влиянии внешней среды.

В третьей главе «МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СОЗДАНИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ ТРЕБУЕМОГО КАЧЕСТВА» осуществлен анализ известных методов определения требований к качеству 3D-принтеров, а также представлены разработанные технические решения:

- метод определения требований к технико-экономическим параметрам качества экструзионных 3D-принтеров;
- процессная модель функционирования организационных структур, занимающихся разработкой 3D-принтеров;
- правила построения и работы с имитационной моделью функционирования организационных структур, разрабатывающих 3D-принтеры.

Разработанный Метод определения требований к технико-экономическим параметрам качества экструзионных 3D-принтеров

направлен на расширение возможности инструментов планирования процессов разработки новой продукции.

На основе проведенного анализа существующих подходов к оценке распространения инноваций была разработана модель продаж модификаций продукции с учетом ее технических параметров, которая имеет следующий вид (10):

$$Y_t = V_0 * \left(1 + \frac{e^{(p_0 - r_0 * t)}}{k_0}\right)^{-1} + \sum_{i=1}^n V_i * \left(1 + \frac{e^{(p_i - r_i * t)}}{k_i}\right)^{-1} \times \begin{cases} (1 + h_i), & (p_{i+1} - S > p_i + R \geq t \geq p_i) \\ (1 - h_i), & (p_{i+1} - S \leq t \leq p_{i+1},) \\ 1, & (p_{i+1} - S > t > p_i + R \text{ or } t > p_i) \end{cases}, \quad (10)$$

где $Y(t)$ – накопительный объем продаж (в шт. или млн. рублей) всех модификаций продукта в момент времени t (день, месяц, квартал, год);

V_i – доступная доля с учетом коммерческой модели и конкуренции i -й модели продукта (SOM), млн. рублей или в натуральном выражении;

p_i – временной период начала продаж i -й модели продукта от начала отсчета (день, месяц, квартал, год);

r_i – коэффициент диффузии i -й модели продукта, безразмерная величина;

t – временной период (день, месяц, квартал, год);

k_i – коэффициент (%), характеризующий кривизну скорости распространения i -й модели, измеряется в безразмерных единицах, умноженных на время (день, месяц, квартал, год);

h_i – коэффициент (%), характеризующий плановое отставание текущей модели продукции по сравнению со следующей по техническим параметрам и цене; S – срок уведомления о выходе следующей модели продукта относительно плановой даты выпуска (дней, месяцев, кварталов, лет);

R – срок повышенного спроса на продукцию в соответствии с соотношением цены и качества (дней, месяцев, кварталов, лет).

Общая блок-схема работы с методом представлена на рисунке 2.

Для определения h_i производится оценка соотношения цены и качества модификации продукции относительно предыдущих модификаций с учетом промежутка времени между выходами модификаций по следующей формуле (11):

$$h_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{j,i+1}}{E_{j,i}} - 1 \right) * g_j}{\left(\frac{C_{i+1}}{C_i} - 1 \right)} - 1 \right) * \frac{1}{(p_{i+1} - p_i)} * 100\%, \quad (11)$$

где C_i – рыночная цена i -й модификации продукта, рублей; $E_{j,i}$ – значение j -го параметра i -й модификации продукта; m – количество параметров, характеризующие продукт; g_i – весовой коэффициент для j -го параметра продукта.

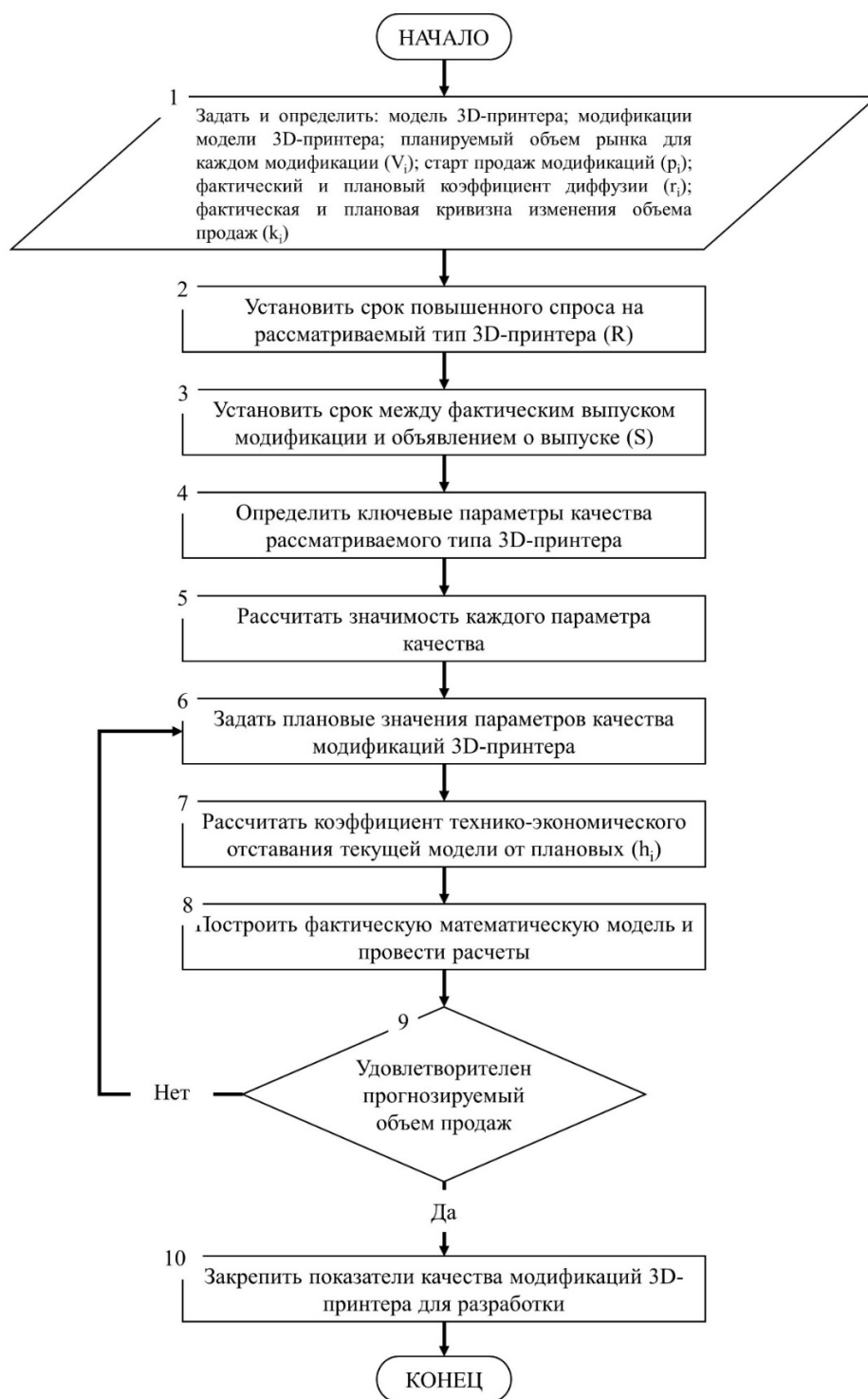


Рисунок 2 – Блок-схема метода определения требований к технико-экономическим параметрам качества 3D-принтеров

Разработанное решение «Процессная модель функционирования организационных структур, разрабатывающих 3D-принтеры» направлено на техническую реализацию модели разработки новой продукции.

Разработка новой продукции представлена в виде 3 ключевых стадий.

Первая стадия «Поиск и анализ» включает в себя 11 подпроцессов, начиная от поступления идей новой продукции до проведения и формирования отчета о поисковых работах или НИР.

Вторая стадия «Разработка» состоит из 12 подпроцессов, включая определение тактико-технических характеристик продукции, завершение ОКР, проведение технической оценки полученных результатов, а также осуществление постоянного мониторинга и контроля выполнения плана разработки. По результату второй стадии принимается решение о возможности последующей коммерциализации или об исключении из предприятия.

Третья стадия состоит из 14 подпроцессов, включая формирование и ведения базы РИД, непосредственно процессы коммерциализации (как продажа РИД, так и организация производства продукции) и осуществление мониторинга и контроля реализации плана коммерциализации. Мониторинг предполагает возможность исключения разработки или ее перевод на предыдущую стадию при значительном отклонении от плана.

По результату третьей стадии формируется итоговый отчет о разработке и коммерциализации и закрепляется периодичность последующей отчетности

Отличительной особенностью разработанной процессной модели является наличие параллельных подпроцессов, характеризующих возможность одновременной работы по нескольким разработкам новой продукции, а также представлением разработки и продажи аддитивной продукции в виде последовательных процессов.

В целях использования полученных результатов исследования для практического применения определены **Правила построения и работы с имитационной моделью функционирования организационных структур, разрабатывающих 3D-принтеры** с учетом разработанной процессной модели.

Разработанный алгоритм построения и работы с имитационной моделью представлен на рисунке 3.

Входными данными модели являются интенсивность входного потока, количество подразделений разработки, количество этапов разработки, показатели общего состояния рассматриваемых подразделений и требования к качеству разрабатываемой продукции и др.

Таким образом, указанная последовательность предоставляет собой поэтапный порядок применения разработанных в диссертации способов, методов и моделей для построения имитационной модели функционирования всех подразделений, разрабатывающих новую продукцию.



Рисунок 3 – Алгоритм построения и работы с имитационной моделью

В четвертой главе «УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ РАЗРАБОТКИ ЭКСТРУЗИОННЫХ 3D-ПРИНТЕРОВ» рассмотрены условия организации экструзионных 3D-принтеров на конкретном предприятии (ООО «Компания ИМПРИНТА») и представлены результаты практического применения полученных результатов в рамках диссертационного исследования. Разработана и апробирована имитационная модель планирования и управления процессами создания экструзионных 3D-принтеров требуемого качества.

В результате апробации метода оценки деятельности структур на примере трех подразделений компании ИМПРИНТА в период с января по апрель 2022 года была выявлено, что эффективность этих структур к концу рассматриваемого периода достигла в среднем 0,73-0,75 в зависимости от отдела. Кроме того, были определены мероприятия для повышения эффективности указанных структур: усиление контроля над работой подрядчиков; стимулирование выработки

предложений по улучшению продукции; формирование базы подрядчиков для работ по НИОКР; расширение компетенции отдела продакт-маркетинга.

Применение метода определения требований технико-экономических параметров качества экструзионных 3D-принтеров на примере модели экструзионного 3D-принтера Hercules G2 позволил рассмотреть влияние изменения технических параметров на эффективность коммерциализации, определить стратегии выпуска новой модификации оборудования и указал на возможность увеличения объема продаж для Hercules G2 на 97 единиц продукции относительно базового значения. Ошибка предложенной математической модели относительно факта составила 8%.

Была построена имитационная модель разработки 3D-принтеров в компании ИМПРИНТА, проведена проверка ее адекватности на основе данных за 93 месяца (результат модели показал, что успешно реализовано 14 разработок, что соответствует факту) и реализован ряд оптимизационных экспериментов:

- оптимизация действующей организационной структуры разработки. Эксперимент позволил снизить количество исключенных разработок на 30%;
- изменение условий работы организационных структур позволило сократить максимальное время разработки новой продукции на 7 месяцев и увеличить количество успешных разработок на 21% за счет пересмотра требований к качеству разработки на ранних этапах;
- оптимизация стратегии на 2022-2024 год позволяет увеличить объем выручки на 167%. В результате предприятию требуется также пересмотреть план производства продукции и, при необходимости, привлечения оборотных средств для организации контрактного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано научно-методическое обеспечение разработки экструзионных 3D-принтеров заданного качества, которое включает в себя:

1. Индикаторы, позволяющие производить оценку выполнения целей системы сбалансированных показателей. Для получения интегрального показателя в зависимости от особенностей стратегии конкретной организационной структуры для каждого индикатора требуется определение их значимости. Разработанная система сбалансированных показателей предложена для процессов разработки 3D-принтеров, но после адаптации может быть применима к другим техническим решениям.

2. Обобщенные модели процесса разработок, отличающиеся наличием обратных связей и степенью взаимодействия с внешней средой. При этом выделены крупные этапы процесса разработки. Проведена формализация моделей в виде математического представления и выделены управляемые параметры. Математическая модель позволяет использовать ее в качестве основы для построения имитационной модели.

3. Модель планирования процесса создания новой продукции, развивающая теорию массового обслуживания. Модель позволяет планировать выполнение всех этапов разработки, осуществлять проектирование с

различными сценариями по количеству идей и загруженности организационных структур разработки. Модель учитывает взаимное влияние параметров качества создаваемой продукции в процессе проектирования и позволяет формировать сквозную систему управления разработкой продукта на предприятии. На основе модели сформирован метод определения требований к качеству 3D-принтеров. Отличием метода является возможность поиска оптимальных технических параметров и сроки выпуска новой модификации продукции.

4. Метод оценки состояния организационных структур, проектирующих новую продукцию. Метод обеспечивает оценку и оперативное управление деятельностью организационных структур разработки новой продукции и учитывает влияние следующих показателей эффективности их работы: общие параметры функционирования организационной структуры; показатели работы с проектами по разработке; значения выполнения плановых заданий на уровне организационной структуры.

5. Процессную модель функционирования организационных структур разработки новой продукции с учетом наличия трех ключевых стадий: «Поиск и анализ», «Разработка» и «Коммерциализация». Модель описывает весь процесс от поступления идеи по созданию аддитивного оборудования до конечного результата. В рамках декомпозиции определены 38 подпроцессов: 12 подпроцессов стадии «Поиск и анализ»; 12 подпроцессов стадии «Разработка» и 14 подпроцессов стадии «Коммерциализация». Модель отличается учетом специфики разработки аддитивного оборудования, возможностью одновременной работы по нескольким проектам создания новой продукции.

6. Имитационную модель процесса разработки экструзионных 3D-принтеров в программном продукте AnyLogic: определены входные параметры, законы распределения случайных величин, взаимосвязи между отдельными блоками модели, а также выходные параметры модели. Модель позволяет производить оптимизацию входных данных с требуемыми ограничениями. Представлен интерфейс имитационной модели, параметры, функции и свойства ее элементов, учитывающие поступление идей, пять этапов разработки и последующую коммерциализацию.

7. Апробацию метода оценки деятельности структур, отвечающих за создание новых экструзионных 3D-принтеров, на примере трех подразделений компании ИМПРИНТА в период с января по апрель 2022 года. Эффективность этих структур к концу рассматриваемого периода достигла в среднем 0,73-0,75 в зависимости от отдела. Установлено, что снижение скорости роста эффективности в марте и апреле связано с увеличением количества нововведений, которые вносились в разрабатываемую компанией продукцию. Определены мероприятия для повышения эффективности указанных структур. Это – усиление контроля над работой подрядчиков; стимулирование выработку предложений по улучшению продукции; формирование базы подрядчиков для работ по НИОКР; расширение компетенции отдела продакт-маркетинга.

8. Апробацию метода определения требований технико-экономических параметров качества экструзионных 3D-принтеров на примере экструзионного

3D-принтера Hercules G2. Ошибка аппроксимации, выявленная предложенной математической моделью, составила 8%, что говорит о ее адекватности и возможности применения для прогнозирования. Рассмотрены различные значения коэффициента отставания предшествующей модификации для сравнения предложений по улучшению Hercules G2 в процессе разработки. Полученные результаты указывают на возможность увеличения объема продаж для Hercules G2 на 97 единиц продукции относительно базового значения.

9. Построение имитационной модели функционирования организационной структуры разработки экструзионных 3D-принтеров Hercules компании ИМПРИНТА, для чего определены входные параметры модели. Оценка адекватности модели на основе данных за весь период деятельности компании (93 месяц) показала, что было получено 14 разработок, что соответствует фактическому результату деятельности компании за рассматриваемый период. С привлечением имитационной модели проведена оптимизационная работа по реализации стратегии разработки новой продукции компании. Полученные результаты потребовали изменения максимальной нагрузки на отделы разработок (увеличение количества сотрудников) и снижение максимального значения влияния разработок для увеличения эффективности отсева неудачных проектов. Установлено, что для реализации данных изменений компании требуется пересмотреть план производства продукции. Оптимизационный эксперимент позволил снизить количество исключенных разработок на 30% и увеличить на 21% количество успешных разработок.

Дальнейшая работа должна решить вопросы развития методов и моделей, представленных в диссертации, на других этапах жизненного цикла продукции.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях, входящих в МБД SCOPUS

1. Kalashnikova O.V., Petrunina A.E., Tsygankov N.S., Moskalev A.K. The level of generalized technology readiness of the Smart House automation systems // IOP conference series: materials science and engineering. 2019. С. 012063. (0,64 п.л., в т.ч. 0,21 авт.).

2. Moskalev A.K., Petrunina A.E. Tsygankov N.S., Neural network modelling for determining the priority areas of regional development // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. С. 012017. (0,58 п.л., в т.ч. 0,39 авт.).

3. Moskalev A.K., Petrunina A.E. Tsygankov N.S., Valkova Y.E., Business incubator assessment model // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. С. 012017. (1,5 п.л., в т.ч. 0,94 авт.).

4. Moskalev A., Tsygankov N. Diffusion Model of Various Modifications of an Innovative Product // В сборнике: E3S Web of Conferences. 2021. С. 03004. (1,62 п.л., в т.ч. 1,08 авт.).

Учебные пособия

5. Цыганков Н.С., Эльберг М.С. Имитационное моделирование: учебное пособие – Красноярск: СФУ, 2017. – 128 с. (16 п.л., в т.ч. 8 авт.).
6. Петрунина А.Э., Цыганков Н.С. Типовые задачи прикладной инноватики: учебно-методическое пособие по практическим и семинарским занятиям – Красноярск: СФУ, 2020. – 61 с. (7,05 п.л., в т.ч. 3,52 авт.).
7. Петрунина А.Э., Цыганков Н.С. Информационные технологии в задачах инноватики: лабораторный практикум: учебно-методическое пособие – Красноярск: СФУ, 2021. – 76 с. (8,78 п.л., в т.ч. 4,4 авт.).

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

8. Цыганков Н.С., Москалев А.К., Касимова А.Э. Драйверы развития национальных инновационных систем // Инновации. 2017. № 11. С. 29-33. (0,58 п.л., в т.ч. 0,39 авт.).
9. Калашникова О.В., Цыганков Н.С. Петрунина А.Э., Москалев А.К. Оценка уровня готовности технологии multifunctional устройств автоматизации помещений // Инновации. 2020. № 5 (259). С. 98-104. (0,81 п.л., в т.ч. 0,27 авт.).
10. Цыганков Н.С., Москалев А.К., Петрунина А.Э. Модель управления воронкой коммерциализации // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2022. № 4. С. 137-144 (0,61 п.л., в т.ч. 0,41 авт.).
11. Цыганков Н.С., Петрунина А.Э. Сбалансированная система показателей эффективности инновационной инфраструктуры // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2022. № 4. С. 145-151 (0,61 п.л., в т.ч. 0,41 авт.).
12. Цыганков Н.С., Петрунина А.Э. Способ оценки состояния подразделений разработки экструзионных 3D-принтеров // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. № 4. С. 75-86 (0,9 п.л., в т.ч. 0,6 авт.).
13. Цыганков Н.С., Москалев А.К. Модель организации разработки экструзионных 3D-принтеров // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. № 4. С. 87-96 (0,9 п.л., в т.ч. 0,6 авт.).

В других научных издания (РИНЦ)

14. Цыганков Н.С. Концептуальные основы формирования региональной инновационной инфраструктуры // Материалы II Национальной (всероссийской) научно-практической конференции. 2019. С. 193-203. (1,04 п.л.).
15. Цыганков Н.С., Калашникова О.В., Касимова А.Э. Применение методик TRL и IRL для оценки готовности системы устройств автоматизированного управления помещениями // Проспект Свободный-2019: материалы науч. конф. Экспериментальная физика и инновационные технологии. 2020. С. 1097-1100. (0,4 п.л., в т.ч. 0,13 авт.).