

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

На правах рукописи



Чабаненко Александр Валерьевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КОРПУСНЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Фролова Елена Александровна

Санкт-Петербург – 2019

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА .....	12
1.1 Анализ развития наукоёмких технологий в радиоэлектронной отрасли на примере аддитивных технологий .....	12
1.2 Базовые конструктивы корпусных элементы РЭА.....	29
1.3 Анализ технологического процесса производства методом послойного наплавления корпусов РЭА.....	39
1.4 Разработка способа производства корпусных элементов РЭА на основе комбинированной аддитивной технологии .....	55
1.5 Разработка и исследование модели состояния и динамики функционирования корпусных элементов РЭА в условиях внешних температурных воздействий .....	67
1.6 Параметрическое моделирование метода послойного наплавления корпусных элементов РЭА.....	71
Результаты и выводы по главе 1.....	84
2. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУР ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА.....	86
2.1 Разработка процедур оценки экологических показателей технологии послойного наплавления .....	86
2.2 Показатели качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям РЭА.....	89
2.3 Разработка формализованной процедуры обеспечения качества сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА.....	93
2.4 Согласование качества корпусных элементов РЭА с требованиями технического задания.....	107
2.5 Методика выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.....	114
2.6 Дополнение номенклатуры показателей качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям .....	117

Результаты и выводы по главе 2.....	129
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО НАЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ НИТИ.....	131
3.1 Структурирование показателей качества корпуса РЭА, влияющих на эксплуатационные свойства.....	131
3.2 Методы управления качеством формования корпусных элементов РЭА.....	137
3.3 Разработка прогнозной модели отказов оборудования в процессе послойного наложения полимерной нити.....	142
3.4 Методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов. ....	147
3.5 Разработка рекомендаций по снижению рисков производства корпусных элементов РЭА.....	156
Результаты и выводы по главе 3.....	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	167
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	170
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	172
Приложение А.....	184
Приложение Б.....	186
Приложение В.....	191
Приложение Г.....	195
Приложение Д.....	196
Приложение Е.....	209
Приложение Ж.....	211
Приложение З.....	212

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Приоритетными направлениями промышленной политики России являются повышение конкурентоспособности производства и эффективное продвижение наукоемкой продукции на внутреннем и внешнем рынках.

В Послании Федеральному собранию 1 марта 2018 года Президент России обозначил особую роль новых технологий в развитии страны, назвав их одним из приоритетов государственной политики России. Также было отмечено значение новых материалов и технологий в радиоэлектронике, к числу которых относятся и аддитивные технологии [77].

Современные тенденции цифрового производства, интернета вещей, направлены на активное формирование отрасли аддитивных технологий, применение данных технологий особенно перспективно видится в сфере производства корпусных элементов радиоэлектронной аппаратуры. Остро ощущается проблема усложнения формы радиоэлектронных устройств и печатных плат, корпуса которых должны учитывать их специфику и эргономику, особенности режимов эксплуатации оборудования.

Отмеченные обстоятельства обуславливают важную роль применения аддитивных технологий в производстве корпусов из композиционных материалов и обеспечения должного уровня качества, удовлетворяющего требованиям к размещённым компонентам радиоэлектронной аппаратуры [46].

Для обеспечения применения аддитивных технологий на отечественных предприятиях Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в рамках ТК 182 «Аддитивные технологии» утвердило первые национальные стандарты, которые позволили сформировать требования для корпусных элементов, выполненных по данной технологии [56,57,58].

Аддитивные технологии позволили сформировать принципиально новое направление в технологии, предназначенное для изготовления опытных,



единичных, эксклюзивных и уникальных образцов изделий за счет послойного наращивания материала методом послойного синтеза с одновременным получением заданной формы и размеров последующего серийноспособного изделия на основе цифрового прототипа.

Применение аддитивных технологий позволяет обеспечить индивидуализацию производства, снижение материалоемких затрат, повышение экономической эффективности и результативности производства корпусных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также повысить качество выпускаемых корпусных элементов.

Однако недостаточная разработанность механизмов и инструментов, направленных на обеспечение качества изделий, выполненных с применением аддитивных технологий, контроля работы аддитивной установки и свойств полимеров, используемых при послойном наплавлении, приводит к низкой результативности процессов печати, увеличению расхода материалов, применяемых в работе установки, торможению внедрения новых, механизмов производства, основанных на использовании цифрового прототипа.

Актуальность этих задач определяется в виду их соответствия перечню критических технологий Российской Федерации: «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения», «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем», «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» Перечень критических технологий РФ, утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

Таким образом, научная задача, направленная на обеспечение качества производства корпусных элементов РЭА с учётом компонентной базы, выполненных по аддитивным технологиям с использованием специфики цифрового производства, несомненно, актуальна.

**Степень разработанности проблемы.** Среди зарубежных ученых исследователей инновационных процессов и аддитивного производства следует отметить Й.А. Шумпетера, А.К. Кляйнкнехта, Чака Халла, Д. Страчана.

В разработку теории, методологии и практики управления качеством технологических процессов, внесли существенный научный вклад А.С. Васильев, Е.Г. Семенова, А.Г. Черненькая, А.Г. Варжапетян, Б.В. Бойцов, Л.В. Азгальдов, Г.И. Коршунов. Необходимо отметить классиков управления качеством Э. Деминг, А.У. Шухарт, К. Ишикава, Д. Джуран и ряда других.

Однако в исследованных трудах в полной мере не нашли отражения проблемы, связанные с применением аддитивных технологий в производстве корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям с учётом требований национальных стандартов и регламентов. Учитывая фактор, что не в полной мере проведены исследования теоретических и практических проблем обеспечения качества процессов аддитивного производства и управления качеством конечного изделия, учитывающие требования международных стандартов серии ИЕС 61189 компонентов РЭА.

Важным является не только соответствие требованиям, которые предъявляют стандарты к продукции, но и уменьшение потерь в аддитивном производстве, связанных с несовершенством технологии и производственной системы в целом.

Дальнейшей проработки требует проблема, связанная с большим числом контролируемых параметров качества корпусных элементов РЭА и корреляцией свойств полимеров, оказывающая влияние на качество конечного изделия.

Значимость проблем в области управления качеством корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям, на текущий момент не в полной мере изученная совокупность поставленных задач, относящаяся к данной научной сфере, определили выбор темы, цели и задач диссертационной работы.

**Цель диссертационного исследования** повышение результативности процесса производства корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям из композиционных материалов.

Для достижения цели исследования в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для подтверждения соответствия качества в условиях внешних и внутренних воздействующих факторов;
2. Разработать параметрическую модель послойного наплавления корпусных элементов, включающую прототипирование проектной компонентной базы РЭА;
3. Обосновать и дополнить номенклатуру показателей качества корпусных элементов РЭА, выполненных методом послойного наплавления, путем разработки стандарта организации на основе анализа и дополнения существующей;
4. Разработать методику выбора полимера для производства по аддитивной технологии из композиционных материалов;
5. Разработать методику обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов.

**Объект исследования** – технологический процесс производства корпусных элементов РЭА.

**Предмет исследования** – методы, критерии, процедуры и модели, обеспечивающие повышение качества производства и эксплуатации корпусов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям.

**Методы исследования.** В ходе исследования использованы методы унификации, агрегатирования, моделирования и статистики.

**Продукция:** корпусные элементы РЭА, выполненные по аддитивным технологиям.

**Область исследования:** соответствует пп. 1, 2, 4, 5, 11 паспорта специальности – 05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для анализа влияния внешних и внутренних

воздействующих факторов в процессе моделирования эксплуатации радиоэлектронного устройства.

2. Параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, включающая прототипированные элементы компонентной базы РЭА для обеспечения качества процесса функционирования аддитивной установки и выбор температурных режимов.

3. Дополненная номенклатура показателей качества корпусных элементов РЭА, регламентированная разработанным стандартом организации, учитывающая современные требования национальных, международных стандартов и требования технических регламентов к полимерам.

4. Методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.

**Научной новизной** обладают следующие результаты исследования:

1. Модель состояния корпусных элементов РЭА, включающая экспериментальные результаты комбинирования свойств различных композиционных материалов в процессах послойного наплавления при производстве корпусов РЭА, направленных на обеспечение сохранности внутренних компонентов.

2. Параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, отличающаяся наличием моделей прототипированных элементов компонентной базы РЭА, учитываемых при структурном проектировании радиоэлектронного устройства.

3. Дополненная номенклатура показателей качества, учитывающая нормированные температурные режимы, технологические допуски, и обновленные требования, содержащиеся в национальных стандартах и технических регламентах;

4. Разработанная методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.

**Практическая значимость** полученных научных результатов состоит в следующем:

1. Результаты использования основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечили сокращение несоответствий на 10-12 % в производстве корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям, снижение материальных, ресурсных и трудовых затрат на 15-20 %, что подтверждено актами внедрения.

2. Обеспечение качества процесса производства корпусных элементов РЭА за счет применения предложенных алгоритмов управления качеством технологических процессов аддитивного производства корпусных элементов РЭА обеспечивающих повышения выхода годных корпусных элементов на 10-12 %.

3. Внедрены статистические методы контроля процесса послойного синтеза корпусных элементов для управления качеством процесса аддитивного производства, обеспечивающие расчет ожидаемого уровня дефектности технологического процесса, что позволило сократить расход полимеров при печати изделия на 20-25 %.

4. Возможность при прототипировании корпусов РЭА использовать композиционные материалы, что позволяет повысить прочностные характеристики филаментов с последующей оценкой имитационной оценкой.

5. Сокращение времени производства сложно-профильных корпусных элементов и компонентной базы РЭА при применении аддитивной технологии на 40-50 %.

**Достоверность результатов** диссертационной работы основана на корректном применении математического аппарата системного анализа, математической статистики и теории вероятности, квалиметрического оценивания

и методов математического моделирования, а также результатами практического внедрения.

**Личный вклад автора** состоит в непосредственной разработке моделей динамики функционирования корпусных элементов РЭА в условиях внешних температурных воздействий, модели отказов оборудования в процессе послойного наложения полимерной нити, модели управления показателями качества корпусных элементов РЭА, метода управления качеством формования корпусных элементов РЭА и научно-технических предложений по его реализации, документированной процедуры, создания базы данных.

#### **Внедрение результатов диссертационного исследования**

Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, использованы в АО «НПП «Радар ммс», ООО «ПАНТЕС групп» для повышения результативности технологических процессов аддитивного производства, обеспечили сокращение времени разработки корпусных элементов РЭА при выполнении требований к надежности и безопасности эксплуатации аддитивной установки, снижение материальных и трудовых затрат, в образовательном процессе ФГАО ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждено актами внедрения.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на различных конференциях, семинарах и круглых столах:

– Форум «Формирование современного информационного общества – проблемы, перспективы, инновационные подходы» 2015 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

– VIII Санкт-Петербургском конгрессе «Профессиональное образование, наука, инновации». В круглом столе №3 «Молодежь в научной, научно-технической и инновационной деятельности, ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)», 2015 год.

– Научно-технической конференции ОАО «НПП «Радар ммс» (Санкт-

Петербург, 2016).

– 67-й, 68-й, 69-й международной студенческой научно-технической конференции ГУАП (Санкт-Петербург, 2014-2017).

– Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» М. 2016, 2017, 2018.

– Всероссийской очно-заочной научно-практической конференции с международным участием «Формирование престижа профессии инженера у современных школьников», Политехнический университет СПб. 2018.

– Конкурс «Инновационная радиоэлектроника» V сезон 2018.

– Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Программа «УМНИК» 2018.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 9 международных и 5 всероссийских научных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 29 работ, из них: 8 – без соавторов, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 4 статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, 5 статей и 10 докладов в других изданиях, одно свидетельство о государственной регистрации.

**Структура диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 111 наименований, восемь приложений. Основной текст диссертации представлен на 168 страницах, включая 68 таблиц и 91 рисунок. Общий объем диссертационной работы с учетом приложений составляет 217 страниц.

# **1. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА**

## **1.1 Анализ развития наукоёмких технологий в радиоэлектронной отрасли на примере аддитивных технологий**

На текущий момент компании и организации радиоэлектронной индустрии сохранили положительные темпы развития изготовления наукоёмкой продукции. По итогам 2018 года количество промышленной продукции, сделанной предприятиями и организациями РЭП, вырос на 25,0 % по сравнению с 2017 годом, размер продукции гражданского назначения увеличился на 5,6 %, что является результатом реализации программы правительства Российской Федерации «Формирование электронной и радиоэлектронной индустрии на 2013–2025 годы».

Инновационная политика Российской Федерации направлена на поддержание и развитие аддитивного производства в рамках Индустрии 4.0, как одного из катализаторов информационного производства, к которому в России стремятся ключевые игроки рынка уже с начала 21 века.

Одним из основных направлений реализации мероприятий программы развития РЭП 2013–2025, является выполнение подпрограмм по развитию электронной компонентной базы. Решение задач, предусмотренных подпрограммами, обеспечит формирование к 2025 г. качественно новой, инновационной структуры радиоэлектронной промышленности, поддерживающей устойчивое развитие радиоэлектронной промышленности Российской Федерации и повышение качества жизни потребителей. В основу реализации подпрограмм госпрограммы заложен проектный подход, ориентированный на разработку и выпуск конечной радиоэлектронной продукции с высокой долей НИОКР.



Российский рынок радиоэлектронной промышленности в 2017 году составил 2,7 млрд долл. США, т. е. около 0,7 % от мирового рынка и вырос на 20,5 % по сравнению с 2016 год. За предыдущие 10 лет российский рынок электронных компонентов вырос в четыре раза, что соответствует ежегодному приросту на 15 %.

Существует проблема отсутствия государственных стандартов, покрывающих весь процесс производства изделий на основе аддитивных технологий. Как известно, в связи с этим Росстандарт создал технический комитет 182 для разработки нормативной документации в области аддитивных технологий, который ведёт разработку стандартов в этой области, первые из которых вступили в силу с 1 декабря 2017 года, но остается огромное количество нерегулируемых стандартами вопросов, что затрудняет для производителей продукции 3D-принтеров обеспечение качества и результативности процесса аддитивного производства.

Регионы Российской Федерации различаются в уровне развития инновационных процессов, составляющие РРИИ представленных на рис. 1.1.

Помимо необходимости пересмотра и создания нормативных документов в сфере цифрового производства, актуальным вопросом является правовая охрана результатов интеллектуальной деятельности (РИД) в данной области. Зачастую правовое обеспечение видов продукции и способов производства с применением аддитивных технологий представляет собой получение государственной регистрации на объекты промышленной собственности. Согласно 4 части Гражданского кодекса РФ, созданные РИД, подлежат правовой охране в качестве изобретений, полезных медалей и промышленных образцов. Материалы, поданные на государственную регистрацию в федеральный орган исполнительной власти по интеллектуальной собственности, публикуются через 18 месяцев в открытых реестрах. В случае, когда патент на полезную модель выдан раньше данного срока, информация об объекте публикуется в бюллетене, а затем материалы заявки доступны до истечения 18 месяцев. Открытые сведения на сайте Федерального института промышленной собственности размещена информация о патентах и

полезна в проведении патентных исследований и во многих случаях полезны для конкурентов, которые, пользуясь реестрами, создают новый объект с дальнейшей его регистрацией. В результате возникает важная проблема, которая заключается в уязвимости заявителя при обнародовании информации, что сказывается на достижении конкурентного преимущества предприятия. В связи с этим целесообразнее не раскрывать сведения и охранять созданные РИД в качестве ноу-хау относительно новых способов и устройств динамично развивающихся направлений цифрового производства. На сегодняшний день Российской Федерации необходима разработка нормативной базы на основе аддитивных технологий и современного подхода руководства предприятий к определению способов правовой охраны РИД посредством тесной кооперации науки, промышленного комплекса и бизнеса, что поспособствует созданию национальной концепции цифрового производства.

Целью государственной программы становления и развития цифровой экономики является создание в РФ благоприятных нормативно-правовых и организационных условий для результативного совершенствования институтов цифровой экономики при непосредственном участии России, национального бизнеса и гражданского общества и обеспечения быстрого роста экономики благодаря качественным изменениям структуры и системы управления экономическими активами, достижения эффекта «российского экономического чуда» в условиях формирования глобальной цифровой экосистемы.

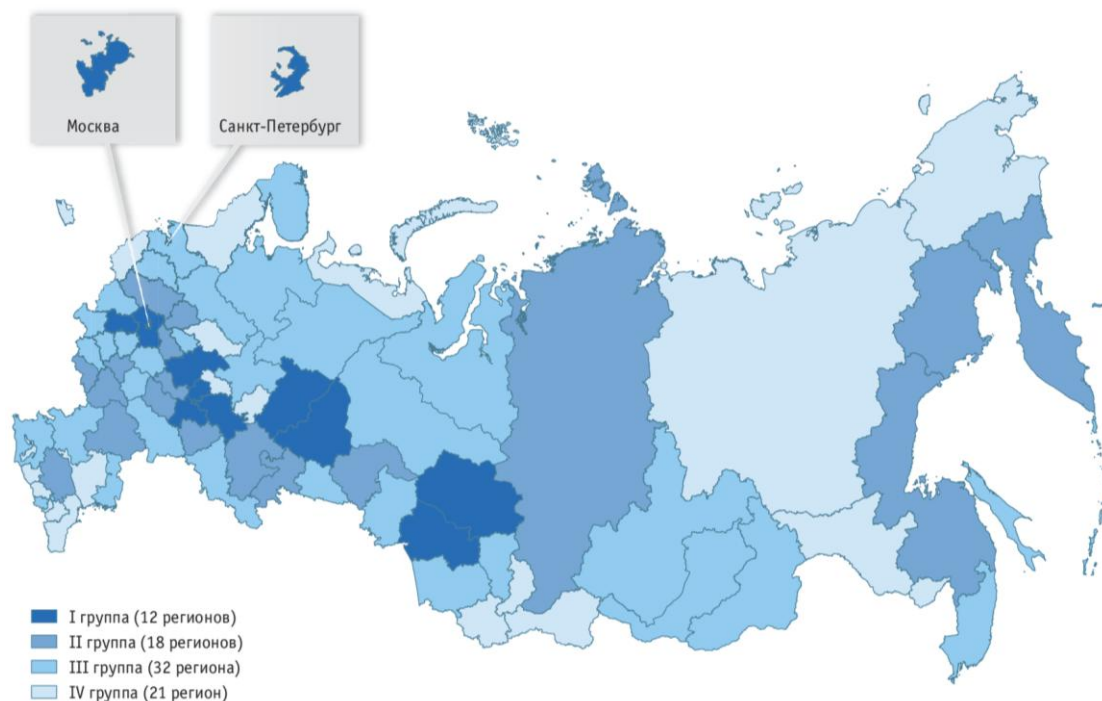


Рисунок 1.1 – Распределение субъектов РФ по значению РРИИ [7]

Принадлежность отраслей к разряду наукоемких, а следовательно, инновационных характеризуется показателем наукоемкости производства, характеризуемого соответствием размера затрат на НИОКР ( $V_{\text{ниокр}}$ ) к объему валовой продукции этой отрасли ( $V_{\text{вп}}$ ):

$$\left( \frac{V_{\text{ниокр}}}{V_{\text{вп}}} \right) \cdot 100\%$$

Принято считать, что наукоемкие отрасли должны демонстрировать показатель в 1,25–1,6 и более раз превышать средний по промышленности. Степень технического прогресса в отрасли характеризует специфику трудовой деятельности, обусловленную производственно-технологическими особенностями производства.

Таблица 1.1 – Классифицирование технологий согласно коэффициенту наукоемкости

Технологии	Коэффициент наукоемкости, %
Высокие технологии	Более 17, %
Средние высокого уровня технологии	4,5-17 %
Средние низкого уровня технологии	2,3-4,5 %
Низкие технологии	0,4-2,4 %

Аддитивные технологии согласно коэффициенту наукоемкости относятся к классу «высоких».

Современные стандарты BS 7000 2013 Системы управления производством устанавливают тесную взаимосвязь производства и НИОКР (научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы). На рис. 1.2 показана роль НИОКР на современном наукоёмком производстве.

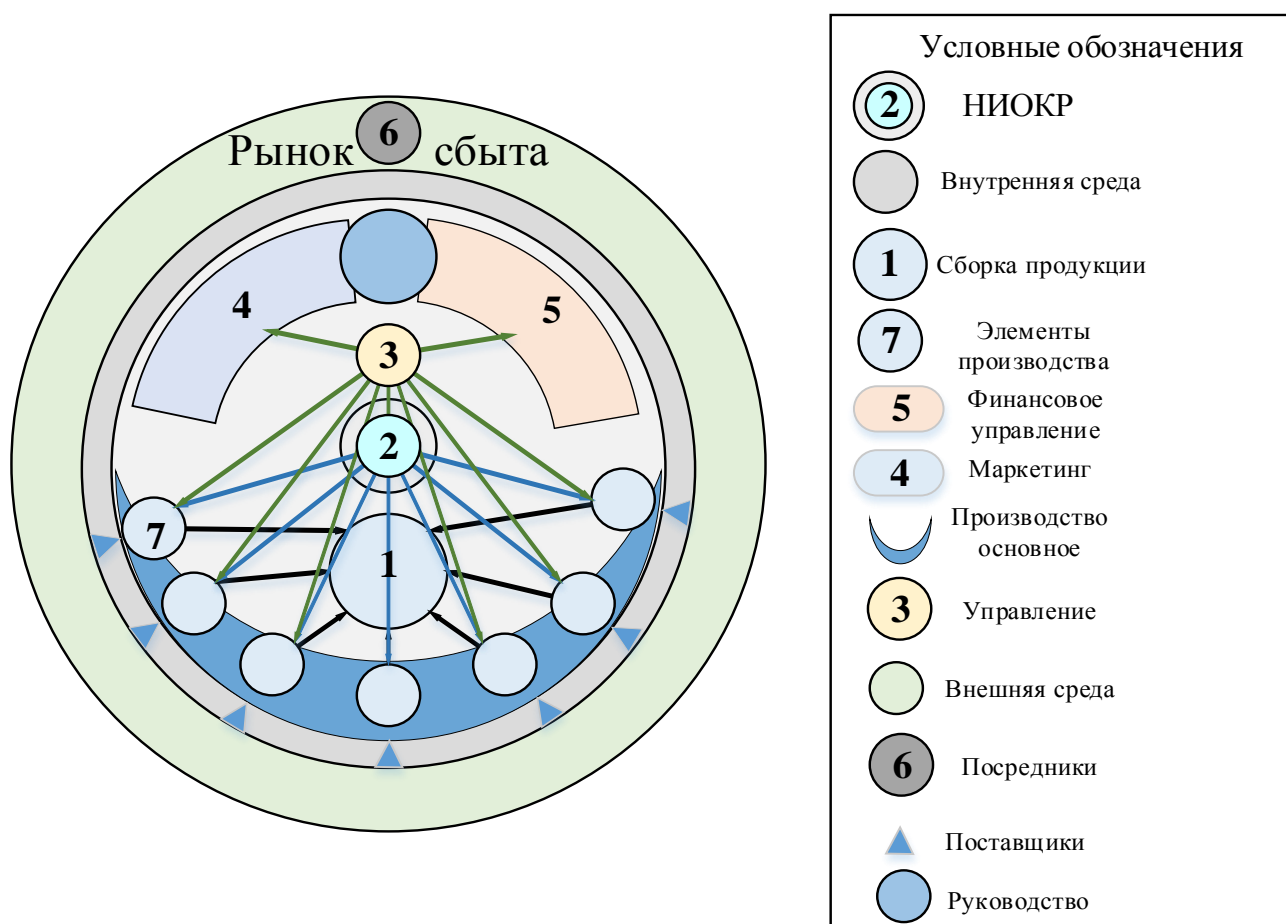


Рисунок 1.2 – Роль НИОКР в работе предприятия в BS 7000 и использовании наукоёмких технологий

На сегодняшний день одна из самых быстро развивающихся технологий с высокой долей НИОКР – это МПН технология послойного наложения расплавленной полимерной нити или аддитивные технологии, применение которых крайне актуально в мелкосерийном производстве корпусов РЭА. Промышленная эксплуатация РЭА происходит при воздействии различных внешних факторов: климатических, биологических, механических [39].

Промышленная эксплуатация РЭА часто происходит при воздействии различных внешних факторов: климатических, биологических, механических. К ним относятся перепады температур, повышенная влажность окружающей среды, морской туман, грибковые и плесневые образования, условия запыленности, вибрация и т. п. Защита изделий от этих воздействий осуществляется с помощью корпусов. Выбор того или иного корпусного элемента определяется условиями эксплуатации аппаратуры, а также конструктивно-технологическими параметрами РЭА.

На текущий момент для широкой номенклатуры корпусов РЭА используется процедура выбора технологий производства, представленная на рис. 1.3.

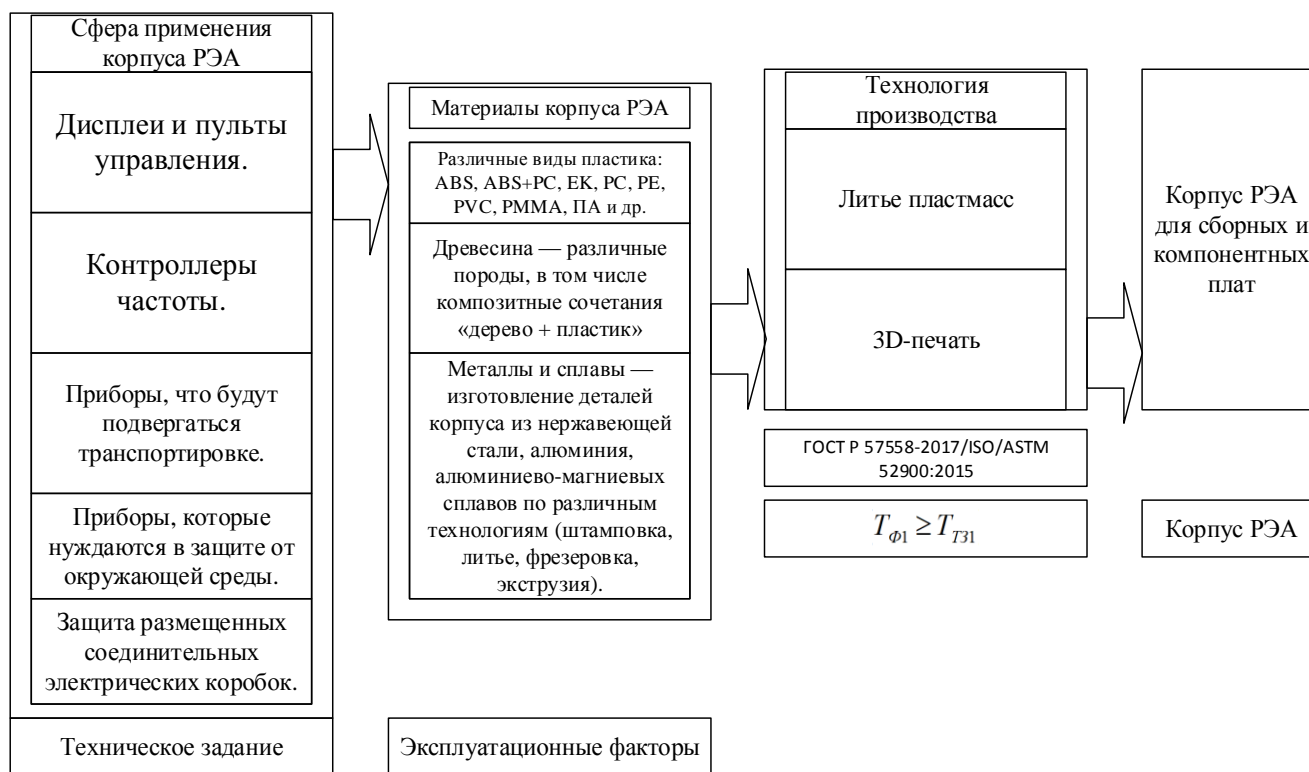


Рисунок 1.3 – Выбор технологии для производства корпусных элементов РЭА

В результате рассмотренных выше требований прослеживается отсутствие конкретных значений и требований к качеству процесса и изделий. Отсюда определение требований является совместной задачей заинтересованных сторон. Согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 9001 необходимо учитывать при определении требований к продукции применимые законодательные и нормативные правовые

требования и возможность выполнения требований организацией, для этого проводится анализ требований, который помогает убедиться в способности организацией выполнять предлагаемые уровни качества.

Чуть проще обстоят дела в других отраслях, но от этого важность проблемы не становится ниже [22].

Росстандарт создал на базе ФГУП «ВИАМ» отдельный технический комитет 182 «Аддитивные технологии», который занимается вопросом разработки и внедрения первоочередных стандартов в этой области. Уже с 1 декабря 2017 года введены первые стандарты:

– ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения» [21];

– ГОСТ Р 57589-2017 «Аддитивные технологические процессы базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования» [22];

– ГОСТ Р 57590-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования» [22];

– ГОСТ Р 57591-2017 «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы - часть 4. Обработка данных» [23];

– ГОСТ Р 57586-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования» [23];

– ГОСТ Р 57587-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний» [25];

– ГОСТ Р 57588-2017 «Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования» [26];

– ГОСТ Р 57556-2017 «Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний» [30];

– ГОСТ Р 57910-2017 «Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции» [31];

– ГОСТ Р 57911-2017 «Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Термины и определения» [32].

В других странах вопросы стандартизации материалов для аддитивных технологий находятся в компетенции National institute of standards and technology (NIST) (США); Международной организации по стандартизации ISO и American society for testing and materials (ASTM) (международный комитет F42 по аддитивным технологиям). В настоящее время разработан только один стандарт ASTM F2792.1549323-1 «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, copyright ASTM International», который дает термины для производственных аддитивных технологий [36].

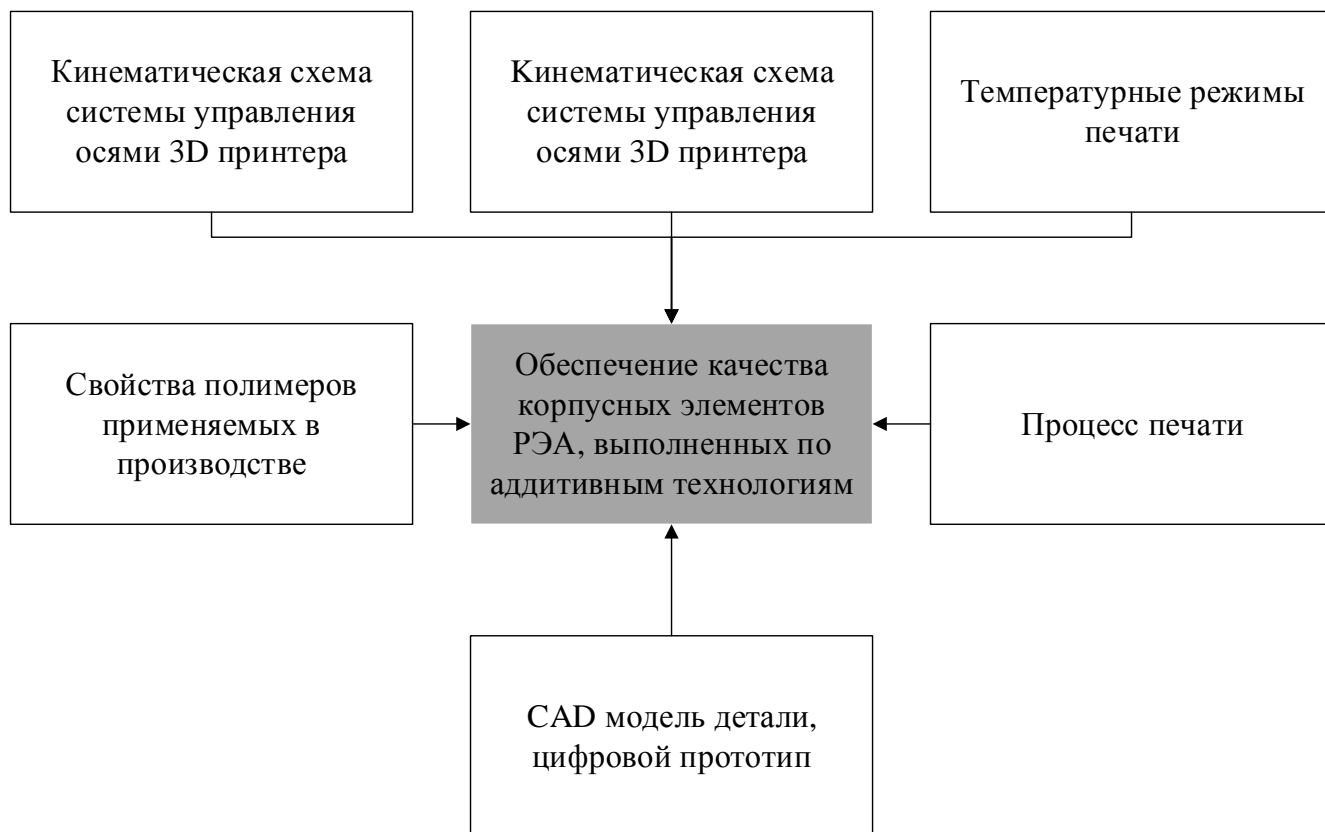


Рисунок 1.4 – Факторы влияющие на обеспечение качества аддитивного производства корпусов РЭА

Сопоставление традиционных и аддитивных технологий производства корпусных элементов РЭА представлено на рис. 1.5, 1.6.



Рисунок 1.5 – Традиционная технология изготовления корпуса РЭА

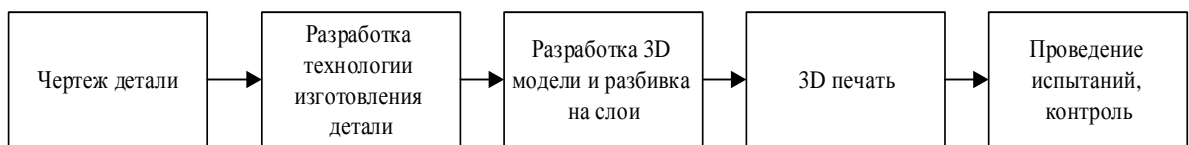


Рисунок 1.6 – Применение аддитивных технологий в производстве корпусных элементов РЭА

Применение данной технологии для производства корпусных элементов РЭА экономически выгодно в мелкосерийном производстве, по сравнению с литьём под давлением.

На рис. 1.7, продемонстрировано сравнение технологий и временных показателей процессов производства корпусных элементов РЭА при затрате минимального количества времени, видно, что в случае МПН технологии экономия времени до 50 %.



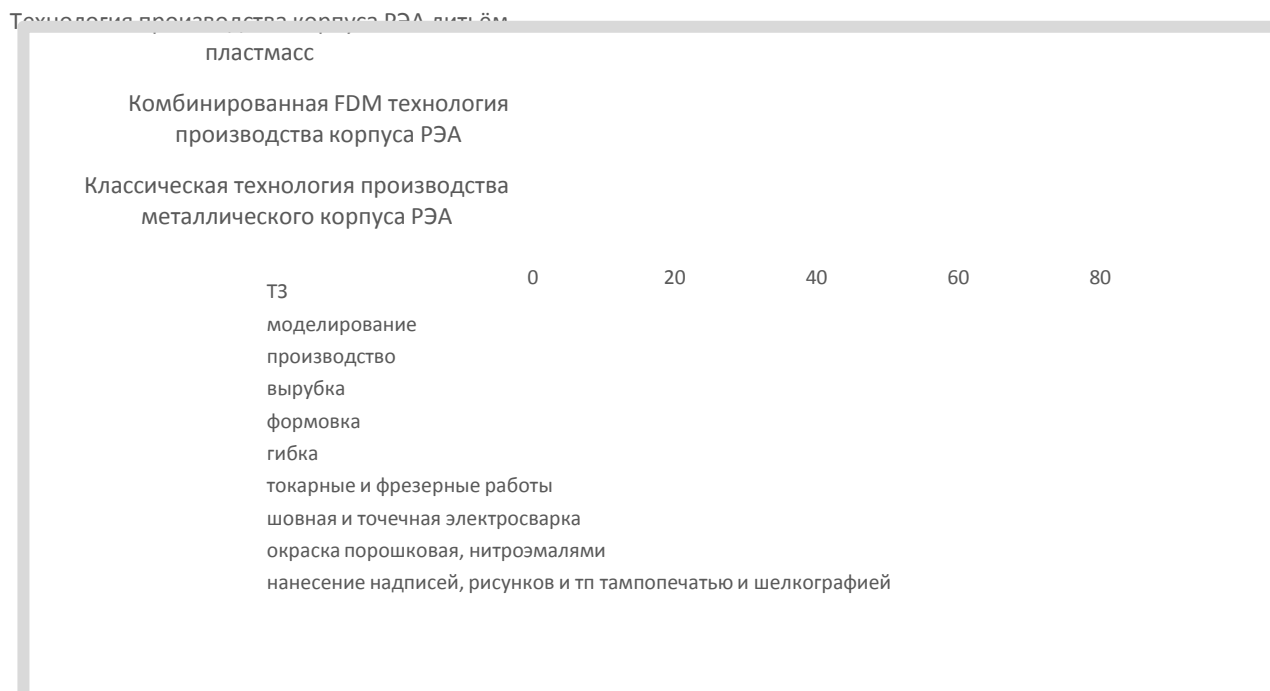


Рисунок 1.7 – Диаграмма временных показателей процесса производства корпусных элементов РЭА с использованием различных технологий

Использование аддитивных технологий обеспечивает повышение качества корпусов РЭА в условиях мелкосерийного производства. Иерархия качества корпуса РЭА показана на рис. 1.8 [38].

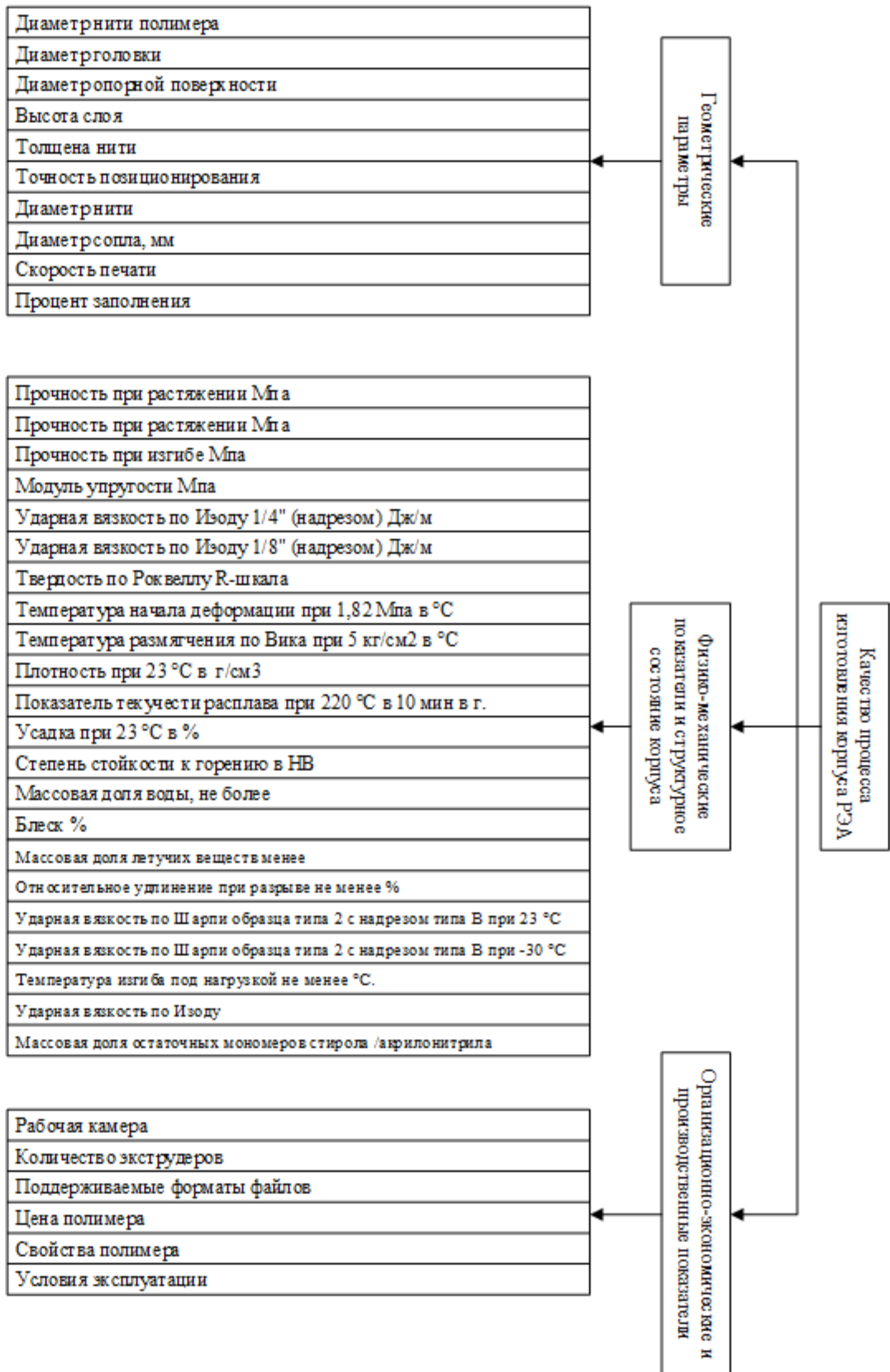


Рисунок 1.8 – Дерево свойств корпуса РЭА

Номенклатура показателей качества и характеризующие ими свойства представлены в табл. 1.2, дополнительные показатели качества, представлена в приложении.

Таблица 1.2 – Номенклатура показателей качества корпуса РЭА

Наименование показателя качества	Обозначения качества	Наименование характеризующего свойства
Температура размягчения	°С	Устойчивость к температурному воздействию
Усадка	%	Размерность
Продолжительность пластично-вязкого состояния	с	Скорость печати
Текучесть	мм	Точность печати

Тип аддитивного производства характеризуется коэффициентом серийности, он показывает количество деталей-операций, которые выполняются в среднем на одной установке, и рассчитывается по формуле [17]:

$$K = \frac{r \cdot n}{p},$$

$r$  – среднее количество технологических операций, которые выполняются при изготовлении каждой детали;  $n$  – количество наименований деталей;  $p$  – число установок.

- массовое производство характеризуется – 1-3 изделий;
- крупносерийное производство характеризуется – 4-10 изделий;
- среднесерийное производство характеризуется – 11-20 изделий;
- мелкосерийное производство характеризуется – более 20 изделий;
- единичное производство характеризуется – бесконечность.

Аддитивное производство использует ГОСТ 3.1109-82 для формулировки производственных процессов.

Тем не менее перспективы применения аддитивных технологий в производстве корпусов РЭА подтверждаются практикой их использования, снижением стоимости технологического оборудования рис. 1.9 [83].

Таблица 1.3 – Технологии объединённые в аддитивном производстве

Обрабатывающий центр	Аддитивная установка
Оборудование для нагрева	
Оборудование для нормализации	
Станочные приспособления	
Оборудование гальваническая ванна	
Шлифовальная установка	
Термопласт установка	
Дополнительные технологические факторы, влияющие на стоимость	
Приспособления и инструменты	Нет
Смазочно-охлаждающие жидкости	
Технологический карты и маршруты, линии перемещения	

Таблица 1.4 – Перечень специальностей, участвующих в процессе производства

Конструктор детали, проектировщик	Конструктор детали
Технолог основной линии производства	Оператор аддитивной установки
	Технолог
	Экономист-нормировщик
Конструктор этапа подготовки и запуска производства	Контролер ОТК
Процессный технолог вспомогательного производства	
Инженер технолог-программист станков с ЧПУ	
ЧПУ Оператор (наладчик)	
Контролер вспомогательного механического производства	
Слесарь-доводчик линии	
Специалист литейного производства	
Оператор линии нагрева	
Специалист УК	
Логистика	
Оператор-технолог термопласт оборудования	
Экономисты, вспомогательного, основного производства	
Нормировщики, вспомогательного, основного производства	
Контролер основного производства	
Контролер	

Ввиду этого аддитивные технологии, непременно, перспективнейшее направление, в том числе и в радиоэлектронике, и требует быстрой адаптации и внедрения в производство на рис. 1.9, приведены примеры

применения аддитивных технологий, а радиоэлектронике.

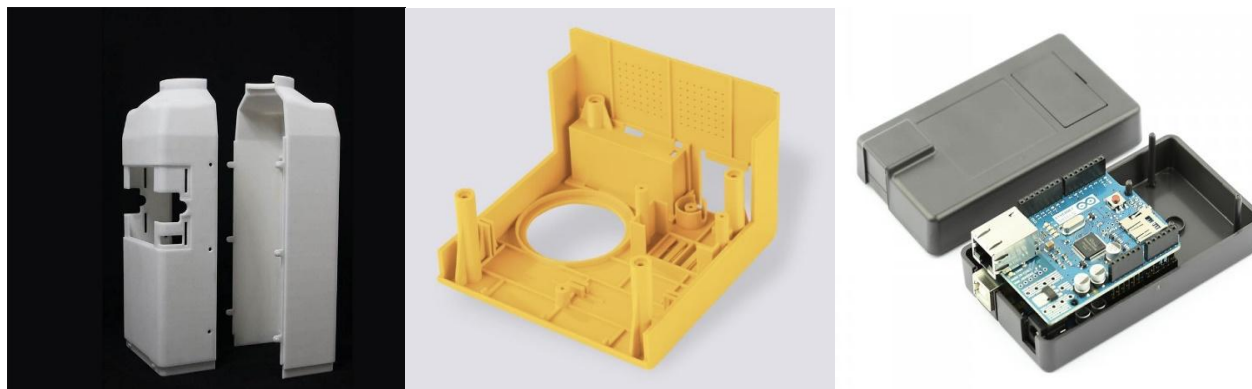


Рисунок 1.9 – Примеры применения аддитивных технологий для РЭА

Основные требования, предъявляемые к системе управления производственной деятельностью предприятия сведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. – Требования к введению нового технологического процесса

Требования к введению	Содержание
Достаточное разнообразие	Система управления действием обязана взыскательно подходить объекту управления
Выбора решений процесса	Учитывается альтернативный анализ вероятных управленческих решений
Обратной связи процесса	Снабжение единичных информационных потоков меж соучастниками инновационной деятельности
Иерархии целей процесса	Единые интересы становления компании должны обладать ценностью над личными интересами отдельных подразделений
Внешнего дополнения процесса	Система должна динамично отвечать на модифицирование состояния контролируемого объекта и внешней среды, быстро преобразовываться перед действием данных конфигураций

Инновационная деятельность, к которой относится аддитивное производство определяется способностью работать как единая система реализации нововведений. Учитывая гибкость 3D-производств, их преимущества по части быстрой адаптации под новые нужды, мобильность, работа с большим диапазоном материалов и форм, достаточно определить результативную модель планирования и обеспечения качества в процессе аддитивного производства, которая будет проста и понятна для потребителя и поможет задавать необходимые требования в зависимости от планируемых затрат и назначения изделия, а также будет четко определять границы качества, которые будут первым шагом для

повышения результативности процесса производства за счет обеспечения качества.

Таким образом при подготовке аддитивного производства корпусных элементов РЭА рассмотрены:

1. системы научно-технической подготовки производства для обеспечения конкурентоспособности продукции;
2. системы НТП производства для выпуска новой продукции;
3. системы НИР по разработке производственных линий;
4. АСТПП предприятий.

На рис. 1.10 представлены основные этапы, оценки качества отражает основные этапы оценки качества производства корпусных элементов РЭА.

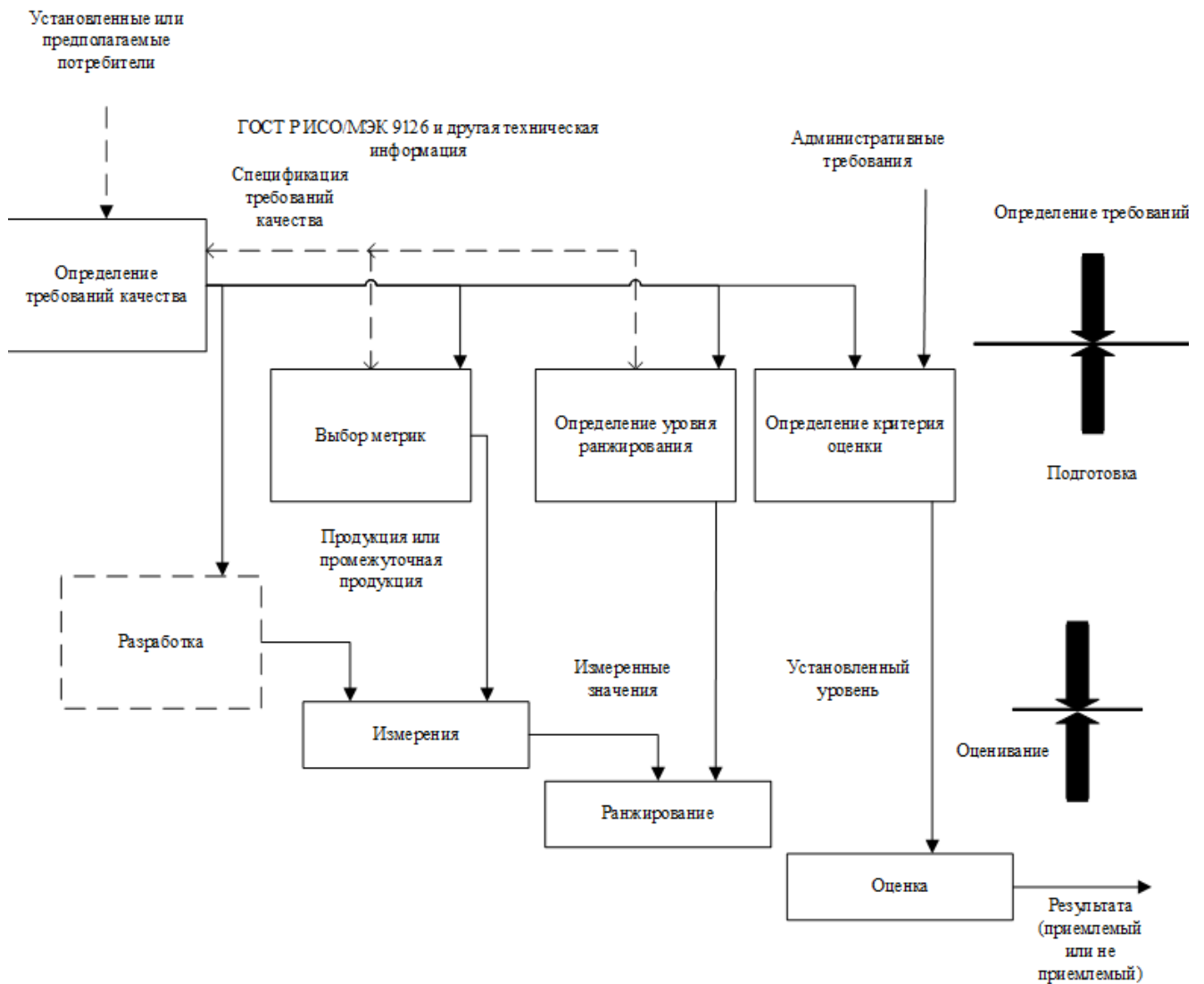


Рисунок 1.10 – Схема процесса оценки производства

Процесс состоит из трех стадий: установление (определение) требований к качеству, подготовка к оцениванию и процедура оценивания. На рис. 1.11 представлена концепция организации производственных процессов аддитивных технологий [83].

Отсюда вытекает проблема с обеспечением качества на последующих этапах процесса, например, затруднено принятие решений по итогам контроля качества. Детали в зависимости от требований могут быть поставлены или идентифицированы как несоответствующие. В последующих разделах приведен анализ требований к качеству изделий, произведенных методом послойного синтеза, из него видно, что точного определения уровня качества не существует, поэтому необходимо самостоятельно регламентировать и предоставить данные потребителю в упрощенной качественной форме, чтобы уйти от неопределенности и повысить качество и результативность процесса 3D-печати. Во время серийного производства загрузка мощностей происходит исходя из опыта рабочих и в большем количестве случаев заказ отправляется на оборудование, которое является более дорогим, и себестоимость изделия выходит выше, также при производстве нескольких изделий или нескольких заказов время выполнения заказов значительно возрастает, так как заказ выполняется преимущественно на одном оборудовании, когда другие принтеры простаивают, такой вид издержек приводит к удорожанию производства и повышению риска невыполнения заказов в срок [83].

Одной из причин подобного выбора является желание рабочих изготовить изделия наиболее высокого качества вне зависимости от требований заказчика, который проявляет желание платить меньше и готов к более низкому качеству изделий. Необходимо создать последовательный цикл, который позволит создать шкалу градации качества продукции, оценить качество изделий, и повысить результативность при помощи управления ресурсами, а основными методами повышения результативности процесса аддитивного производства является планирование и обеспечение качества продукции [82].

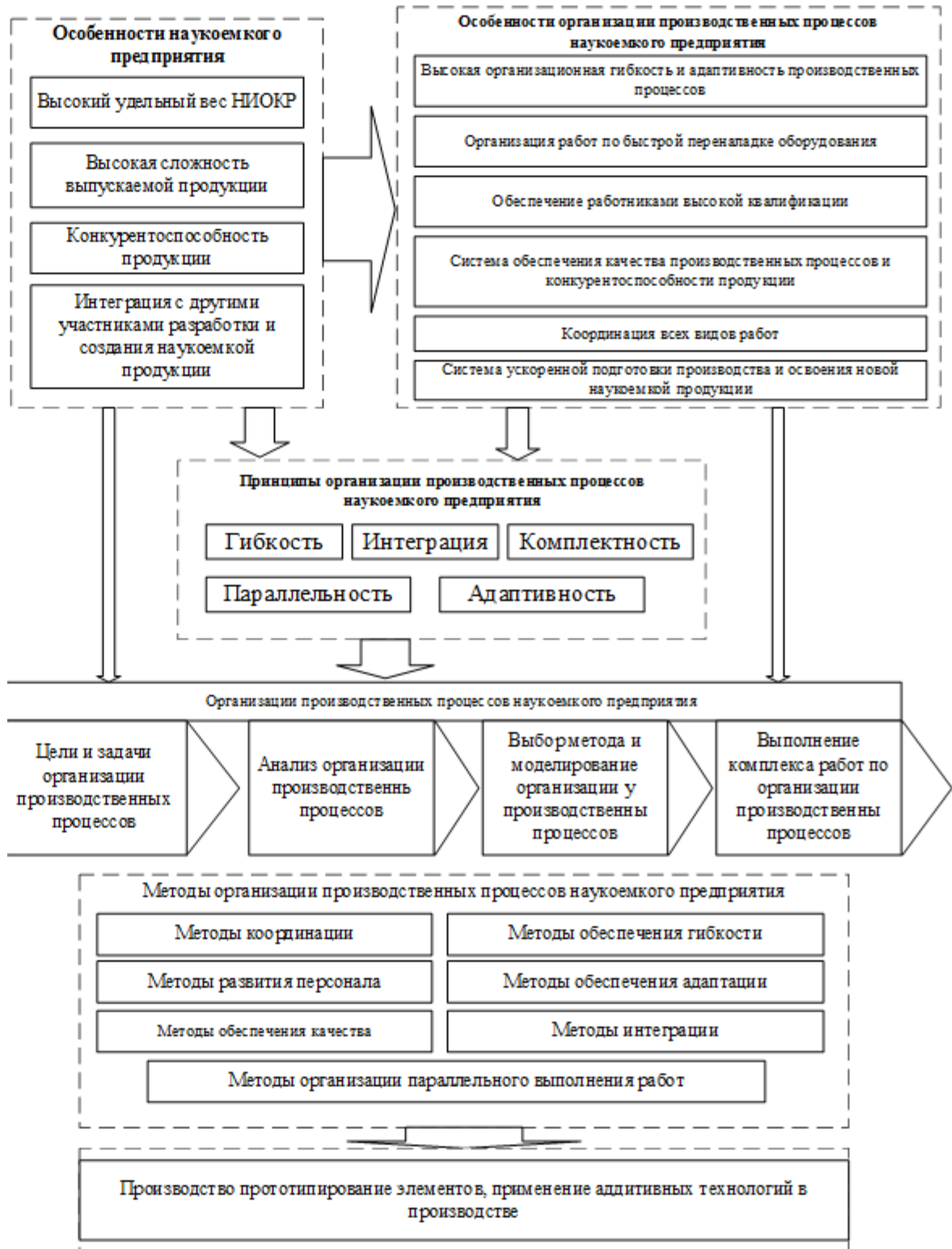


Рисунок 1.11 – Особенности производственных процессов аддитивных технологий

На базе управления производством корпусных элементов РЭА с применением аддитивных технологий и особенностей цифрового производства



предложен традиционный в условиях локальной автоматизации процессов цикл конструкторско-технологической подготовки производства корпуса РЭА рис. 1.12.

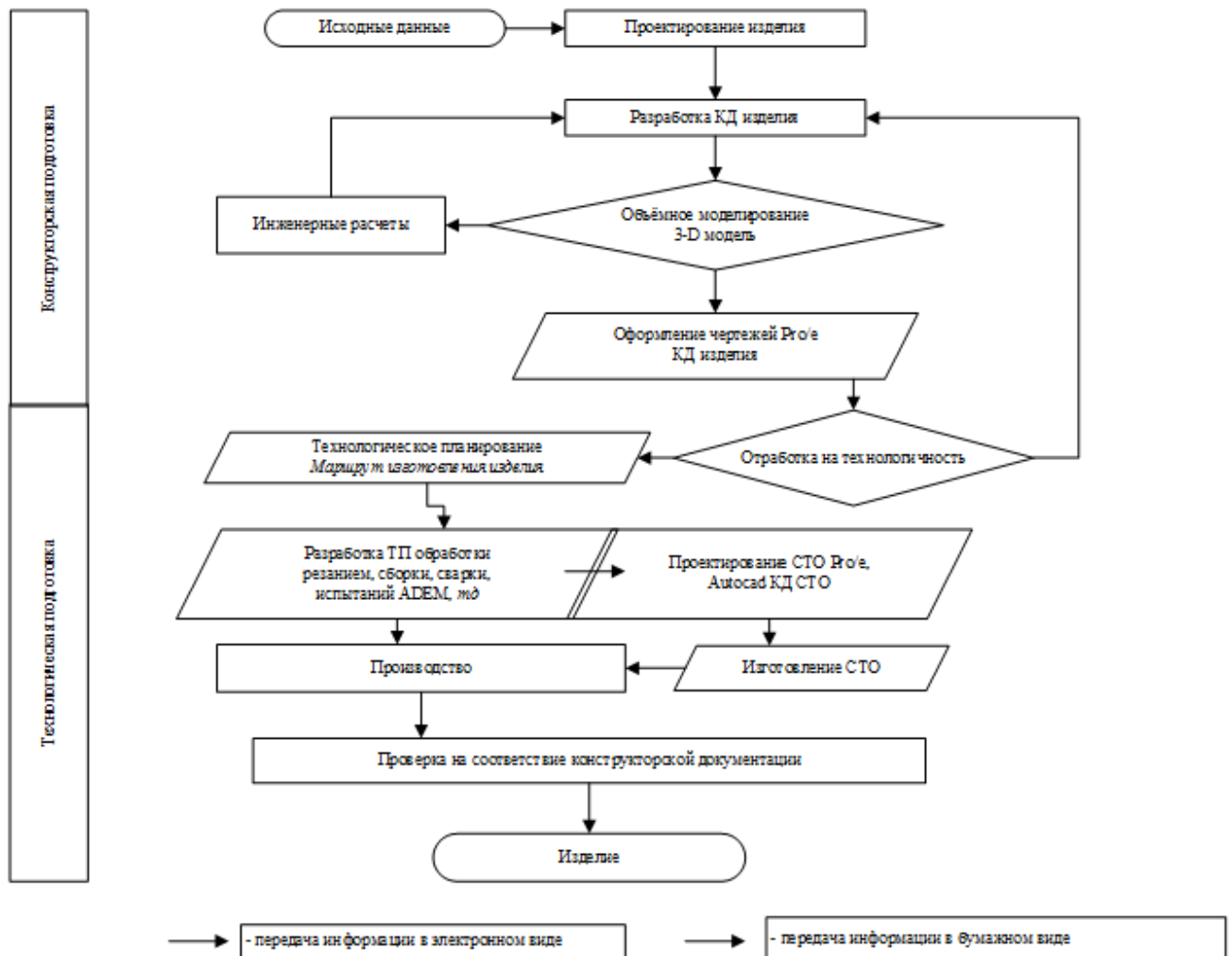


Рисунок 1.12 – Последовательный цикл конструкторско-технологической подготовки производства корпусных элементов РЭА

Применение аддитивных технологий позволяет наладить выпуск различных корпусов РЭА на основе технологии МПН.

## 1.2 Базовые конструктивы корпусных элементы РЭА

Классификация корпусов для радиоэлектронной аппаратуры обусловлена её назначением. Классификация корпусов включает такие виды:

- корпуса РЭА, имеющие защиту от влаги и коррозии и так далее при помощи различных композиционных материалов;
- стационарные корпуса РЭА;
- переносные корпуса РЭА;
- корпуса РЭА, стойкие к различным перепадам температур;
- корпуса РЭА предназначенные для монтажа на горизонтальную и вертикальную поверхность.

Для режимов эксплуатации корпусов РЭА характерны:

- длительный срок эксплуатации;
- термоустойчивость;
- устойчивость к физическому воздействию;
- высокие антикоррозийные свойства;
- устойчивость к химическим воздействиям;
- удобство в перемещении.

Применение аддитивных технологий в производстве корпусных элементов РЭА обеспечивает повышение эксплуатационных показателей и уменьшение влияние форм-фактора корпуса на компонентную базу РЭА рис. 1.14.

Мелкосерийное производство регламентируется ГОСТ 15.005-86 (с Изменениями N 1, 2, 3, 4).

Корпус – изделие, предназначенное для размещения плат и узлов электронной аппаратуры.

Основные требования – механическая прочность, защита от внешних воздействий, защита от поражения электрическим током, защита от выброса наружу продуктов горения.

Конструктив корпуса – совокупность различных элементов, являющих вместе единую целостную механическую конструкцию.

Основные характеристики:

- материал; технологичность;

- стойкость к внешним воздействиям (параметры окружающей среды, проникаемость пыли и влаги (IP), вибрации, помехи);
- эргономичность;
- габаритные размеры;
- масса.

Для корпусов характерны: устойчивость к физическому воздействию; длительный срок эксплуатации; термоустойчивость; высокие антикоррозийные свойства; устойчивость к химическим воздействиям; удобство в перемещении [84].

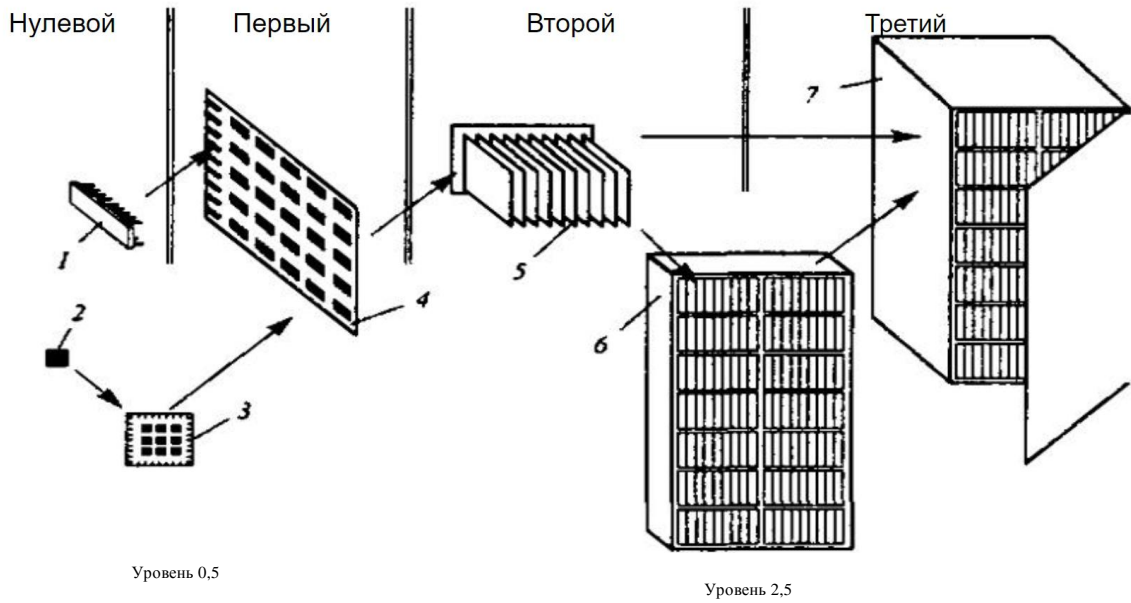


Рисунок 1.13 – Принцип конструирования РЭА

При конструировании модулей выполняются следующие операции:

- анализ одинаковых по назначению конструктивов для последующей унификации их структуры в рамках конкретного изделия РЭА;
- выбор конструктива;
- конструирование компонентной базы;
- выбор способов защиты компонентной базы от перегрева и внешних воздействий.

- Модули первого уровня
- Модули нулевого уровня (ТЭЗ)
- Модули второго уровня (блоки)
- Модули третьего уровня (стойки)
- Модули 0,5 и 2,5 уровня



1 - микросхема; 2 - бескорпусная микросхема; 3 - микросборка; 4 - типовой элемент замены (ТЭЭ), ячейка; 5 - блок; 6 - рама; 7 - стойка

Рисунок 1.14 – Конструктивная иерархия и входимость модулей РЭА

Использование аддитивных технологий позволяет закладывать в конструкцию РЭА экранирование электромагнитных полей узлов радиоэлектронной аппаратуры и их соединений при использовании токопроводящих материалов.

При формировании корпуса РЭА необходимо учитывать те показатели, которые влияют на производство корпусных элементов.

На рис. 1.15 представлено формирование показателей согласно международной классификации объекта [85].

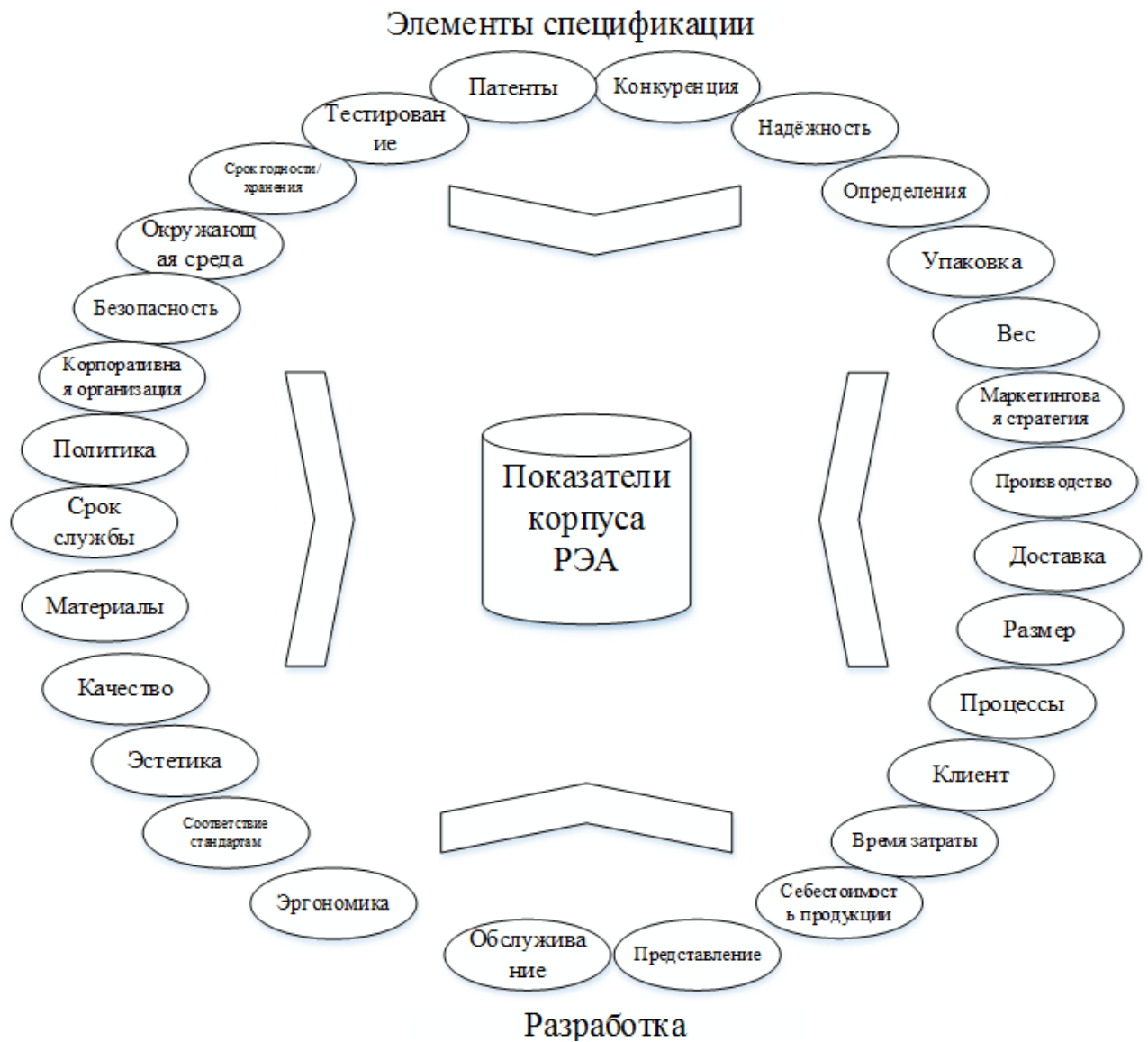


Рисунок 1.15 – Формирование показателей корпусных элементов РЭА

Таблица 1.6 – Классификация по форм-фактору корпусных элементов РЭА

Наименование корпусов РЭА	Внешний вид
Герметизированные корпуса из поликарбоната и ABS пластика	

<p>Пластиковые штампованные</p>	
<p>Литые алюминиевые корпуса</p>	
<p>T образные корпуса</p>	
<p>Герметизированные литые и алюминиевые корпуса</p>	
<p>Огнеупорные корпуса</p>	
<p>Пультовые корпуса</p>	
<p>Пластиковые корпуса для конструирования</p>	

Таблица 1.7 – Классификация по форм-фактору корпуса РЭА

G201	G302	64 x 58 x 35	G250	G362	52 x 50 x 35
G203	G304	115 x 65 x 40	G256	G366	82 x 80 x 55
G205	G308	115 x 65 x 55	G258	G368	160 x 80 x 55
G212	G311	115 x 90 x 55	G265	G369	160 x 80 x 85
G214	G313	171 x 121 x 55	G269	G373	200 x 120 x 75
G218	G317	222 x 146 x 55	G278	G386	120 x 120 x 60
G221	G331	115 x 90 x 80	G279	G387	120 x 120 x 90
G223	G340	171 x 121 x 80	G287	G396	160 x 160 x 60
G229	G346	195 x 80 x 55	G288	G399	160 x 160 x 90
G232	G353	222 x 146 x 75	G2018	G3008	240 x 160 x 90
G238	G378	265 x 185 x 95	G2025	G3019	240 x 160 x 120

Таблица 1.8 – Классификация по форм-фактору корпуса РЭА

Система обозначений	G858	G	(S)BC
Серия	1	2	3
Цвет корпуса G – серый В – черный BK – окрашенный в черный Тип корпуса	S – корпус без отверстия для ЖКИ, V – корпус с вентиляц. отверстиями, BC – корпус с батарейным отсеком, A – корпус с алюминиевыми вставками, TP – корпус с красной прозр. Крышкой, C – корпус с прозрачной крышкой, UL – корпус из огнеупорного пластика, O – корпус с отверстием для ЖКИ.		

Степень унификации РЭА:  $K_{ун} = N_{ун}/N$ , где  $N_{ун}$  – количество унифицированных элементов, а  $N$  – общее количество примененных в РЭА элементов.

Аддитивные технологии позволяют производить корпусных элементов РЭА любой сложности и профиля, что обеспечивает необходимую точность позиционирования радиоэлементов в корпусе [86].

Формирование специфики нового корпуса РЭА производят из различных полимеров, обладающих различными свойствами.

Дизайн, эргономичность, технологичность, определяют структуру процесса формирования спецификации корпусов РЭА (рис. 1.16). Учитывающий различные виды полимеров (приложение Б).

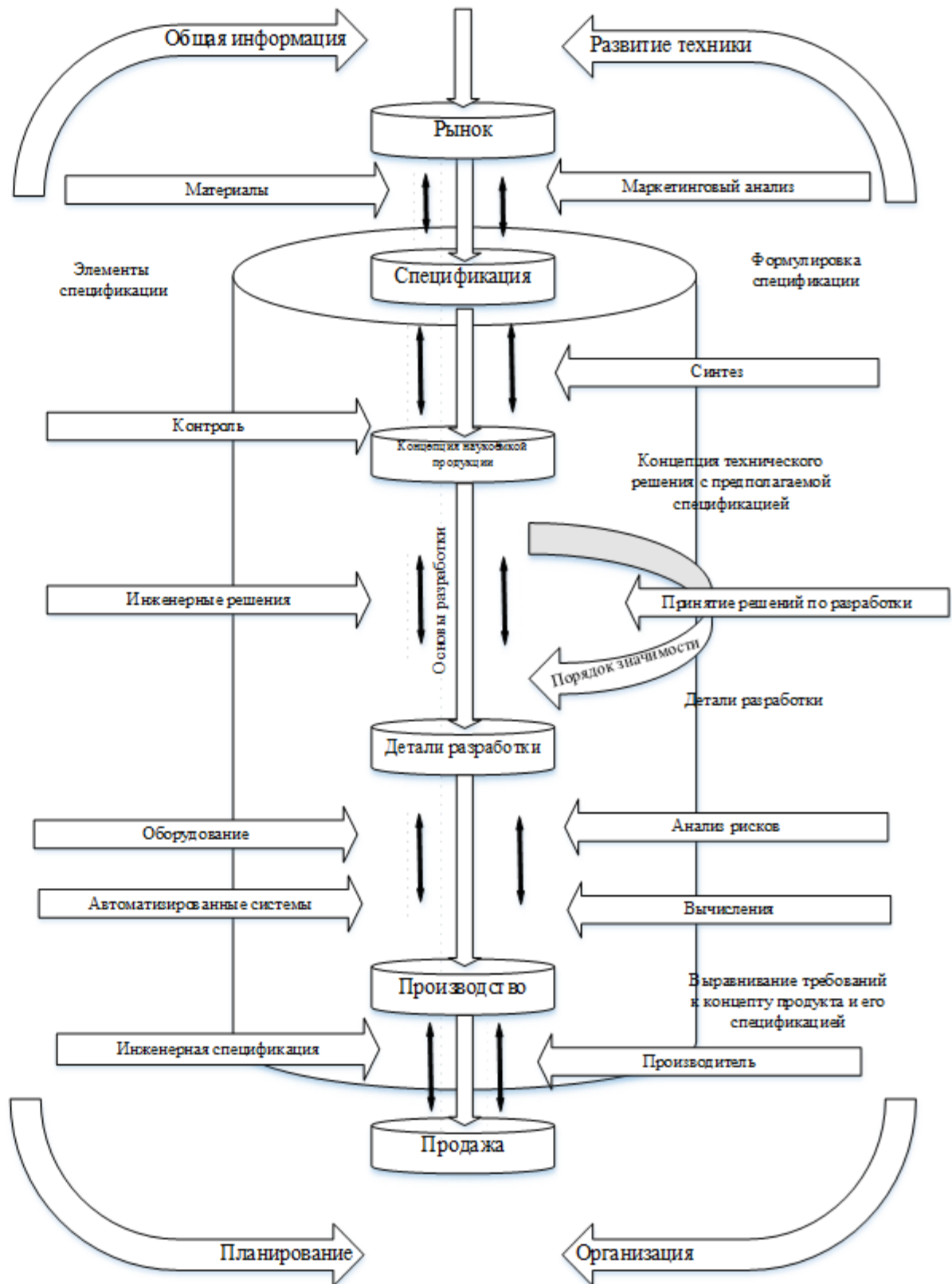


Рисунок 1.16 – Формирование спецификации нового корпуса РЭА

Многономенклатурное аддитивное производство предполагает следующие особенности: масштабируемость; совместимость; модульность; мобильность; универсальность, регулируемость. Данные особенности вызывают необходимость расширенного информационного сопровождения производственных систем.



При производстве корпусных элементов учитываются:

- Механические свойства полимеров.
- Термические свойства полимеров.
- Физические свойства полимеров.

Полный перечень приведён в Предложении Д.

Набор признаков качества должен соответствовать характеристикам объекта оценки и предусматривать возможность изменять технические характеристики корпуса РЭА.

Для управления процессом производства и определения качества исследуемого объекта рассчитывается величина интегрального показателя качества на основе физических свойств, увеличение или изменение характеристик печати в размах (значение более единицы), или соответственное численное удешевление цены исследования в размах.

На основе физических свойств корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям приведена формула интегрального показателя:

$$I_{pi} = \sum_{j=1} a_i \cdot b_{ij} ,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения;

$a_i$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения корпусного элемента РЭА;

$b_{ij}$  – весовой коэффициент параметра корпусного элемента РЭА.

Набор признаков качества выбранных соответствует характеристикам аддитивного производства и предусматривает возможность изменять технические характеристики в зависимости от требований к корпусам РЭА.

Таблица 1.9 – Сравнение характеристик вариантов исполнения изделия

Объект оценки / Критерии оценки	Весовой коэффициент параметра	Технологии аддитивного производства	Литьё полимеров	Прессование материалов
1. Механические свойства	0,10	5	5	5
2. Термические свойства	0,35	4	3	3
3. Физические свойства	0,15	4	4	4
4. Надежность	0,25	5	3	4

5. Сложность формы	0,15	4	4	4
ИТОГО	1			
$I_{pi}$		4,35	3,50	3,75

$$I_{AT}=5*0,1+4*0,35+4*0,15+5*0,25+4*0,5=4,35$$

$$I_{ЛП}=5*0,1+3*0,35+4*0,15+3*0,25+4*0,5=3,50$$

$$I_{ПП}=5*0,1+3*0,35+4*0,15+4*0,25+4*0,5=3,75$$

Интегральный показатель эффективности разработки ( $I_{np.}^a$ ) и аналога и аналога ( $I_{np.}^a$ ) ориентируется на основании интегрального признака ресурсоэффективности и интегрального финансового признака согласно формуле:

$$I_{np.}^P = \frac{I_{np.}^P}{I_{ф.}^P}$$

Сопоставление интегрального признака отдачи разновидностей выполнения исследования позволит найти сравнительную оценку реального производства корпуса РЭА и выбрать целесообразный вариант технологии. Приведена формула сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^P}{I_{финр}^a}$$

где  $\mathcal{E}_{cp}$  – сравнительная эффективность проекта;  $I_{финр}^P$  – интегральный показатель разработки;  $I_{финр}^a$  – интегральный технико-экономический показатель аналога.

Таблица 1.10 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

№ п/п	Показатели	Аддитивные технологии	Литьё пластмасс	Прессование полимеров
1	Интегральный финансовый показатель производства корпуса РЭА	1,00	0,75	0,85
2	Интегральный технический показатель корпуса РЭА	4,35	3,50	3,75
3	Интегральный показатель точности элементов корпуса РЭА	4,35	4,67	4,41
4	Сравнительная эффективность проекта	1,00	0,99	1,01

	относительно классических технологий производства корпуса РЭА			
Итого		10,70	9,98	10,02

Сравнение значений интегральных показателей различных технологий видно, что применение аддитивных технологий более эффективное решение для производства корпусных элементов РЭА с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Для этого необходимо провести анализ технологического процесса производства корпуса РЭА.

### **1.3 Анализ технологического процесса производства методом послойного наплавления корпусов РЭА**

Технологический процесс послойного синтеза корпусных элементов на основе применения аддитивных технологий представляет собой спланированный и подготовленный процесс преобразования цифровых, виртуальных моделей в физические объекты. Процесс 3D-печати состоит из основных этапов:

1. Создание цифровой модели.
2. Экспорт 3D-модели в STL-формат.
3. Генерирование G-кода.
4. Подготовка 3D-принтера к работе.
5. Печать 3D-объекта.
6. Финишная обработка объекта.

Расчёт периода освоения новой технологии производства корпуса РЭА выполняется на основе ЖЦ представленного на рис.1.17.

На сегодняшний день нормативно-технологический базис российской промышленности содержит несколько тысяч нормативных документов, которые регламентируют разработку, проектирование, производство, эксплуатацию и утилизацию продукции и не охватывают вопросы обеспечения свойства аддитивного изготовления в необходимой мере. Отображением западных основ снабжения качества стали стандарты серии ISO 9000, где одним из способов снабжения качества процессов является объективный контроль и регистрация их

параметров. В виду этого для обеспечения конкурентоспособности необходимо создать шкалу градации качества продукции аддитивного производства, разработать модель обеспечения качества процесса послойного синтеза, которая позволит оценить качество изделий и повысить результативность на основе обеспечения качества.



Рисунок 1.17 – Основные этапы жизненного цикла корпуса РЭА

Стандарты ISO предписывают не только функциональный контроль и «прослеживаемость» на протяжении всего жизненного цикла, но и управление полной себестоимостью продукции с учетом затрат функционального жизненного цикла. Процесс разработки представлен на рис. 1.18 [87,88].

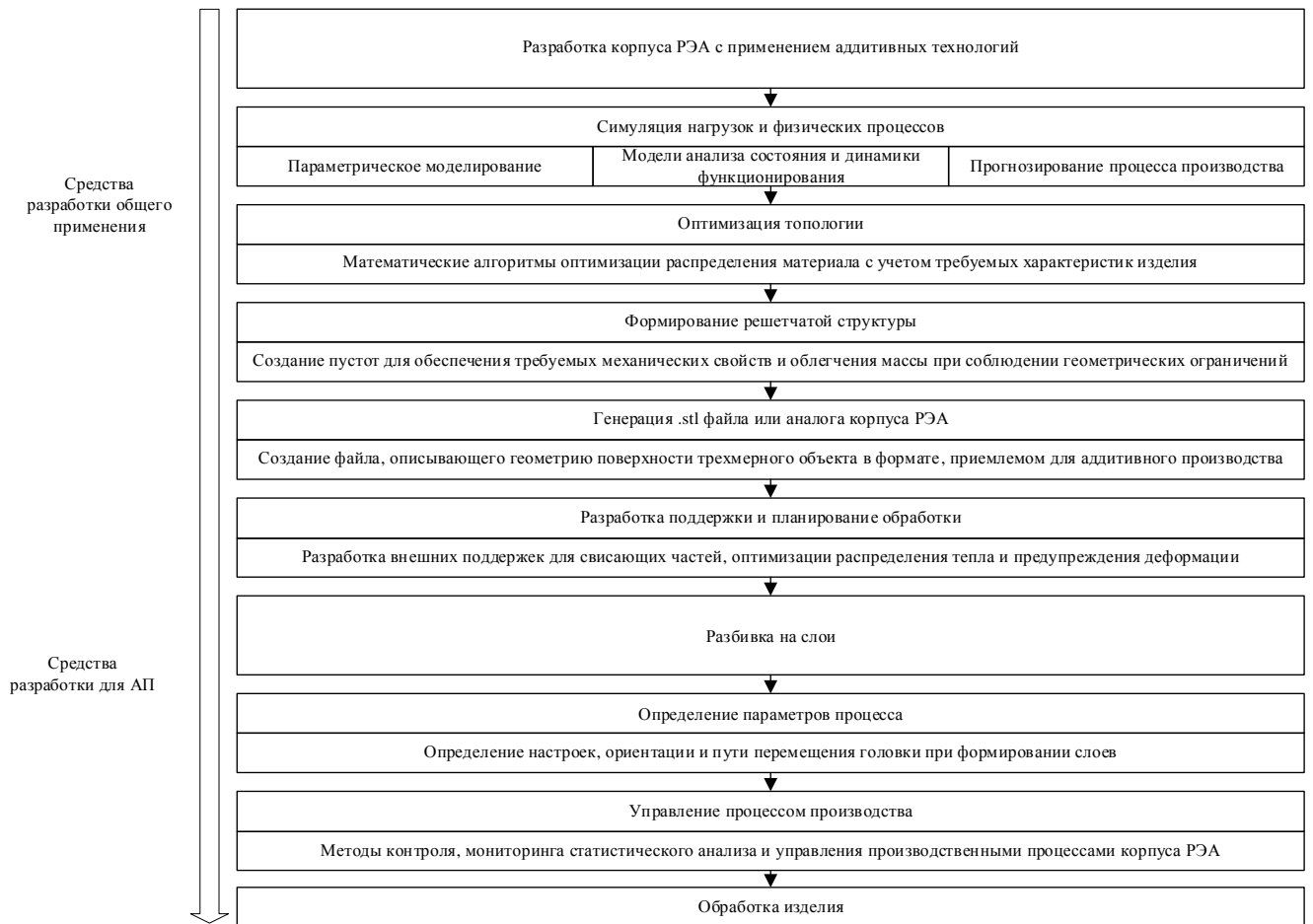
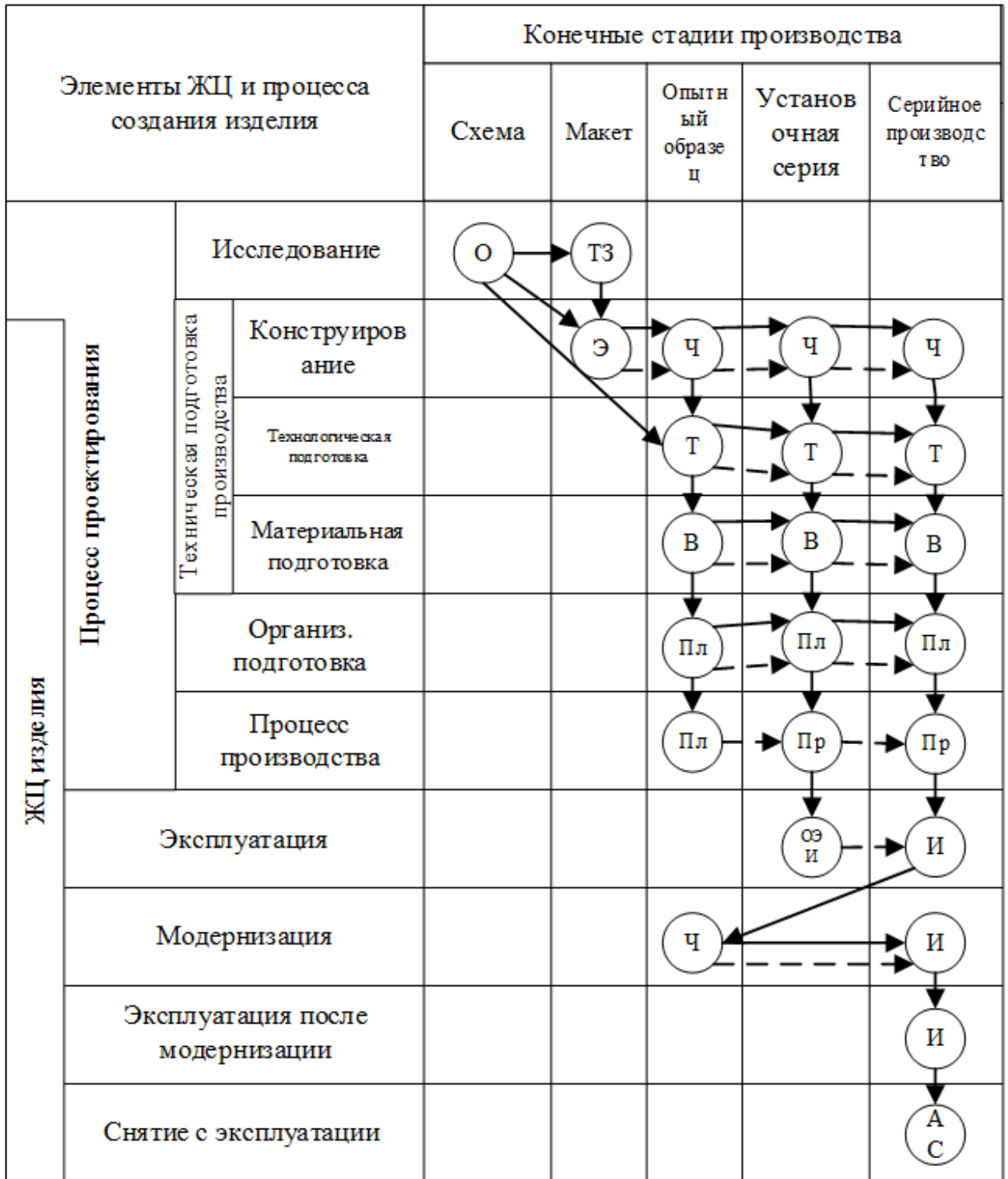


Рисунок 1.18 – Процесс разработки изделия для аддитивного производства корпуса РЭА

Конструирование конструктивного элемента определяется, как процесс создания конструкторской документации, представляющей собой графическую, текстовую либо цифровую модель грядущего продукта, возведенную на базе итогов исследований, переработки технической информации, с внедрением способов научного знания, отличительных для действий исследований. Научно-техническая, материальная и планово-организационная подготовка изготовления предполагают собой комплекс мер, связанных с техническим и информационным снабжением производственных действий конкретного производства макетов, опытных образцов либо серий сконструированных продуктов. Вместе с конструированием эти работы принято называть технической подготовкой производства [89].

На (рис. 1.19) показана взаимосвязь элементов ЖЦ и процесса ее создания в соответствии с конечным продуктом (конечной целью) каждой стадии.



О – начало ЖЦ, ТЗ – техническое задание, Э – эскизы, Ч – чертежи, Т – технологические процессы, В – материальные ресурсы, Пл – планы и задания, Пр – производство, ОЭИ – опытная эксплуатация, И – изделие, АС – снятие с эксплуатации и утилизация.

Рисунок 1.19 – Структура ЖЦ конструктивного элемента РЭА

Выбор конкретного направления инновационного развития предприятия проводится на основе результатов диагностического анализа и оценки технико-организационного уровня производства.

Основными направлениями технологической перемены должны стать: планирование распределения мощностей, уменьшение количества несоответствий, минимизация себестоимости за счет повышения качества продукции, что способствует наращиванию выпуска конкурентоспособной продукции.

Произведен анализ отдельных элементов производственного процесса, а затем предложены пути совершенствования.

Правильное понимание причин не результативности организации на уровне отдельных операций позволяет устранить или сократить затраты на выполнение операций, не создающих добавленной ценности в процессе.

Для этого строится схема процесса аддитивного производства (рис. 1.20).

Стандарты предлагают только схему потока данных [90].

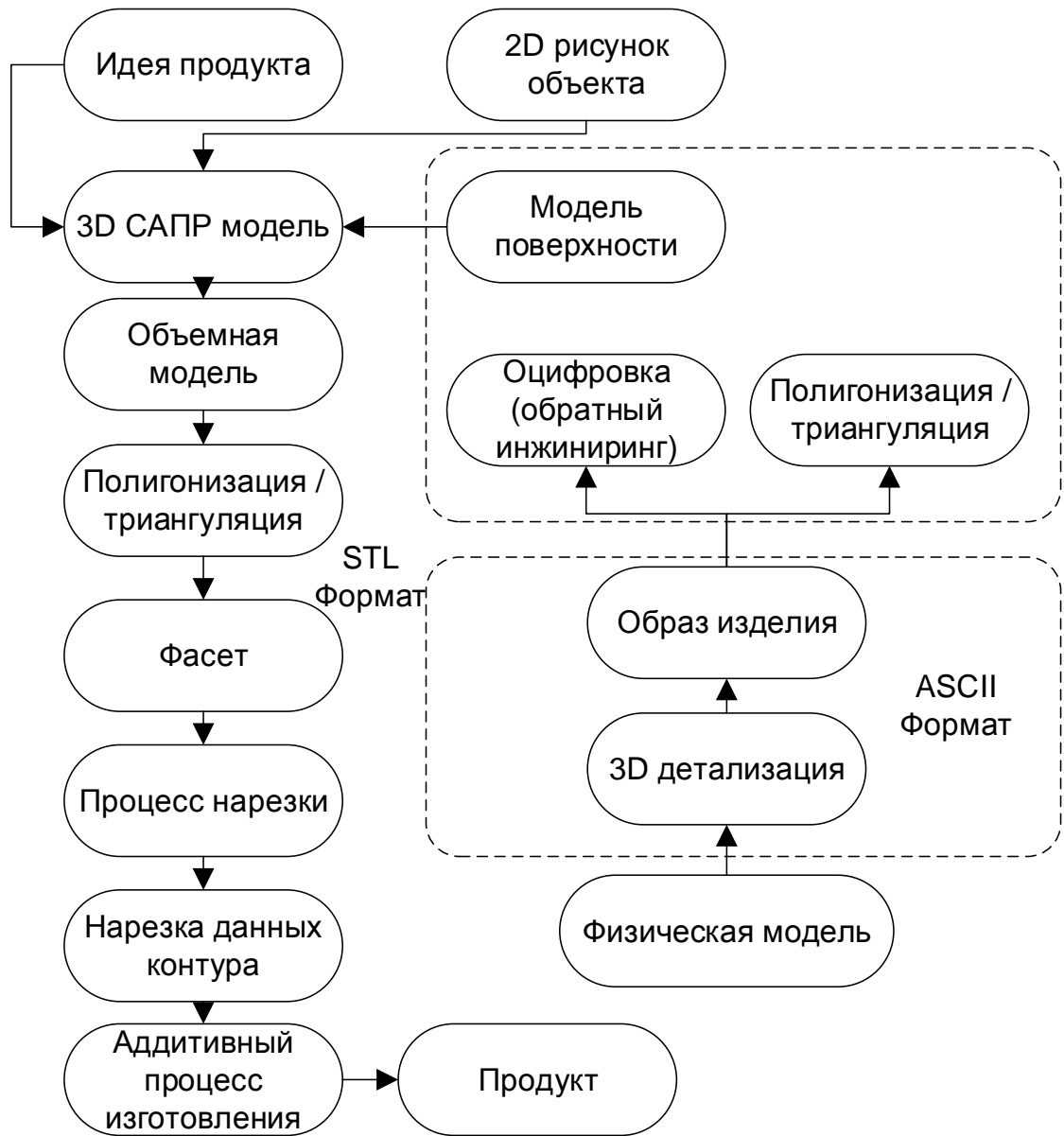


Рисунок 1.20 - Общий обзор традиционного потока данных от идеи продукта до фактической части

Общая схема аддитивного производства из Информационно-аналитического отчета «Анализ мирового опыта развития промышленности и подходов к цифровой трансформации промышленности государств-членов Евразийского экономического союза» изображена в виде общей схемы [20].

Рассмотрим и подвергнем анализу процесс аддитивного производства на базе лаборатории аддитивных технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (рис. 1.21).



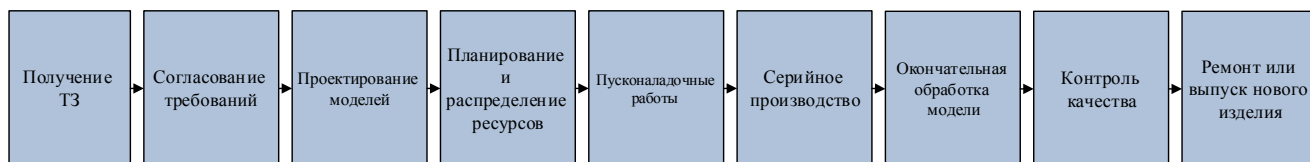


Рисунок 1.21 – Схема аддитивного производства

Освоение изготовления корпуса РЭА, начальный период производства продукции, выполненной по аддитивным технологиям, начинающийся выпуском первых продуктов и кончающийся достижением заданных в ТЗ проектных технико-финансовых характеристик (проектного выпуска продуктов в единицу времени, проектной трудозатратности, проектной себестоимости).

Расчёт периода освоения производства. В результате текущее время освоения меньше за счёт снижения трудоемкости изготовления изделия продукции.

Период времени освоения, описывается уравнением:

$$y_i = a \times x_i$$

В качестве “х” может использоваться натуральный номер изделия. В последнем случае уравнение будет иметь вид:

$$T_i = T_n \times N_i,$$

где

$T_i$  – трудоёмкость для изготовления при помощи послойного нанесения полимера  $i$ -го номера изделия, н-час;

$T_n$  – начальная требуемая трудоёмкость изделия, н-час.

Далее проводится мониторинг технологического процесса, конструирования полимеров и выявление их технологических показателей. В приложении Б приведён перечень полимеров.

Техническую норму времени характеризуют на базе технических способностей научно-технической оснастки, производственного прибора, станочного оснащения и верной организации рабочего места. «Норма времени

является одним из основных факторов для оценки совершенства технологического процесса и выбора наиболее прогрессивного варианта обработки заготовки.

В крупносерийном и массовом производстве общая норма времени (мин) на обработку одного конструктивного элемента  $T_{и} = T_0 + T_в + T_{м.о} + T_{о.н.}$

$$T_0 = \frac{L_{п.х.}}{s_{см} n_{см} K_{зах}}$$

где  $T_0$  – технологическое (основное) время, мин;  $T_в$  – вспомогательное время, мин;  $T_{м.о}$  – время на обслуживание рабочего места, мин;  $T_{о.н.}$  – время на отдых и естественные надобности, мин.»

Время, затрачиваемое на технологическую операцию производства

$$T_в = (T_{уст.} + T_{пер} + T_{пер.к} + T_{изм}) K_{тв},$$

где  $T_{уст.}$  – требуемое время на оснастку и снятие корпусного элемента, мин;  $T_{пер}$ , – требуемое время, связанное с переходом на следующий этап;  $T_{пер.к}$  – требуемое время, новые этапы, мин;  $T_{изм}$  – требуемое время на контроль, мин;  $K_{тв}$  – коэффициент вспомогательного времени.

Время, затрачиваемое на техническое обслуживание и мониторинг установки.

$$T_{м.о} = (T_0 + T_в) (a_{п.о}/100)$$

где  $a_{п.о}$  - время на техническое обслуживание.

Время перерыва и физические потребности.

$$T_{о.н.} = (T_0 + T_в) (a_{т.о}/100)$$

где  $a_{т.о}$  - время на перерыв (в %) к оперативному времени.

Таблица 1.11 – Время оперативного производства

Оперативное время работы, мин.	Число изделий								
	Коэффициент $K_t$ в зависимости от партии и количества изделий								
	16	25	40	68	100	160	250	400	630
1	-	-	1,23	1,15	1,07	1,00	0,93	0,87	0,81
4	1,23	1,75	1,07	1,00	0,93	0,87	0,81	0,76	-

8	1,15	1,07	1,00	0,98	0,87	0,81	0,76	-	-
30 и более	1,00	0,93	0,87	0,81	0,76	0,71	-	-	-

Применение аддитивных технологий позволяет включить в этап «Проектирование» этапы «Модель корпуса РЭА», «Чертеж корпуса РЭА» и «Оснастка оборудования». Этап «Оснастка» не требуется в процессах с использованием аддитивного производства.

Во время серийного производства загрузка мощностей происходит исходя из опыта рабочих и в большем количестве случаев заказ отправляется на оборудование, которое является более дорогим, и себестоимость изделия выходит выше, также при производстве нескольких изделий или нескольких заказов время выполнения заказов значительно возрастает, так как заказ выполняется преимущественно на одном оборудовании, когда другие принтеры простаивают, такой вид издержек приводит к удорожанию производства и повышению риска невыполнения заказов в срок. Одной из причин подобного выбора является желание рабочих изготовить изделия наиболее высокого качества вне зависимости от требований заказчика, который проявляет желание платить меньше и готов к более низкому качеству изделий [18].

Таблица 1.12 – Сравнение технологических решений по временным затратам

Этап процесса производства	Длительность производства
<b>Классическая технология производства корпуса РЭА, применяемая на текущий момент</b>	
Идея корпуса РЭА	1-2 часа
Модель корпуса РЭА	3-4 часов(среднее)
Чертеж корпуса РЭА	6-7 часов
Прототип корпуса РЭА	3-5 часов
Оснастка корпуса РЭА	от 16 часов
Изготовление корпуса РЭА	от 4 часов
Сборка корпуса РЭА	от 1 часа
Общее время корпуса РЭА	34-39 часов
<b>Аддитивные технологии производства корпуса РЭА</b>	
Идея корпуса РЭА	1-2 часа
Проектирование корпуса РЭА	от 7-12 часов
Печать корпуса РЭА	от 5-10 часов
Общее время производства корпуса РЭА	13-24 часов

Применение аддитивных технологий в производстве корпусных элементов РЭА, блок-схема которой представлена на (рис. 1.22).

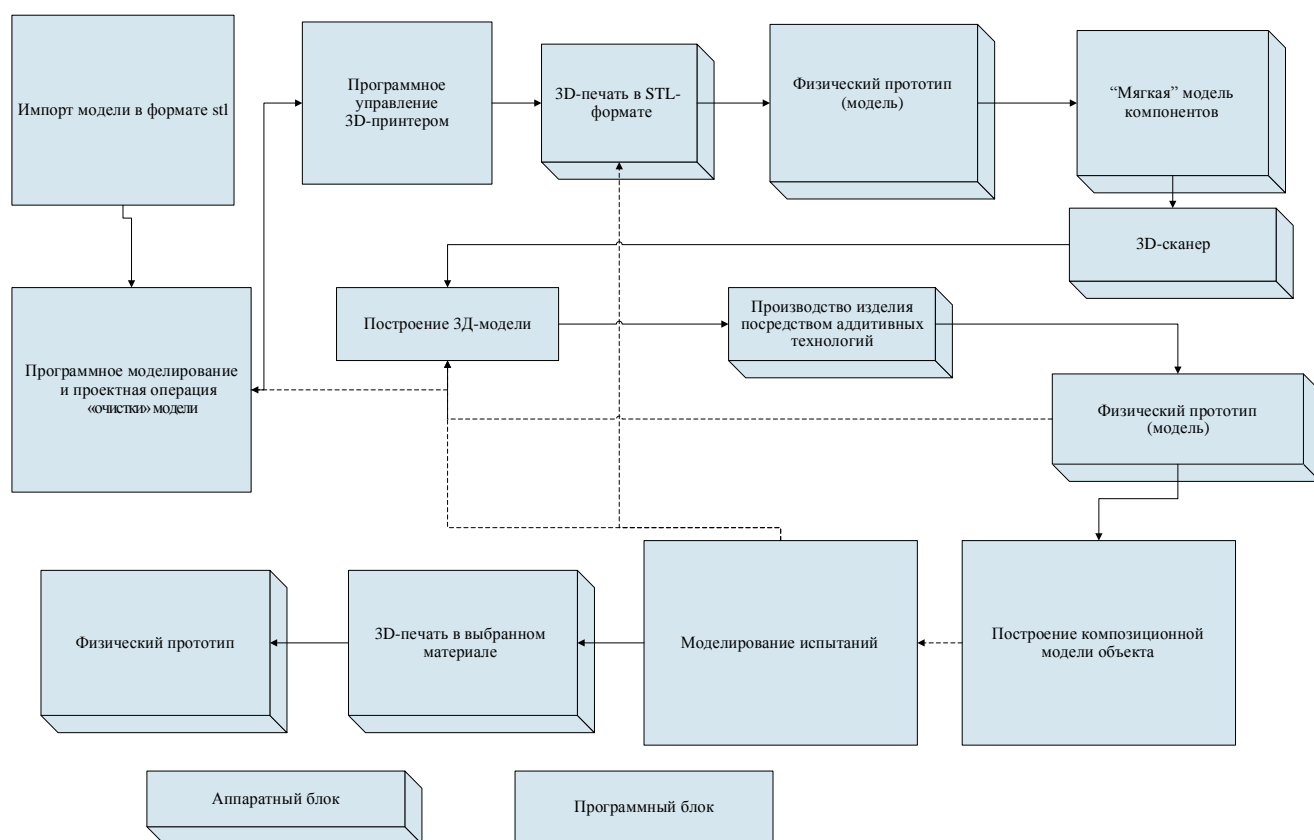


Рисунок 1.22 – Схема технологии проектирования и изготовления конструктивного элемента РЭА

Вид изготовления характеризуют из разбора системы РЭА, программки выпуска и реального годового фонда рабочего времени. Для конкретного вида изготовления выбирают рациональные способы производства, нужное оснащение и оснастку для производства. Вид изготовления вычисляют с поддержкой коэффициента серийности

$$n_p = \frac{N_t \sum_{i=1}^{K_o} T_{um.i}}{60k\Phi_D}$$

где  $N_t$  – это годовой объем выпуска продукции, шт.;  $\sum_{i=1}^{K_o} T_{um.i}$  – трудоёмкость сборки изделия, мин;  $T_{um.i}$  – время штучной  $i$ -й сборочной операции, мин;  $k$  – коэффициент выполнения норм в процессе сборки;  $\Phi_D$  – годовой фонд времени

производства, ч. Значения  $k_c \leq 1$  показатель соответствует массовому производству,  $k_c = 1$  – серийному производству,  $k_c > 1$  – единичного производства. Аддитивные технологии применимо к серийному и единичному производству корпусных элементов РЭА.

Оценка результативности применения аддитивного производства корпусных элементов РЭА [19].

Таблица 1.13 – Стратификация свойств полимеров

Виты полимерных нитей	Признаки														
	Механические свойства						Термические свойства			Физические свойства					
Показатели	Прочность при растяжении и Мпа	Прочность при изгибе Мпа	Модуль упругости Мпа	Ударная вязкость по Иоду 1/4" (надрезом) Дж/м	Ударная вязкость по Иоду 1/8" (надрезом) Дж/м	Твердость по Роквеллу R-шкала	Температура начала деформации при 1,82 Мпа в С	Температура размягчения по Вика при 5 кг/см <sup>2</sup> в С	Плотность при 23 С в г/см <sup>3</sup>	Показатель текучести расплава при 220 С в 10 мин в г.	Усадка при 23 С в %	Степень стойкости к горению в НВ	Масовая доля воды, не более	Блеск в %	Масовая доля летучих веществ менее
ABS типовой	45	64	2200	97	215	105	85	95	1,05	30	0,4	1	0,1	11	0,1
ASA WR-9100	47	66	2300	98	226	107	89	97	1,08	35	0,4	1	0,1	10	0,1
ASA WR-9120	44	61	2000	98	314	102	87	96	1,07	23	0,4	1	0,1	10	0,1
ASA WR-9160	37	53	1600	98	588	90	80	91	1,08	4	0,4	1	0,1	10	0,1
ASA WR-9730	44	61	1900	98	539	100	86	97	1,08	5	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС EG-0763	40	58	2000	343	490	100	85	96	1,04	12,8	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС ES-0163	40	58	2100	333	471	99	90	100	1,04	6	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС HF-0660I	43	61	2200	196	472	106	85	97	1,04	38,4	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС HF-0680	41	62	2300	216	275	106	85	97	1,04	52,8	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС HG-0760	44	65	2300	216	265	106	86	98	1,04	25	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС HG-0760GP	41	60	2100	235	294	106	85	96	1,04	43	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС HG-0760AT	43	62	2200	196	314	106	84	95	1,08	50	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС MP-0160	44	61	2400	280	370	105	85	97	1,05	18	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС MP-0160R	39	55	2200	280	382	100	86	98	1,05	24	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС MP-0660I	44	65	2400	280	360	105	84	98	1,05	24	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС PT-0170M	44	61	2200	255	300	106	85	87	1,04	16	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС PT-0175	35	53	1800	255	420	96	82	94	1,03	20	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС QHF-0140	43	115	9900	23	38	108	85	97	1,04	31,5	0	1	0,1	11	0,1
АБС QSD-0150	40	115	9800	28	36	105	84	98	1,04	19,5	0	1	0,1	10	0,1
АБС QSD-0170	35	95	7900	42	46	92	84	94	1,02	0,9	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС QSD-0180	30	80	6500	44	55	82	82	89	1,01	0,7	0,4	1	0,2	10	0,1
АБС SD-0150	47	69	2200	235	294	107	88	100	1,04	20	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС SD-0160	37	55	2000	333	441	99	86	97	1,04	13	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС SD-0170	34	49	1800	353	461	92	84	95	1,03	10,5	0,4	1	0,3	10	0,1
АБС SV-0167	39	56	2000	333	461	100	89	99	1,03	3,7	0,4	1	0,1	10	0,1
АБС 2020-31	49	63	2500	390	620	130	92	109	1,2	14	0,5	1,9	0,28	20	0,1
АБС 2020-60	29,4	56	2000	333	402	100	89	80	1,03	6	0	1	0,3	10	0,1

Для проведения оценки значимости различных характеристик полимеров проведена оценка значимости характеристик композиционных материалов, полимеров в процессной матрице (табл. 1.13). Построенная сетка позволяет связать технологический процесс производства сообразно производству компонентов с требуемыми параметрами к изделию. При построении матрицы оценка значимости в процессной матрице в качестве ключевых параметров рассмотрены последующие физико-механические характеристики полимерной нити выставленные в (табл. 1.14) [20].

Таблица 1.14 – Оценка важности полимеров применяемых в аддитивном производстве

Характеристика полимера	Ранжированная значимость по запросу					Мультипликатор	Накопленный вес в %
	Прочность при растяжении Мпа	Прочность при изгибе Мпа	Модуль упругости Мпа	Температура начала деформации при 1,82 Мпа в °С	Температура размягчения по Вика при 5 кг/см <sup>2</sup> в °С		
АБС-пластик HG-0760GP	2	5	8	6	10	4800	3,18928401
ASA-пластик WR-9100	10	10	10	4	3	12000	7,97321001
АБС-пластик SV-0167	9	7	9	1	4	2268	1,50693669
ASA-пластик WR-9120	6	7	4	8	4	5376	3,57199809
АБС-пластик SD-0160	5	8	9	4	7	10080	6,69749641
ASA-пластик WR-9160	9	10	5	6	9	24300	16,1457503
АБС-пластик HG-0760	10	10	9	10	8	72000	47,8392601
АБС-пластик HG-0760AT	3	8	9	7	10	15120	10,0462446
АБС-пластик SD-0170	1	2	10	6	8	960	0,6378568
АБС-OM-2020-30	10	6	10	2	3	3600	2,391963
Суммарное значение показателя						150504	100

Аппарат «процессная матрица» даёт возможность задать завышенные требования к ряду характеристик, которые наиболее необходимы для корпусного элемента РЭА и снизить требования к остальным менее важным характеристикам, которые являются второстепенными и не несут функциональную нагрузку в готовом изделии. Употребительно к исследуемому образцу возможно рассмотреть варианты комбинирования параметров полимеров. Сопоставление полимеров позволит добиться нужного значения свойств композиционного материала.

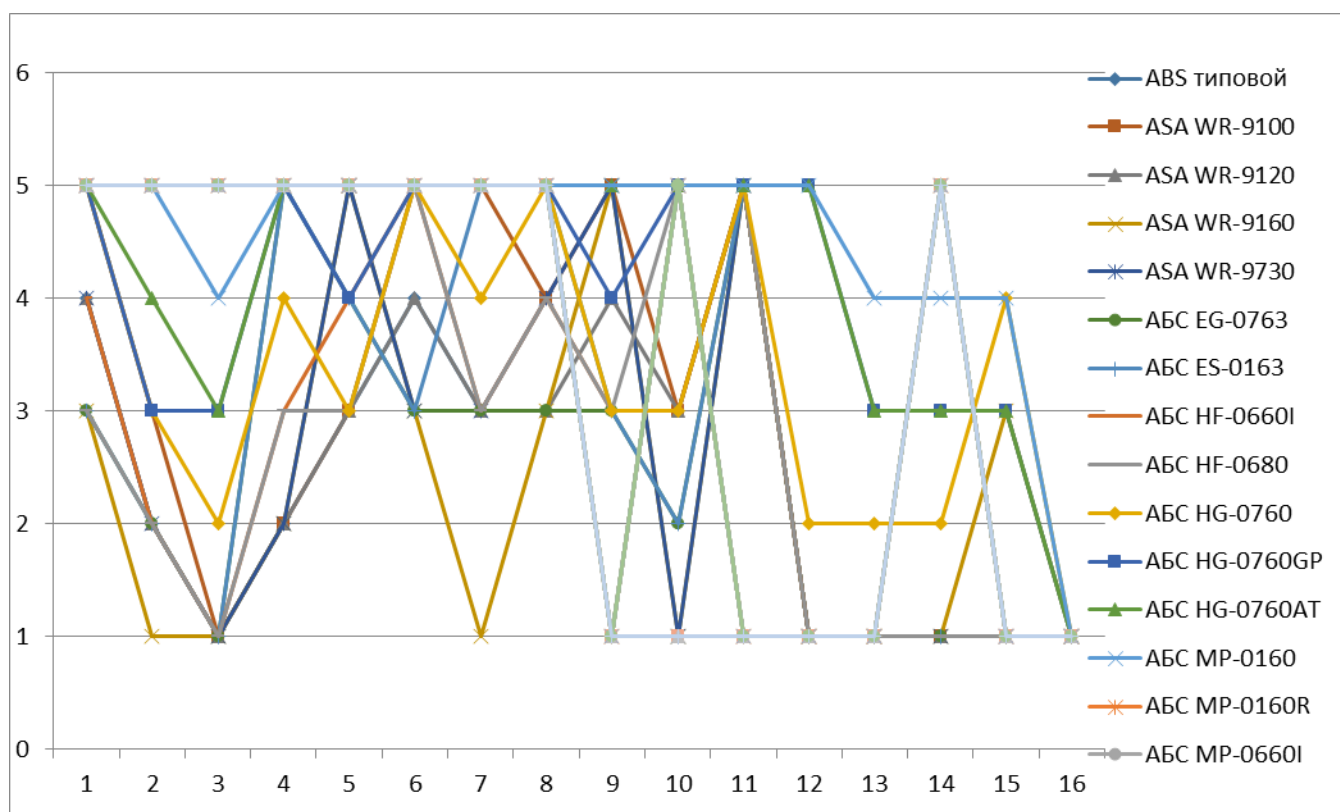


Рисунок 1.23 – Сравнение полимеров по признакам для производства корпуса РЭА

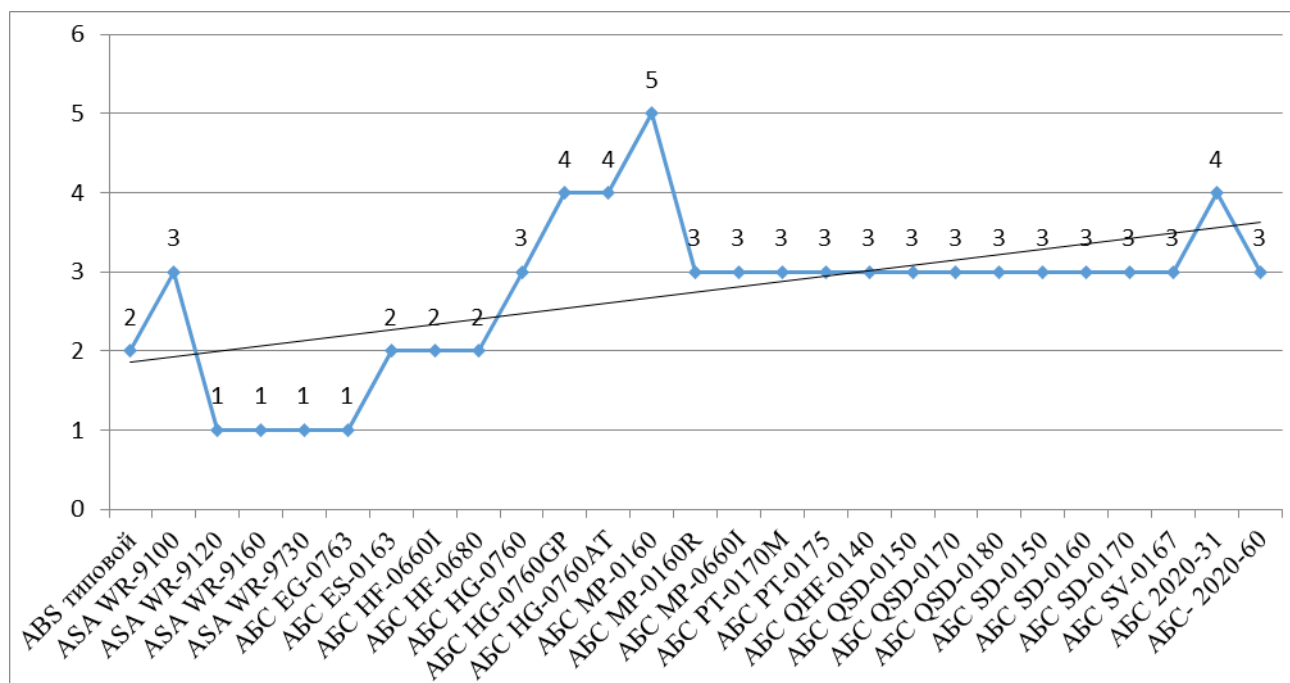


Рисунок 1.24 – Оценка полимеров для производства корпуса РЭА

При использовании аддитивных технологий использовался расчёт КИМ. Процесс создания корпуса РЭА показан на рис. 1.25, цифровой макет рис. 1.26..



Рисунок 1.25 – Диаграмма процесса создания корпуса РЭА на основе аддитивных технологий

Создаётся трёхмерная модель корпуса в среде трехмерного моделирования КОМПАС-3D и сохраняется в формате 3D-моделей (STL, plg). Преобразуется в цифровой прототип на рис. 1.27-1.28.

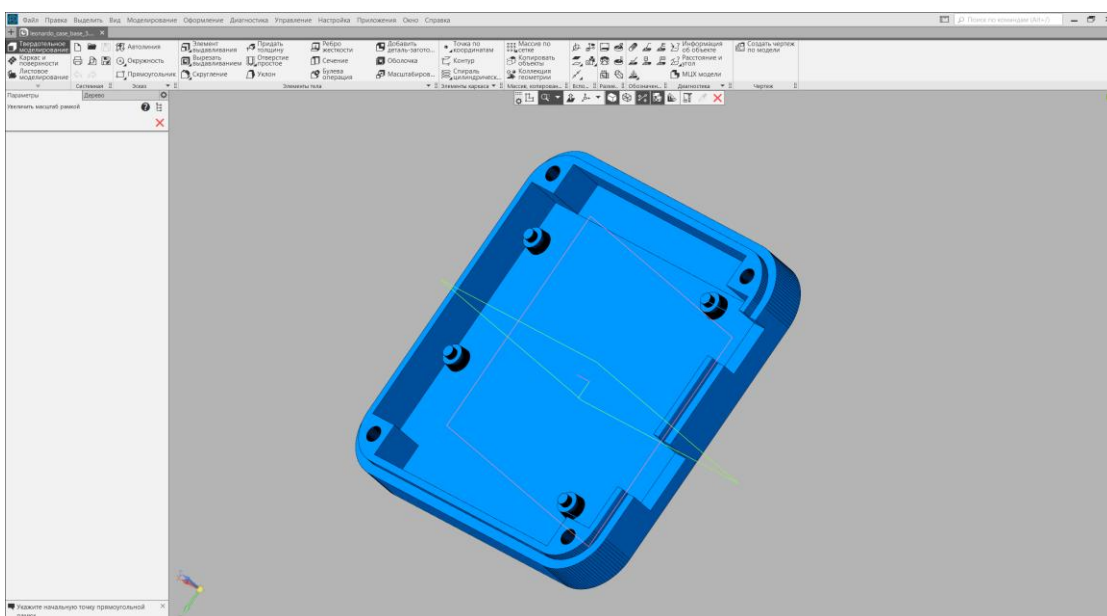


Рисунок 1.26 – Разработка и размещение модели корпуса РЭА



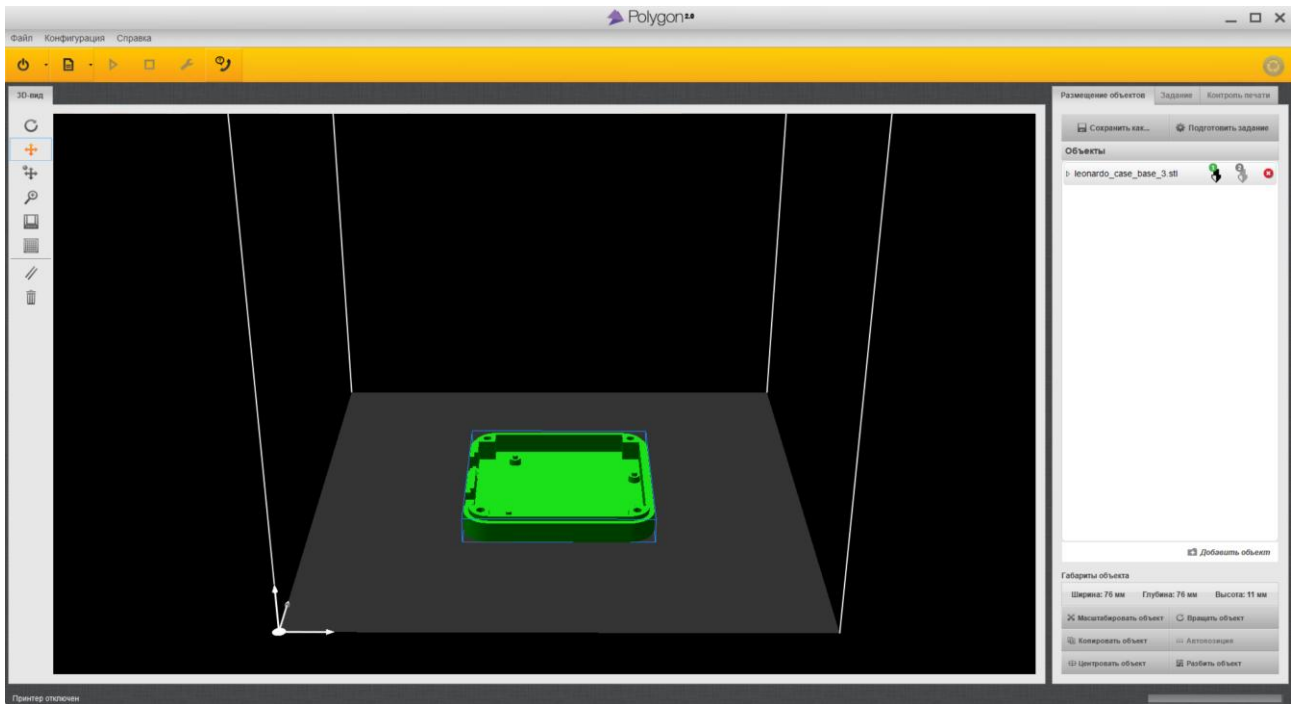


Рисунок 1.27 – Разработка и размещение модели корпуса РЭА

Для обеспечения качества процесса послойного синтеза необходимо учитывать параметры и устройство установки, качество цифрового прототипа и используемого материала.

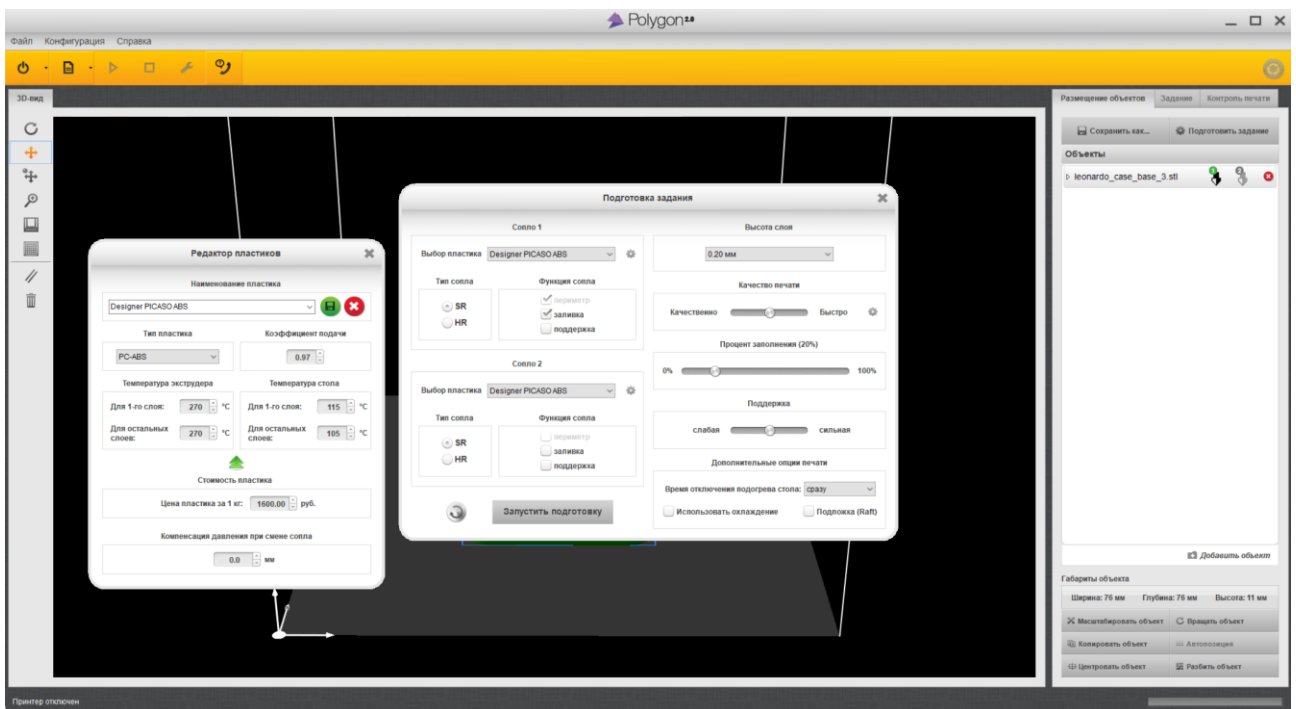


Рисунок 1.28 – Составление задания объекта печати

Припуски и допуски в аддитивном процессе закладываются в цифровой прототип.

Для статистического управления процессом производства корпусов РЭА требуется проводить измерение и мониторинг на постоянной основе его отклонений, на основании этих данных принимается решение о необходимости и обоснованности принятия соответствующих мер.

Физико-механические свойства полимеров приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Показатели качества технологического процесса производства корпусов РЭА:

1. Показатели качества, относящиеся к выходам процесса производства.
2. Показатели качества, относящиеся к управляемым параметрам.
3. Показатели качества, относящиеся к затратам на реализацию процесса

рис. 1.29.

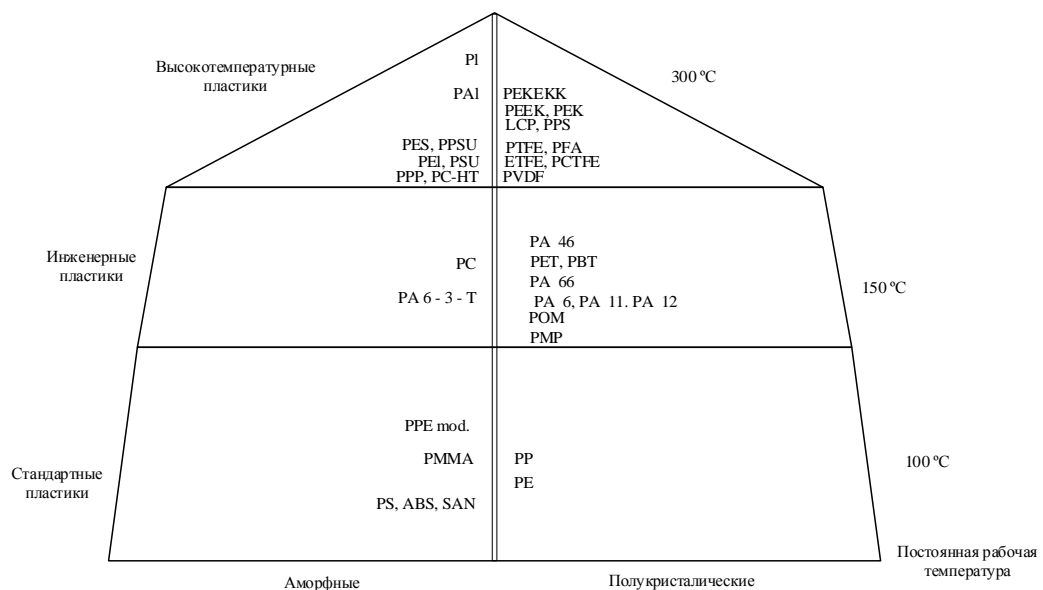


Рисунок 1.29 – Показатели полимеров

Также необходимо отметить разделение показателей качества на непрерывные и дискретные (качественные) показатели, которые используются, а аддитивном производстве. Несмотря на то, что управление технологическим процессом может базироваться на показателях качества обоих видов, применение количественных показателей качества предпочтительнее, что позволяет

использовать развёртывание функций качества для анализа требований к конструктивным элементам РЭА.

#### **1.4 Разработка способа производства корпусных элементов РЭА на основе комбинированной аддитивной технологии**

Для серийного производства корпуса по классическим технологиям с помощью прессования или с помощью литья в пресс-форму требуется технологическая подготовка производства и дополнительные расходы, для мелкосерийного производства перспективным является использование аддитивных технологий, не требующих дополнительного технологического оснащения, например пресс-форм и литьевых форм (рис. 1.30).

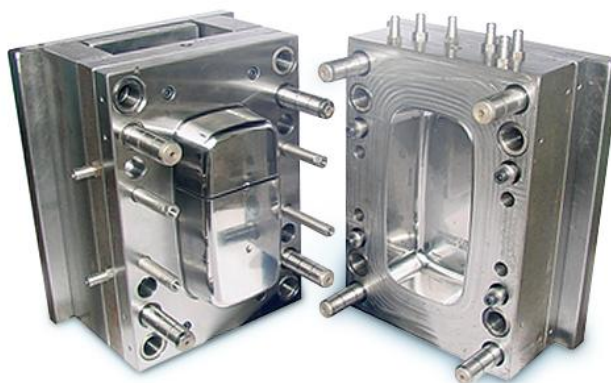


Рисунок 1.30 – Пресс-формы, применяемые в производстве корпусных элементов

Применение аддитивных технологий направлено на создание технологии производства корпусов РЭА с высокими эксплуатационными показателями и защитой от негативного воздействия внешней среды.

При выборе аддитивной технологии необходимо учитывать следующие характеристики установок и применяемых материалов.

Скорость печати:

Технологии производственной печати предлагают:

- средства автоматизации;

– подготовки к печати, но при этом они еще включают дополнительные средства редактирования, с помощью которых оператор может оптимизировать:

- а) размещение и ориентацию детали;
- б) изготовление поддерживающих структур;
- в) толщину слоев;
- г) параметры изготовления с учетом особенностей материала;
- д) время изготовления;
- е) статистическое управление процессом, что особенно важно для производственных применений.

Скорость печати можно охарактеризовать как время, необходимое для печати 1 кубического сантиметра.

Данный метод обычно предпочтителен для 3D-принтеров, вертикальная скорость которых стабильна, независимо от геометрической формы изготавливаемых деталей и/или количества деталей, изготавливаемых за одно задание печати. 3D-принтеры с повышенной вертикальной скоростью печати и небольшой либо нулевой потерей скорости в связи с геометрической формой или количеством деталей в задании печати идеально подходят для изготовления концептуальных моделей, подготовки к серийному производству и цифрового изготовления, так как обеспечивают быстрое производство большого количества деталей в кратчайший срок.

Еще одним методом оценки скорости печати является время, необходимое для печати определенной детали или печати объема определенной детали. Этот метод часто применяется для технологий, в которых быстро печатаются одиночные детали простой геометрической формы, при том, что их скорость снижается при добавлении деталей в задание печати и при повышении сложности формы и/или увеличении размера детали. Получаемое в результате этого снижение скорости печати может замедлить процесс принятия решений и лишить смысла саму идею приобретения внутрифирменного 3D-принтера для изготовления концептуальных моделей или производства.

Стоимость изготовления детали:

Стоимость изготовления детали обычно выражается как себестоимость в расчете на единицу объема, например, стоимость кубического дюйма или стоимость кубического сантиметра. Стоимость отдельных деталей может различаться значительно даже при их изготовлении на одном принтере, и зависит от геометрической формы конкретной детали. Поэтому необходимо понимать, что заявленная продавцом стоимость изготовления детали относится к определенной детали или «типовой» детали, представляющей некую усредненную деталь из группы различных деталей. Чтобы определить, какую стоимость детали следует ожидать, часто помогает расчет стоимости детали на основе набора файлов STL, представляющих характерные детали, с которыми производитель имеет дело.

На стоимость детали влияет общее количество материала, расходуемого 3D-принтером на изготовление определенного набора деталей, и цена использованного материала. Самыми низкими стоимостями деталей характеризуются порошковые технологии 3D-печати. В качестве базового модельного материала, из которого выполняется основная часть детали, может использоваться недорогой гипсовый порошок. Неиспользованный порошок постоянно рециклируется в принтере и используется повторно, в результате чего стоимость изготовления детали может составлять от трети до половины стоимости детали в других технологиях 3D-печати.

Разрешение по элементам:

Одним из наиболее спорных показателей, указываемых для 3D-принтеров, является разрешение, и его следует интерпретировать с осторожностью. Разрешение может выражаться в точках на дюйм - Dots Per Inch (DPI), в толщине слоя Z, размере пикселя, диаметре пятна луча, диаметре капли и т.д. Если эти параметры могут быть полезны при сравнении разрешения однотипных 3D-принтеров, они обычно не применимы ко всему спектру технологий 3D-печати.

Точность:

В 3D-печати изготовление детали производится аддитивным методом, слой за слоем, с использованием материалов, которые в результате обработки

переходят из одной формы в другую. Эта обработка может приносить такие переменные, как усадка материала, которую необходимо компенсировать в процессе печати, чтобы гарантировать точность конечной детали.

Свойства материалов:

При выборе 3D-принтера важно понимание планируемых применений продукции печати и необходимых характеристик материала. У каждой технологии есть свои сильные и слабые стороны, которые необходимо принимать в расчет. Необходимо также руководствоваться качеством материала.

Производительность печати:

Начиная с этапа изготовления функциональных прототипов для испытания функционирования изделия в реальных условиях очень важно печатать полноразмерные детали. Поэтому ключевым фактором для печати полноразмерных деталей является строительный объем. Печать нескольких итераций одной детали за один раз может также быть полезно для сокращения времени цикла разработки изделия и повысить качество продукции путем испытания большего числа проектных вариантов [16].

Исходя из приведенного анализа, следует, что на качество изделий аддитивного производства огромное влияние оказывают технические характеристики, которыми обладают установки аддитивного производства. Таким образом для обеспечения качества аддитивного производства возможно планирование качества перед непосредственным производством благодаря превентивному оцениванию уровня качества соответствующих установок послойного синтеза, которыми располагает производитель.

Таблица 1.16 – Технические требования, предъявляемые к корпусу РЭА на основе МПН

Показатели полимера для аддитивного производства	Значение характеристики	Послойное наплавление
Абсолютная остаточная деформация полимера	1,9	0,9
Изменение линейных размеров, %, не более полимера	2,0	1,0
Истираемость полимера, мм, не более	1,2	1
Деформативность полимера, мм, не более	0,5	0,4
Поверхностная плотность полимера, г/м <sup>2</sup> , не более	1400	1200
Абсолютная деформация полимера	3,2	3

Предложенный способ производства корпусов РЭА на основе комбинированной МПН технологии относится к производству компонентов РЭА и может быть использован в качестве заменителя стандартных пресс-форм в мелкосерийном производстве корпусов РЭА.

Способ производства корпусных элементов РЭА характеризуется тем, что внешний корпус производится на основе ABS-M30, а внутренние элементы крепления аппаратуры из ABS-ESD7. Пропорции варьируются в пределах: 15–35 % акрилонитрила, 5–30 % бутадиена и 40–60 % стирола.

Способ характеризуется тем, что внешний корпус, составляет 80 % массы конструктивного элемента и 20 % внутренние элементы креплений, что обеспечивает электрозащиту компонентов.

Данный способ предполагает использование 3D сканера для создания точной 3D модели изделия для которого требуется корпус.

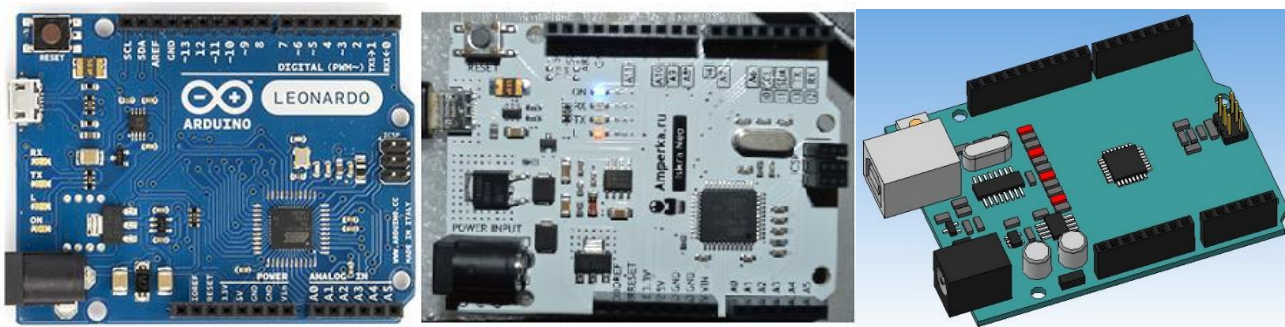


Рисунок 1.31 – Проектирование корпусов для РЭА

При комбинировании ABS-M30 и ABS-ESD7, обладающих антистатическими свойствами, обеспечивается механическая стойкость и электростатическая защита компонентов РЭА. Корпус РЭА, отличающийся тем, что создаётся на основе МПН технологии с применением комбинированного способа печати в соотношении соответственно 80 % и 20 %. Корпус РЭА, отличающийся тем, что создаётся без использования пресс форм и сглаживаются поверхности с помощью ацетоновой бани.

Предложена архитектура система автоматизированного проектирования изделия (рис. 1.32), позволяет реализовать сквозной цикл проектирования и

изготовления объекта, начиная с этапа построения цифрового прототипа STL файл модели объекта, заканчивая имитационным моделированием испытаний сложного готового продукта рис. 1.32.

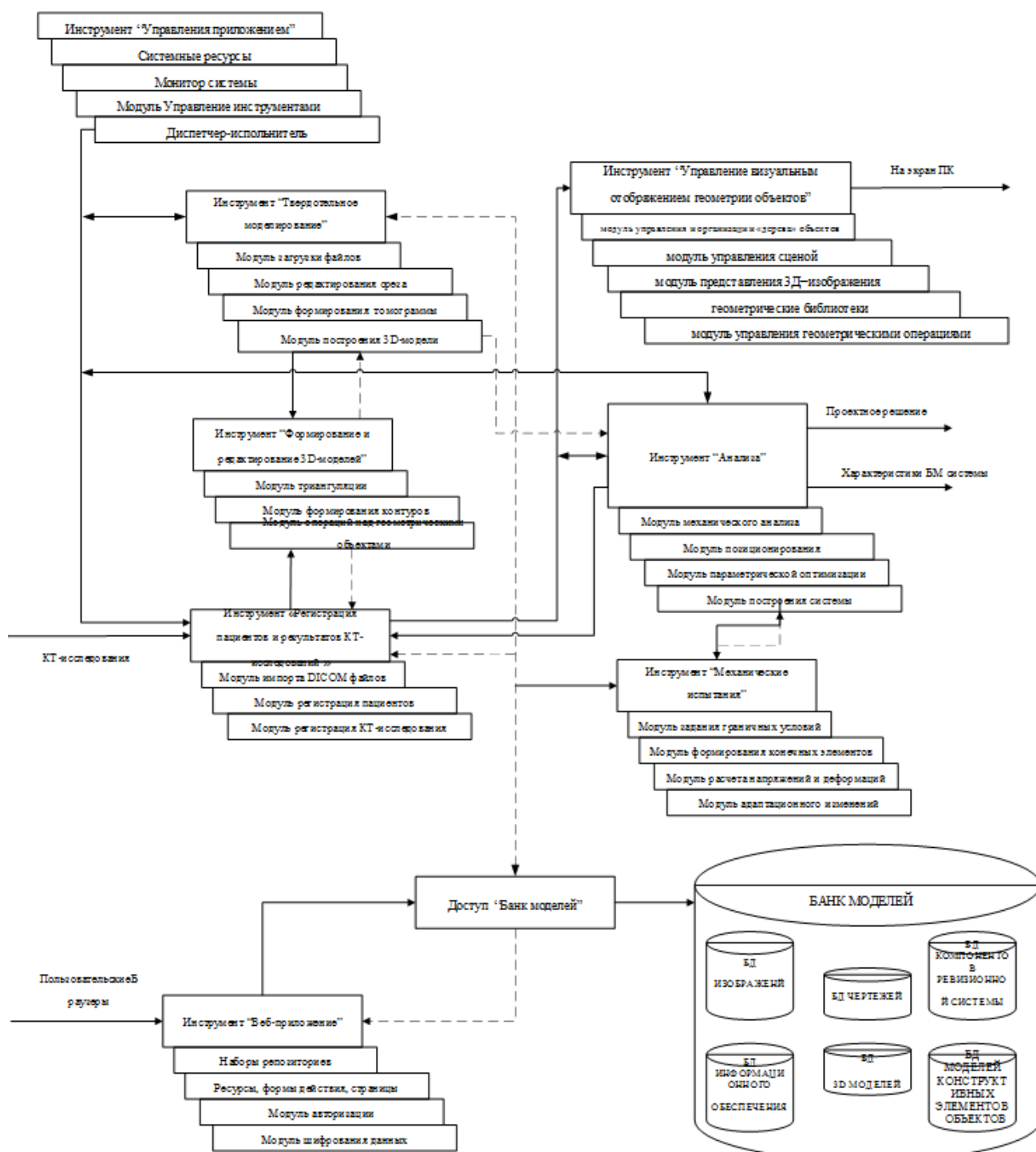


Рисунок 1.32 – Инструментальные средства САПР, применяемые в аддитивных технологиях при производстве корпусных элементов

Этапы изготовления партии корпусных элементов для РЭА:



1. Поступление технического задания на разработку и изготовление корпуса для РЭА – «Необходимо спроектировать корпус для модема и изготовить партию размером 30 шт. Корпус состоит из четырёх элементов, материал для корпуса жёсткий и прочный.

2. Создание технологичной конструкции и проектирование корпуса для РЭА рис. 1.33;

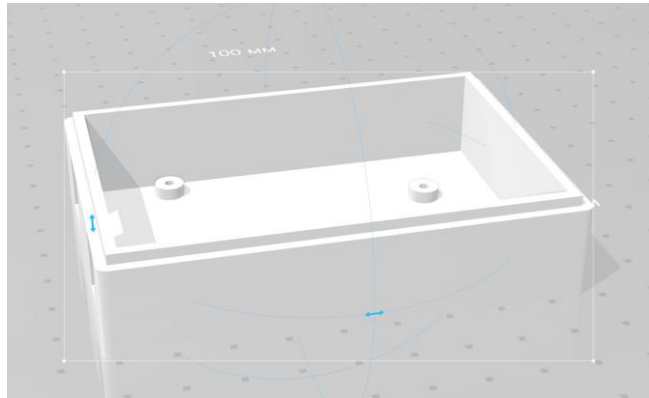


Рисунок 1.33 – Проектирование корпусов для РЭА

3. Запуск процесса печати корпуса с использованием технологии производства корпусов РЭА на основе комбинированной МПН технологии.

4. Очистка корпуса для РЭА рис. 1.34.



Рисунок 1.34 – Готовый корпус РЭА и прототипированная компонентная база РЭА

Применение данной технологии позволяет повысить качество корпусных элементов РЭА в условиях мелкосерийного производства.

Несколько моделей в одном STL файле, соединенные детали или деталь в детали – не допускается. При создании 3D моделей для печати пластиком на принтере нужно учитывать, что принтер выстроит структуры поддержки, которые необходимо будет удалять вручную рис. 1.35.

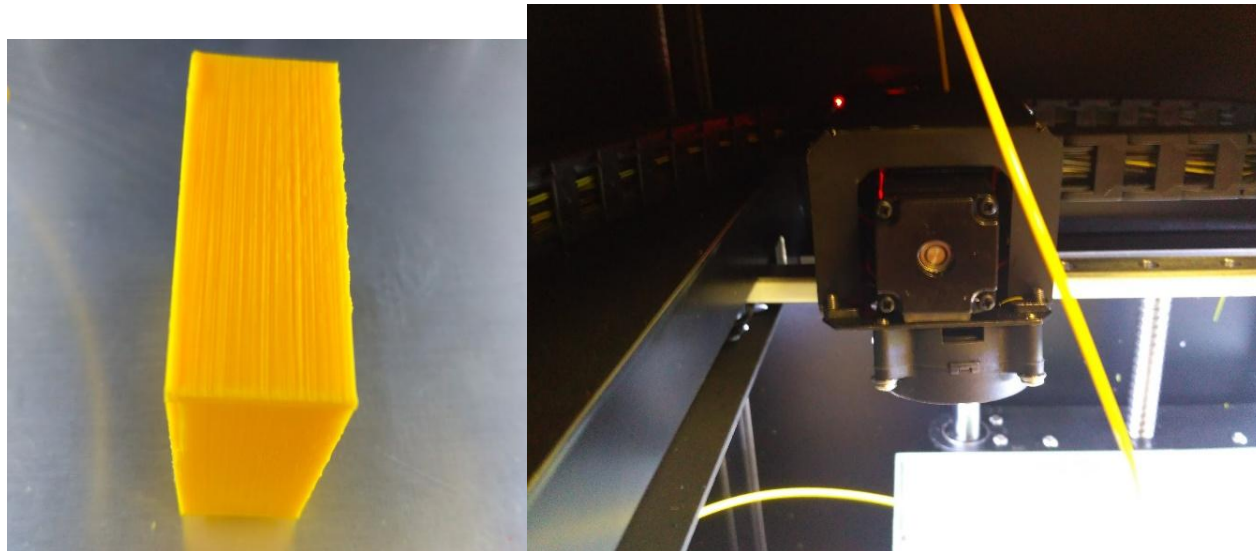


Рисунок 1.35 – Производство корпуса РЭА

Перечень свойств полимеров представлен в ПРИЛОЖЕНИИ Б.

Таблица 1.18 – Качественные показатели МПН технологии:

Характеристика	Показатель
Материал	На 25-70 % прочнее, чем стандартный ABS-пластик. Более эластичен, удароустойчив, обладает высокой прочностью на изгиб. Лучшее сцепление слоев для получения более долговечных деталей. Многофункциональный материал: подходит для формования, функционального применения. Температура деформации: 96 С. Предел прочности на разрыв: 36 МПа. Удлинение при растяжении: 4.0 %. Напряжение при изгибе: 61 МПа. Ударная прочность по Изоду: 139 Дж/м. Цвет пластика: белый, бежевый, черный, серый, красный, синий.
ABS-ESD7	
ABSi	
ABS-M30	
ABS-M30i	
ABSplus-P430	
PC	Наиболее распространенный в использовании промышленный термопластик. Надежный и прочный. Обладает отличными механическими и термостойкими качествами. Высокая эластичность и способность к обработке

	высокими температурами. Температура деформации: 138 С. Предел прочности на разрыв: 68 МПа. Удлинение при растяжении: 4.8 %. Напряжение при изгибе: 104 МПа. Ударная прочность по Изоду: 53 Дж/м. Цвет пластика: белый.
PC-ABS	PC (поликарбонат) Наиболее распространенный в использовании промышленный термопластик. Надежный и прочный. Обладает отличными механическими и термостойкими качествами. Высокая эластичность и способность к обработке высокими температурами. Температура деформации: 138 С. Предел прочности на разрыв: 68 МПа. Удлинение при растяжении: 4.8 %. Напряжение при изгибе: 104 МПа. Ударная прочность по Изоду: 53 Дж/м. Цвет пластика: белый.
PC-ABS	
PC-ISO	
PPSF	МПН Nylon 12-это тот же самый жесткий нейлон который популярен в традиционном производстве, за его превосходное соотношение цены и качества. Используется для производства ответственных деталей прототипов (3D моделей), где требуется высокое сопротивление усталости, обеспечивая на 100-300% лучшее относительное удлинение при разрыве. Температура деформации: 97 С. Предел прочности на разрыв: 53 МПа. Удлинение при растяжении: 9.5 % Напряжение при изгибе: 68.95 МПа. Ударная прочность по Изоду: 200 Дж/м. Цвет пластика: черный.
ULTEM 9085	
NYLON 12	
Температура деформации	190
Предел прочности на разрыв	36 МПа.
Удлинение при растяжении	4.0 %.
Напряжение при изгибе	61 МПа.
Ударная прочность по Изоду:	139 Дж/м.
Цвет пластика:	Заданный
Технология печати:Моделирование методом наплавления (МПН /FFF)	Технология печати:Моделирование методом наплавления (МПН /FFF)
Количество печатающих головок:1	Количество печатающих головок:1
Диаметр сопла (мм):0.15/0.3	Диаметр сопла (мм):0.15/0.3
Область построения, мм:200x200x210	Область построения, мм:200x200x210
Толщина слоя (мм):0,05	Толщина слоя (мм):0,05
Скорость печати:30 см <sup>3</sup> /час	Скорость печати:30 см <sup>3</sup> /час

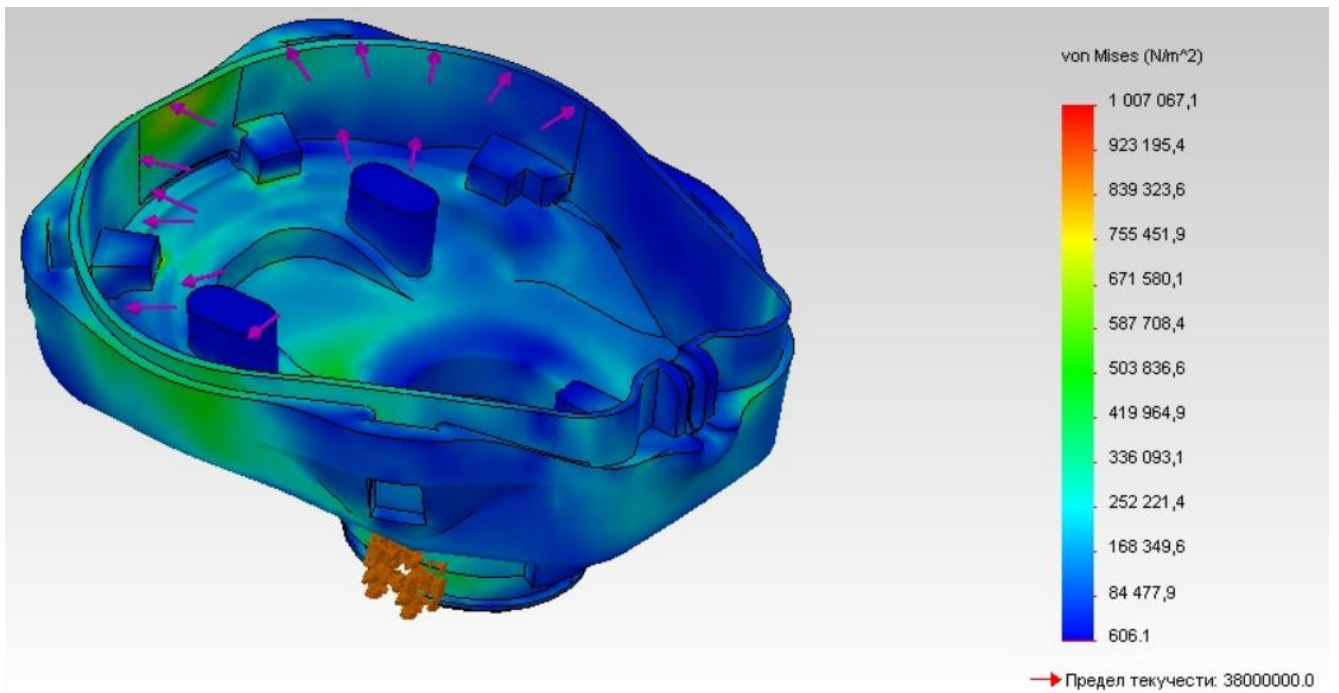


Рисунок 1.36 – Расчёт напряжений поверхности корпуса на основе МПН в САПР «САТІА» выполненного по аддитивной технологии

Ввиду комбинирования ABS-M30 и ABS-ESD7 обладающий антистатическими свойствами, обеспечивается механическая стойкость и электростатическая защита компонентов РЭА. Корпус РЭА, отличающийся тем, что создаётся на основе МПН технологии с применением комбинированного способа печати в соотношении соответственно 70 % и 30 %. Корпус РЭА, отличающийся тем, что создаётся без использования пресс форм и сглаживаются поверхности с помощью ацетоновой бани.

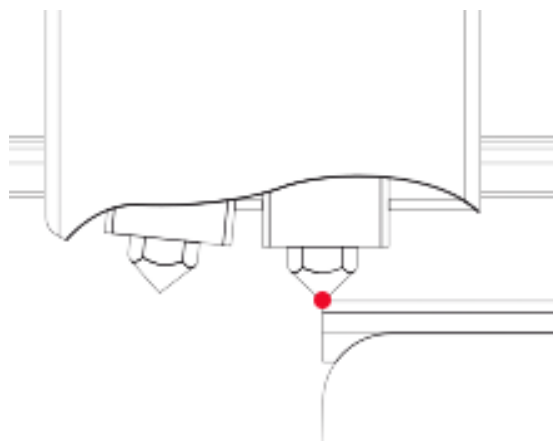


Рисунок 1.37 – Пример переключения экструдера аддитивной установки

Применение данной технологии позволяет повысить качество корпусных элементов РЭА в условиях мелкосерийного производства.

Процесс разработки корпуса РЭА с применением аддитивных технологий представлен на рис. 1.38.

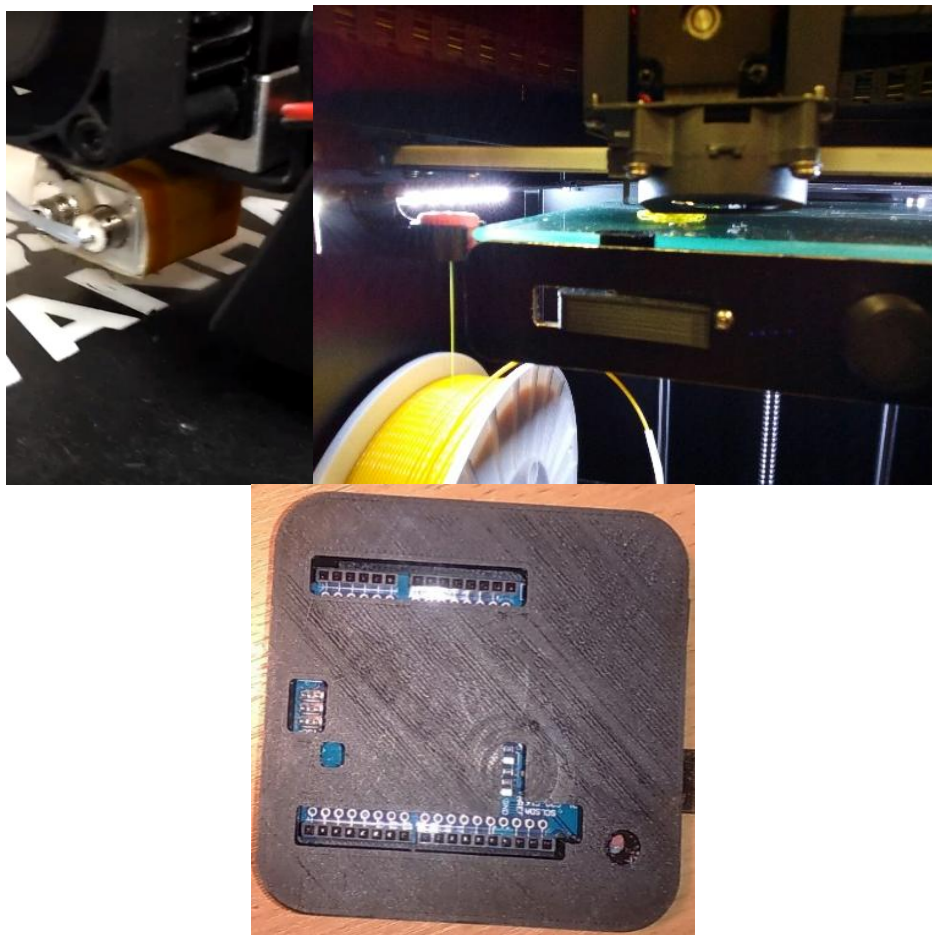


Рисунок 1.38 – Процесс разработки корпуса РЭА с использованием аддитивного производства



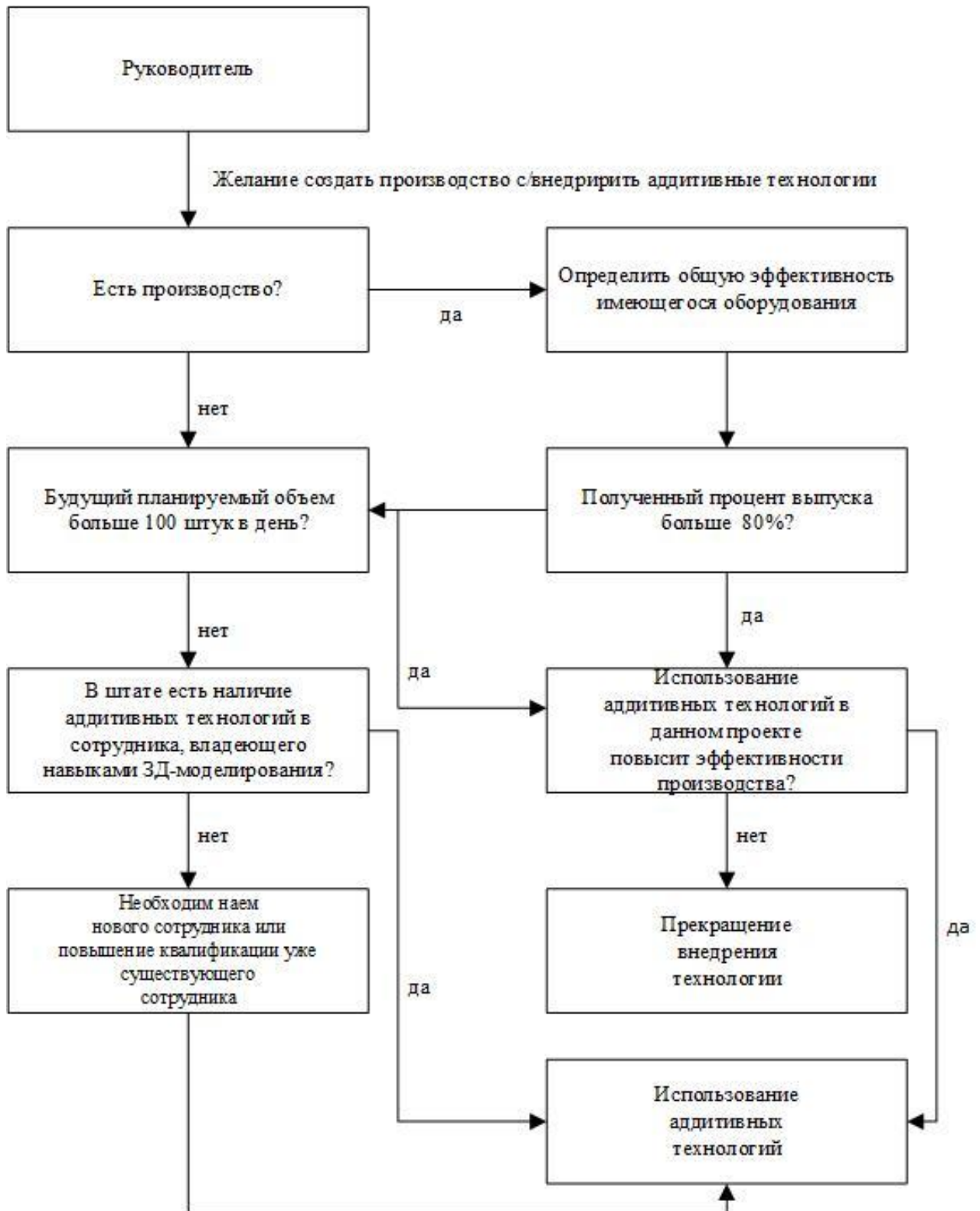


Рисунок 1.39 – Алгоритм использования аддитивных технологий

Аддитивные технологии могут обеспечить качество выпускаемой продукции не только на единичном производстве, необходимо отметить, что на

мелкосерийном предприятии, где объем выпуска продукции меньше 100 штук в день, повышение эффективности будет возможно.

### **1.5 Разработка и исследование модели состояния и динамики функционирования корпусных элементов РЭА в условиях внешних температурных воздействий**

Многочисленные исследования причин и условий возникновения повреждений частей систем демонстрируют характеризующую роль технологической и эксплуатационной дефектности в понижении характеристик прочности конечного изделия. В взаимосвязи с этим расчеты прочности, проводимые с учетом практического значения дефектности, считаются необходимыми для обеспечения необходимого комплекса эксплуатационных черт и для дальнейшего использования в оценке рисков аддитивного производства.

Расчёты произведены в среде компьютерной математики MATLAB Toolbox.

Описание: эта программа вычисляет механические свойства и участки кривых растяжения для тонкостенных полимерных конструкций при повышенных температурах. Она будет записывать данные в Excel-файлы, которые использованы для ввода в программах FE, таких как Abaqus Unified FEA. Входными данными для Abaqus является информация о пластической деформации и данные об участках номинальных напряжений.

- Входы: модуль упругости, предел текучести на основе.
- Выходы: номинальные напряжения – кривые деформации при повышенной температуре, истинное напряжение – пластическая деформация для использования в Abaqus рис. 1.40.

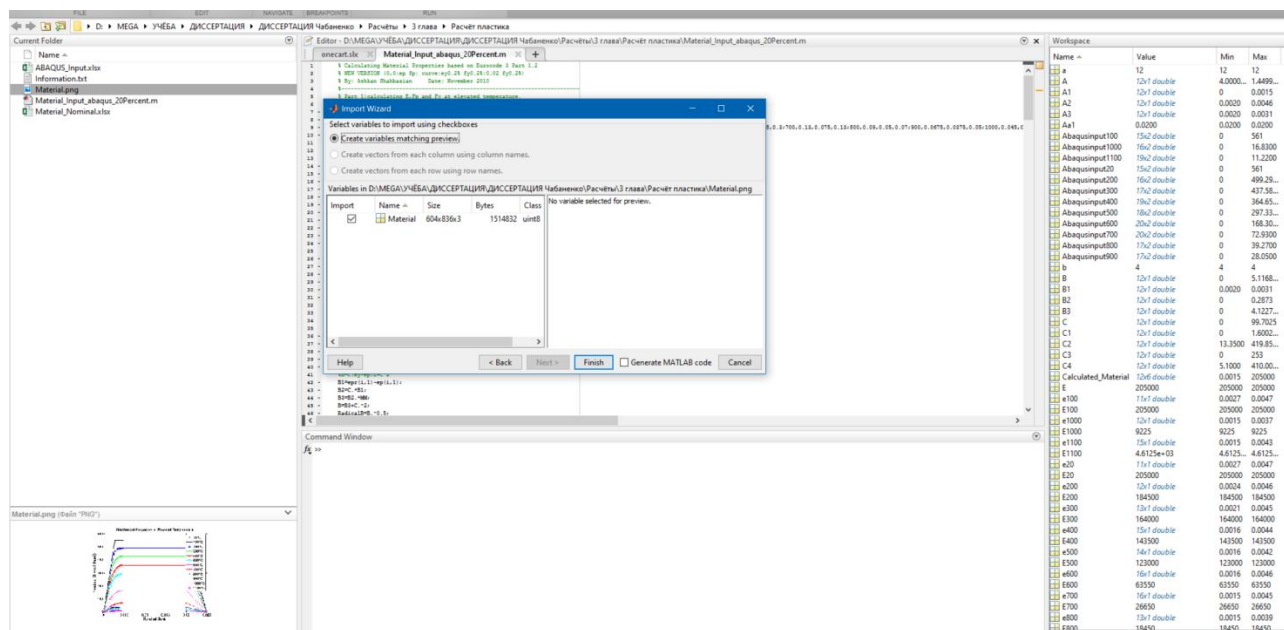


Рисунок 1.40 – Рабочее окно расчёта физико-механических свойств

На основе проведённых расчётов построена база данных которая содержит основные технологические операции производственного процесса изготовления, монтажа (наладки), испытаний и контроля качества устройств мониторинга мобильных объектов в условиях цифрового производства. Для обеспечения качества последовательность технологических процессов описана в виде математических моделей табл. 1.20.

С помощью базы данных облегчается поиск и выбор необходимых средств проектирования производства и полимеров для поэтапной разработки электронной продукции. База данных обеспечивает повышения результативности производственного процесса изготовления изделий электроники.



Таблица 1.20 – Физико-механические показатели корпуса РЭА произведённого по МПН технологии

Номинальная деформация	Номинальное напряжение	Истинный стресс	Пластическая деформация
0	0	0	0
0,001490515	6,875	0	0
0,001490515	6,875	6,88524729	0
0,001690515	7,670735157	7,68370265	2,32442E-05
0,001890515	8,291720388	8,30739601	8,76687E-05
0,002090515	8,800196974	8,81859392	0,000176443
0,002290515	9,226419355	9,24755261	0,000283006
0,002490515	9,58779932	9,61167788	0,000403586
0,002690515	9,895405251	9,92202899	0,000535785
0,002890515	10,15673953	10,1860977	0,000677977
0,003090515	10,37710904	10,4091796	0,000829016
0,003290515	10,56037173	10,5951208	0,000988068
0,003490515	10,70937317	10,7467544	0,001154518
0,003690515	10,82621516	10,8661695	0,001327913
0,003890515	10,91242661	10,9548816	0,001507924
0,004090515	10,96907377	11,0139429	0,001694325
0,004290515	10,99683031	11,0440124	0,001886971
0,02	11	11,22	0,017370107
0,025	0,1	0,1025	0,02467039

Проведенное моделирование вынужденной эластической неупругой деформации для групп полимеров, происходящий во времени под воздействием напряжений при участии термических флуктуаций, позволяет определить участки номинальных напряжений полимеров при различных температурных режимах для параметрического моделирования режимов формирования послойным синтезом и определения режимов работы оборудования и контроля технологических параметров.

Что позволяет спрогнозировать для каких температурных режимов предназначен корпус РЭА, выполненный из различных композиционных материалов рис. 1.41-1.42.

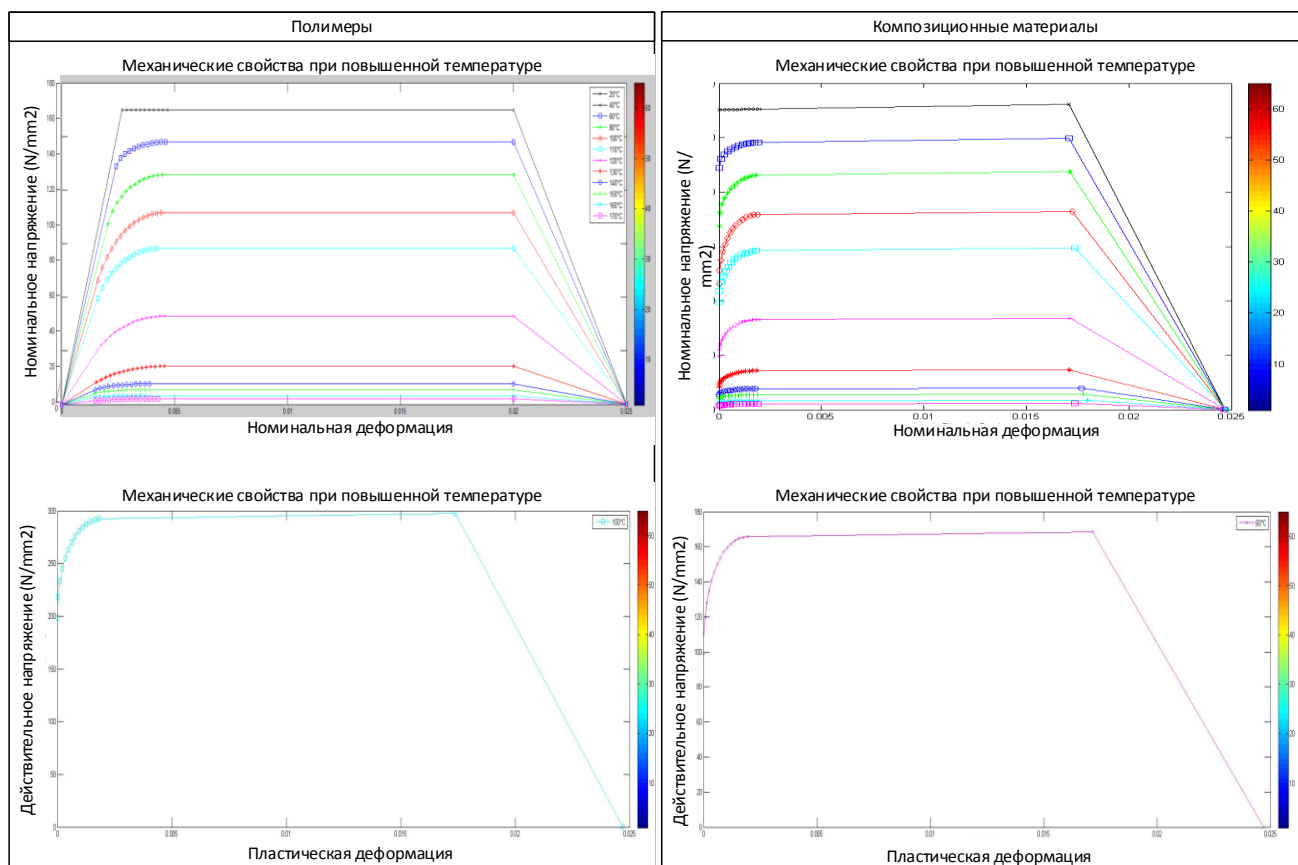


Рисунок 1.41 – Расчёт максимальных нагрузок при различных температурах корпуса РЭА произведённого по МПН технологии

На рис. 1.42 приведена диаграмма Парето, где  $k_{\Pi}$  – коэффициенты параметров, которые были оценены в процессе моделирования различных температурных воздействий.

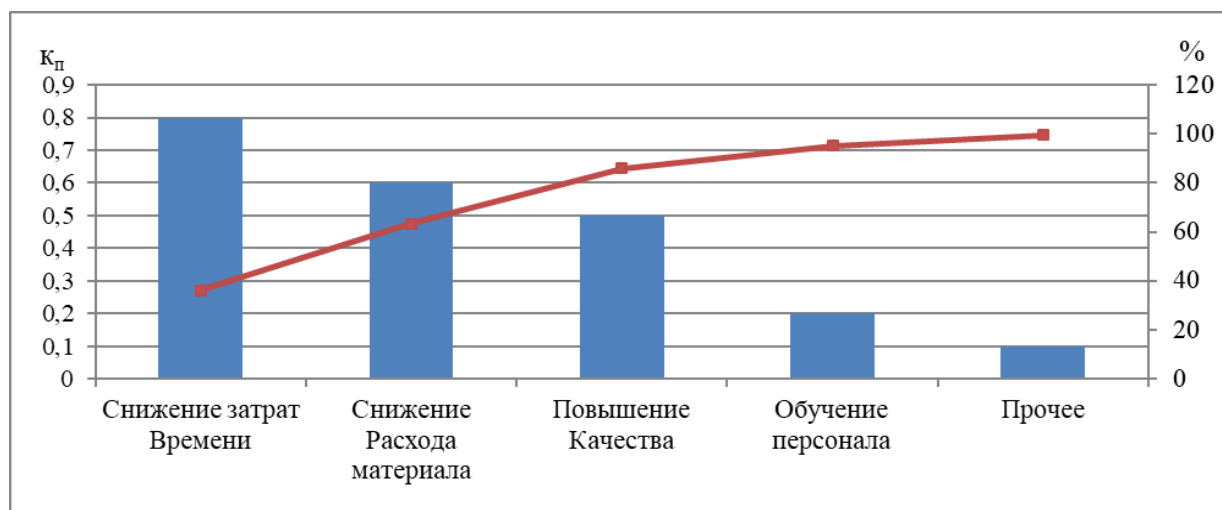


Рисунок 1.42 – Применение диаграммы Парето, где  $k_{\Pi}$  – коэффициент показателя

Один из методов повышения качества корпуса РЭА – это внедрение технологии аддитивного производства. Проведённые расчёты позволят прогнозировать требуемый уровень качества конструктивного элемента РЭА в условиях температурных воздействий.

### **1.6 Параметрическое моделирование метода послойного наплавления корпусных элементов РЭА**

Для проведения параметрического моделирования метода послойного наплавления корпусных элементов РЭА необходимо построение модели, адекватной исследуемому технологическому процессу, что является одним из элементов проведения эксперимента.

Учёт и контроль границ варьирования производится за счёт контроля выбранных показателей требуется реализовывать с учетом предъявляемых требований к установке и контроля каждого воздействующего фактора на процесс аддитивного производства в установленных границах диапазона мониторинга, который должен быть качественно одинаковым на всём участке и находится в границах установленного допуска.

Уровни влияющих выбранных факторов должны быть статистически различимы с учетом допусков и погрешностей.

За центры варьирования применены такие значения параметров, которые наиболее близки к стандартным технологическим режимам печати. В этом случае единый план эксперимента позволяет не только значительно упростить обработку результатов, но и проводить их сравнительный анализ.

В табл.1.21 сведены крайние и средний уровни варьирования факторов.

Таблица 1.21 – Уровни варьирования параметров технологического процесса формования

Уровни	Температура				Давление экструдера			
	T1, °C	tt1, мин	T2, °C	tt2, мин	tp0, мин	P1, МПа	tp1, мин	P2, МПа
+1	190	70	180	240	40	0.5	80	1.0
0	210	50	150	180	30	0.3	60	0.6
-1	230	30	120	120	20	0.1	40	0.2

Для каждого оптимизируемого параметра можно построить свой план; однако, для минимизации количества экспериментов целесообразно выбрать план проведения технологического эксперимента, общий для всего комплекса выходных величин.

Для решения задачи построения ядра необходимо использовать априорную модель и набор генерируемых соотношений, не приводящих к смешиванию линейных слагаемых модели. Каждый набор генерируемых соотношений задает свое ядро плана, сравниваемое с остальными по критерию максимума определителя информационной матрицы.

На основании результатов предварительных экспериментов была построена априорная модель, представленная ниже:

$$\begin{aligned}
 Y = & A_0 + A_1 X_1 + A_3 X_3 + A_4 X_4 + A_5 X_5 + A_6 X_6 + A_7 X_7 + A_8 X_8 + A_9 X_1 X_2 + \\
 & + A_{10} X_1 X_5 + A_{11} X_1 X_6 + A_{12} X_3 X_4 + A_{13} X_3 X_6 + A_{14} X_6 X_7 + A_{15} X_1 X_2 X_3 + \\
 & + A_{16} X_1 X_2 X_4 + A_{17} X_1 X_2 X_5 + A_{18} X_1 X_2 X_8 + A_{19} X_3 X_4 X_5 + A_{20} X_3 X_4 X_8 + \\
 & + A_{21} X_3 X_5 X_8 + A_{22} X_3 X_6 X_7 + A_{23} X_4 X_6 X_7 + A_{24} X_5 X_6 X_7 + A_{25} X_6 X_7 X_8 + \\
 & + A_{26} X_1 X_2 X_6 X_7 + A_{27} X_1^2 + A_{28} X_3^2 X_4 + A_{29} X_4^2 X_3 + A_{30} X_5^2 X_1 + A_{31} X_6^2 X_7
 \end{aligned}$$

Предложенная модель предусматривает практически все вероятные взаимодействия, потенциально действующие на выходные величины, и воздействие входных причин на оптимизируемые характеристики, что считается нужным условием внедрения одного плана эксперимента. Характеризующие пропорции для намерения печати экструдера:

$$\begin{aligned}
 X_1 X_5 X_7 X_8 = X_3 X_5 X_6 = X_2 X_4 X_7 = 1; & X_1 X_4 X_5 X_7 = X_3 X_5 X_6 = X_2 X_7 X_8 = 1; \\
 X_2 X_5 X_7 X_8 = X_3 X_5 X_6 = X_1 X_4 X_7 = 1; & X_2 X_4 X_5 X_7 = X_3 X_5 X_6 = X_1 X_7 X_8 = 1; \\
 X_1 X_5 X_6 X_8 = X_3 X_5 X_7 = X_2 X_4 X_8 = 1; & X_1 X_4 X_5 X_6 = X_3 X_5 X_7 = X_2 X_6 X_8 = 1; \\
 X_2 X_5 X_6 X_8 = X_3 X_5 X_7 = X_1 X_4 X_6 = 1; & X_2 X_4 X_5 X_6 = X_3 X_5 X_7 = X_1 X_6 X_8 = 1; \\
 X_2 X_5 X_6 X_8 = X_2 X_4 X_7 = X_1 X_3 X_5 = 1; & X_2 X_4 X_5 X_6 = X_2 X_7 X_8 = X_1 X_3 X_5 = 1.
 \end{aligned}$$

Сравнение значений определителя информационной матрицы показывает, что первые два набора в списке являются наилучшими. Таким образом, ядро плана эксперимента строится на основе следующих генерирующих соотношений:

$$X_1 = X_5X_7X_8; X_2 = X_4X_7; X_3 = X_5X_6.$$

Дополнительные точки для определения квадратичных эффектов выберем на пересечении осей факторов с гранями гиперкуба. Матрица планирования для проведения экспериментов приведена в (табл. 1.22).

Результаты экспериментов в точках матрицы планирования приведены в (табл. 1.23). Значение отклика получено как среднее арифметическое из трех параллельных опытов, проводимых в каждой точке плана. Максимальный коэффициент вариации во всех экспериментах не превышал 7 %.

Для решения задачи построения регрессионных моделей каждому выходному параметру необходима аппроксимация полученных точек процедурой пошаговой регрессии (процедурой Эффроимсона).

Таблица 1.22 – Построение матрицы плана проводимого эксперимента

Номер точки исследования	X - 1	X - 2	X - 3	X - 4	X - 5	X - 6	X - 7	X - 8
1,0	1	0	1	1	1	1	1	1
2,0	0	1	1	-1	1	1	-1	0
3,0	1	1	0	1	1	1	0	0
4,0	1	-1	-1	-1	-1	0	1	1
5,0	1	1	-1	1	1	-1	1	1
6,0	1	0	1	-1	1	-1	1	1
7,0	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
8,0	0	-1	-1	1	-1	-1	-1	1
9,0	1	1	1	1	1	1	1	1
10,0	-1	1	1	-1	1	1	-1	1
11,0	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
12,0	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
13,0	0	1	-1	1	1	-1	-1	1
14,0	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1
15,0	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1
16,0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1

17,0	1	1	1	1	1	1	1	-1
18,0	1	-1	1	1	1	1	1	-1
19,0	1	1	-1	1	-1	1	1	-1
20,0	0	-1	-1	-1	-1	1	1	-1
21,0	0	1	-1	1	1	-1	1	-1
22,0	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1
23,0	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1
24,0	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
25,0	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
26,0	1	1	1	-1	0	1	-1	-1
27,0	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
28,0	-1	1	-1	-1	0	1	-1	-1
29,0	1	-1	-1	0	1	-1	-1	-1
30,0	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1
31,0	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
32,0	-1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1
33,0	1	0	0	0	0	0	0	0
34,0	0	1	0	0	0	0	0	0
35,0	0	0	1	0	0	0	0	0
36,0	0	0	0	1	0	0	0	0
37,0	0	0	0	0	1	0	0	0
38,0	0	0	0	1	0	1	0	0
39,0	0	0	0	0	0	0	1	0
40,0	0	0	0	0	0	0	0	1
41,0	-1	1	0	0	1	0	0	0
42,0	0	-1	0	0	0	0	0	0
43,0	0	0	-1	0	0	0	0	0

Таблица 1.23 – Анализ механических свойств композиционных материалов

м	E1	E2	$\alpha$	$\sigma_p$	$\tau_c$	°C	$\chi, 1/м$
1	45	64	30	85	85	0,1	0,4
2	47	66	35	89	89	0,1	0,4
3	44	61	23	87	87	0,1	0,4
4	37	53	4	80	80	0,1	0,4
5	44	61	5	86	86	0,1	0,4
6	40	58	12,8	85	85	0,1	0,4
7	40	58	6	90	90	0,1	0,4
8	43	61	38,4	85	85	0,1	0,4
9	41	62	52,8	85	85	0,1	0,4
10	44	65	25	86	86	0,1	0,4
11	41	60	43	85	85	0,1	0,4
12	43	62	50	84	84	0,1	0,4
13	44	61	18	85	85	0,1	0,4
14	39	55	24	86	86	0,1	0,4
15	44	65	24	84	84	0,1	0,4

16	44	61	16	85	85	0,1	0,4
17	35	53	20	82	82	0,1	0,4
18	43	115	31,5	85	85	0,1	0
19	40	115	19,5	84	84	0,1	0
20	35	95	0,9	84	84	0,1	0,4
21	30	80	0,7	82	82	0,1	0,4
22	47	69	20	88	88	0,1	0,4
23	37	55	13	86	86	0,1	0,4
24	34	49	10,5	84	84	0,1	0,4
25	39	56	3,7	89	89	0,1	0,4
26	38	32	7	85	86	0,1	0
27	41,6	22	4	85	84	0,3	0
28	40	12	5	85	89	0,3	0
29	38,2	56	7	89	89	0,28	0
30	49	63	14	92	92	0,28	0,5
31	50	55	45	87	87	0,2	0
32	50	54	22	87	87	0,20.	0
33	50	54	9	87	87	0,20 .	0
34	35,3	54	21	87	87	0,30 .	0
35	35,3	53	30	87	87	0,3	0
36	38,2	53	2	87	87	0,30 .	0
37	38,2	52	4	87	87	0,3	0
38	38,2	52	2	87	87	0,25.	0
39	34,3	51	12	87	87	0,25	0
40	38,2	51	15	87	87	0,3	0
41	29,4	56	6	89	89	0,3	0
42	36,3	51	1	88	88	0,3	0
43	30	50	7	88	88	0,3	0
44	39	50	7	88	88	0,3	1
45	39	49	7	88	88	0,3	1

Проведённое исследование зависимостей параметров от входных факторов проводилось с помощью анализа групп слоёв изделий.

Правильным подбором технологических режимов формования корпусных элементов величину  $\tau_c$  можно увеличить на 14-22 % по сравнению с прочностью на сдвиг, достигаемой при формовании по режимам, базовых установок промышленного образца. На рис. 1.43 представлены зависимости  $\tau_c$  (Т) для полимеров.

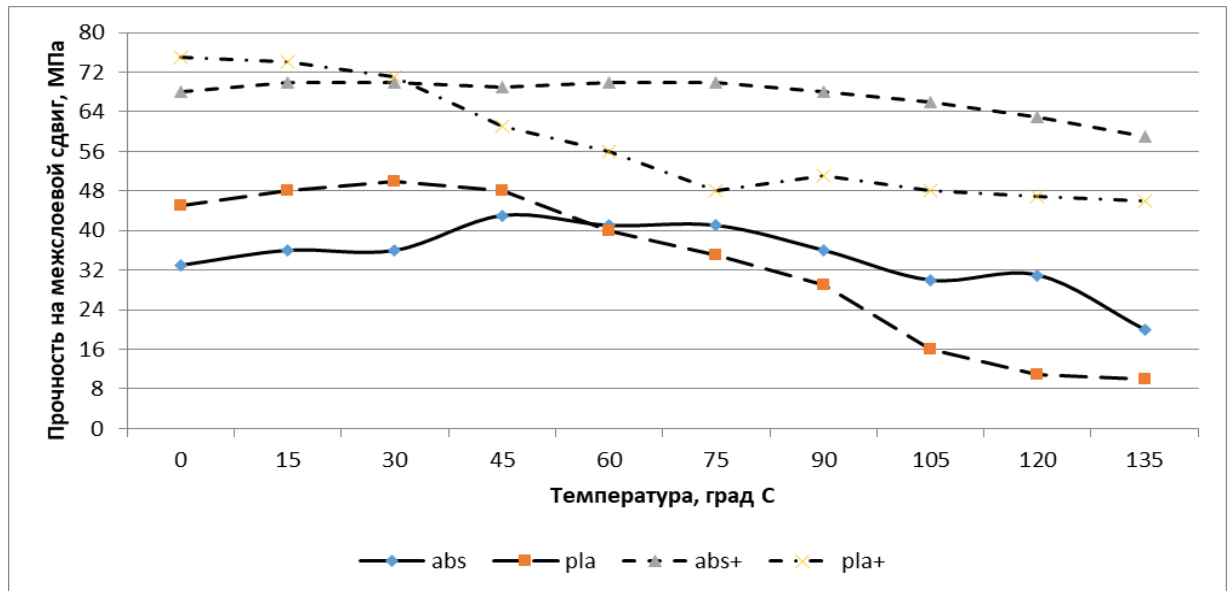


Рисунок 1.43 – Зависимость прочности полимеров ABS на межслоевой сдвиг

В табл. 1.24 приведены оптимальные режимы формования корпусных элементов на основе по отдельным физико-механическим характеристикам, полученным с помощью регрессионных зависимостей.

Для получения необходимого набора свойств полимера нужно учитывать, что поверхность отклика практически всех характеристик полимеров имеет платообразный характер и для полимеров система допусков приведена в табл. 1.24.

Таблица 1.24 – Оптимальные режимы формования корпуса по отдельным физико-механическим характеристикам

Режимы печати/экструзии	$\Psi_B$	$\sigma_p$	$\sigma_{и}$	$\tau_c$	E	$\alpha$	$\chi$	a
$T_1, ^\circ\text{C}$	90,0	70,0	70,0	70,0	90,0	90,0	70,0	80,0
$t_{T1}, \text{мин}$	50,0	60,0	60,0	40,0	50,0	50,0	60,0	40,0
$T_2, ^\circ\text{C}$	170,0	170,0	160,0	150,0	170,0	170,00	140	130,0
$t_{T2}, \text{мин}$	210,0	240,0	230,0	180,0	200,0	160,0	160,0	140,0
$t_{p0}, \text{мин}$	20,0	30,0	30,0	40,0	20,0	30,0	50,0	50,0
$P_1, \text{МПа}$	0.5	0.2	0.3	0.3	0.5	0.5	0.2	0.1
$t_{p1}, \text{мин}$	20,0	30,0	40,0	50,0	30,0	40,0	60,0	60,0
$P_2, \text{МПа}$	1.0	1.0	0.8	0.5	1.0	1.0	0.6	0.4



Таблица 1.25 – Система допусков на отклонения технологических режимов формования корпуса, обеспечивающих сохранение оптимальных свойств на уровне 90 %.

Режимы печати/экструзии	$\psi$ в	Е	$\sigma$ р	$\tau$ с	$\alpha$	$\chi$
T1, °C	80...100	60...90	60...80	65...75	80...100	60...75
tr1, мин	45...60	50...80	50...70	35...50	40...60	50...65
T2, °C	160...190	160...200	155...170	145...155	160...180	145...160
tr2, мин	180...300	260...360	280...340	170...210	180...280	150...180
tr0, мин	10...25	10...40	20...40	35...45	10...25	35...50
P1, МПа	0.3...0.5	0.1...0.4	0.2...0.4	0.2...0.4	0.4...0.5	0.1...0.3
tr1, мин	10...30	15...40	30...45	45...55	10...35	45...65
P2, МПа	0.8...1.0	0.8...1.0	0.7...0.9	0.4...0.6	0.8...1.0	0.5...0.7

На основе параметрической модели послойного наплавления корпусных элементов РЭА проведено моделирование процессов 3D печати в управлении качеством построения физической модели объекта.

Установки с несколькими экструдерами предоставляют возможность создавать некоторое количество схожих объектов только сообразно одной цифровой модели. Скорость синтеза печати растёт сообразно численности печатающих головок. Достигается бережливость использования полимеров и расходных материалов, ресурсов из-за применения единой рабочей камеры, часто требующей обогрева. Что понижает первоначальную стоимость процесса печати.

Но требует обеспечения контроля температурных режимов печати, который целесообразно осуществлять посредством системы допусков, базируясь на датчиках аддитивной установки.

Для обеспечения качества процесса построения физической модели объекта необходимо построить модель функционирования 3D принтера в системе Abaqus Unified FEA.

Это простой симулятор декартового робота с 3 степенями свободы. Этот код в основном отображает робота базируясь на технических характеристиках и обновляет чертеж, основываясь на отношениях между звеньями и двигателями. Результаты моделирования на физических моделях могут быть визуализированы с использованием этой модели. Модель можно использовать в качестве интерфейса небольшого прототипа, основанного на микроконтроллере Arduino. Поэтому параметры двигателя, резьба, звено, размеры площадки приведены к единому виду. Виды аддитивных установок, использованные в качестве набора данных представлены на рис. 1.44.

- Picaso 3d designer pro 250.
- 3D-принтер Wanhao Duplicator i3.



Рисунок 1.44 – Типы аддитивных установок, использующие 3 степени свободы.

На рис. 1.45 представлена структурная схема управления 3D-принтера с рассматриваемыми блоками и их взаимосвязью.



Рисунок 1.45 – Структурная схема управления

Сигнал с управляющей программы поступает на контроллер, в котором идет их дальнейшее преобразование с последующей передачей на драйвера шаговых двигателей для каждой из осей. Драйвера преобразуют поступившие сигналы для последующей коммутации обмоток двигателей, после этого двигатели осуществляют необходимые перемещения. После того как двигатели отработают необходимое перемещение операция повторяется до тех пор, пока не будет завершена программа.

Модель автоматизированной установки послойного синтеза представлена на рис.1.46-1.48.

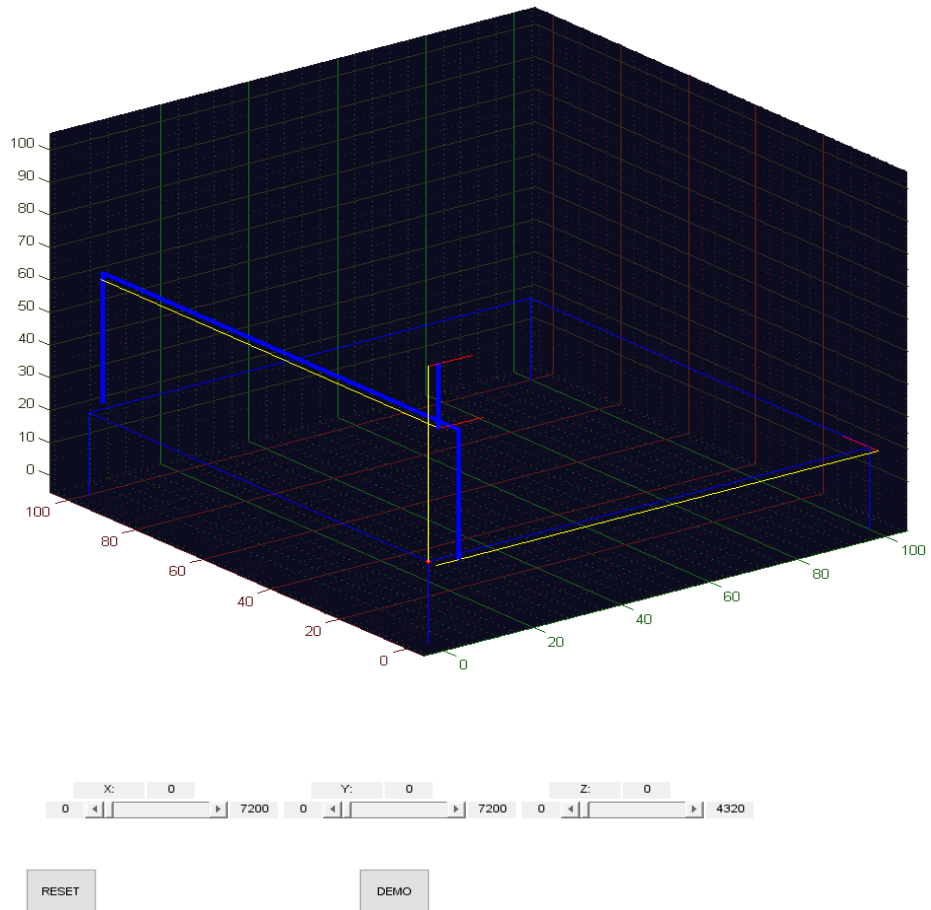


Рисунок 1.46 – Модель автоматизированной установки послойного синтеза

При создании модели функционирования модели заложены механизмы функционирования аддитивной установки и позиционирования экструдера:

Что закладывалось в модель программы (рис. 1.47).

```

motor_x_curstep = mod(ee_motor_x,motor_x_step);
motor_y_curstep = mod(ee_motor_y,motor_y_step);
motor_z_curstep = mod(ee_motor_z,motor_z_step);
motor_x_ang = (motor_x_curstep/motor_x_step)*2.0*pi;
motor_y_ang = (motor_y_curstep/motor_y_step)*2.0*pi;
motor_z_ang = (motor_z_curstep/motor_z_step)*2.0*pi;
link_y_x0 = (ee_motor_x/link_x_steps)*link_x_length+link_z_offsetx;
link_y_x1 = link_y_x0;
motor_y_posx = link_y_x0;

```

```

motor_x_line_y1 = motor_x_posy+cos(motor_x_ang)*motor_x_line_length;
motor_x_line_z1 = motor_x_posz+sin(motor_x_ang)*motor_x_line_length;
motor_y_line_x0 = motor_y_posx;
motor_y_line_x1 = motor_y_posx+cos(motor_y_ang)*motor_y_line_length;
motor_y_line_z1 = motor_y_posz+sin(motor_y_ang)*motor_y_line_length;

```

DRAW	51.0022	51.0022	51.0022
drawing	1000x3 double	1.5682...	89.9998
ee_motor_x	282.0574	282.05...	282.05...
ee_motor_y	2.8112e+03	2.8112...	2.8112...
ee_motor_z	2.5002e+03	2.5002...	2.5002...
ee_x	3.9175	3.9175	3.9175
ee_y	39.0442	39.0442	39.0442
ee_z	54.7256	54.7256	54.7256
fig	1	1	1
fr_height	20	20	20
fr_up2_x0	6.4175	6.4175	6.4175
fr_up2_x1	6.4175	6.4175	6.4175
fr_up2_y0	39.0442	39.0442	39.0442
fr_up2_y1	39.0442	39.0442	39.0442
fr_up2_z0	60	60	60
fr_up2_z1	80	80	80
fr_up_x0	8.9175	8.9175	8.9175
fr_up_x1	8.9175	8.9175	8.9175
fr_up_y0	-2.5000	-2.5000	-2.5000
fr_up_y1	102.5000	102.50...	102.50...

Рисунок 1.47 – Фрагмент программы

Использование аддитивных технологий позволяет закладывать качественные характеристики в конструкцию корпуса РЭА экранирование электромагнитных полей узлов радиоэлектронной аппаратуры и их соединений при использовании токопроводных материалов.

При формировании корпуса РЭА необходимо учитывать только те показатели, которые оказывают влияние на производство корпусных элементов.

Для сохранения нужного крутящего момента выбирается ШД с возможно большим моментом удержания, который зависит от напряжения питания. Дело в том, что производитель указывает минимальное напряжение для ШД, при котором тот начинает вращаться без нагрузок. Максимально допустимое напряжение может быть вычислено по формуле:

$$U_{\max} = 1000 \cdot \sqrt{L_{\text{шд}}}$$

где  $L_{\text{шд}}$  – индуктивность одной фазы шагового двигателя.

Практика показывает, что оптимальным напряжением будет значение ~ 80 % от полученного.

$$U_{\text{оптим.}} = U_{\text{max}} \cdot 0,8$$

В процессе проектирования схемы управления нужно четко представлять, какие задачи она должна решать. В нашем случае за основу конструкции был выбран дельта-робот. Для того, чтобы система успешно функционировала, необходимо решать две задачи, а именно обратную (инверсную) и прямую задачи кинематики. В первом случае заранее известна позиция, в которую должен быть перемещен экструдер 3D-принтера. Во втором случае известны углы, на которые повернуты позиционирующие механизмы системы, и необходимо найти положение рабочей платформы в пространстве.

На рис. 1.48 представлен этап проектирования корпусного элемента для последующего послойного синтеза.

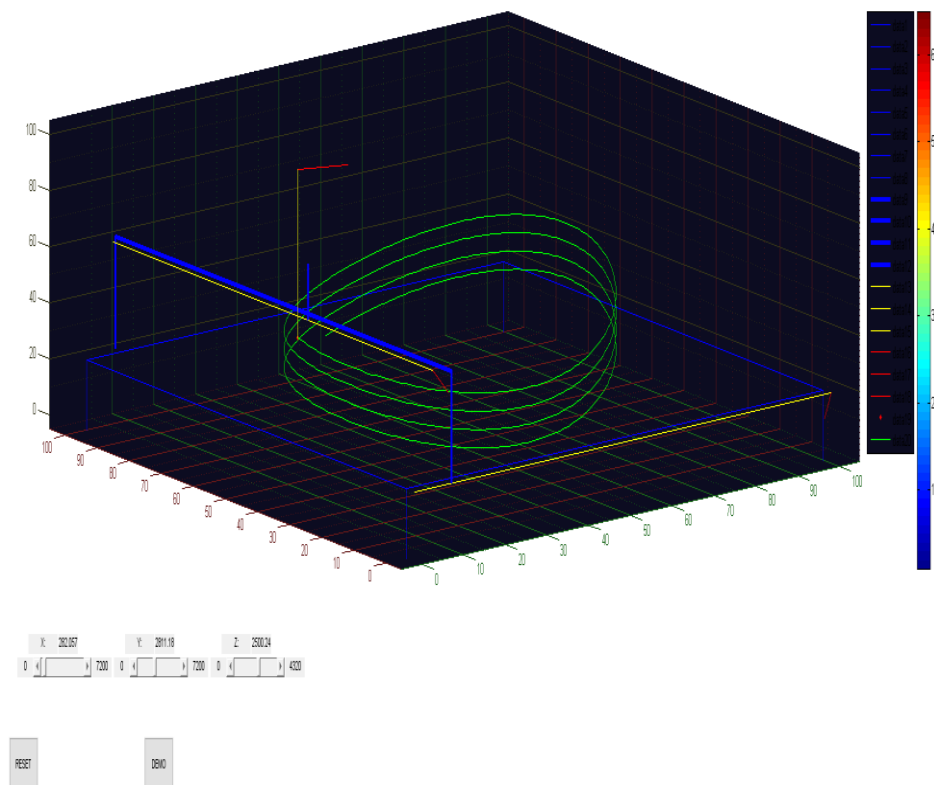


Рисунок 1.48 – Модель автоматизированной установки на этапах послойного синтеза

Аддитивное производство применимо к серийному и единичному производству корпусных элементов РЭА.

Оценка результативности применения аддитивного производства корпусных элементов РЭА.

Формула оценки результативности процессов:

$$R = \sum B_i,$$

где: R – оценка;  $B_i$  – количество баллов.

Показатели аддитивного производства направленные на качество изделия.

Для управления и повышения качества процесса послойного синтеза аддитивной установки с использованием аддитивных технологий выявлены показатели, которые необходимо учитывать в процессе печати (табл. 1.26).

Таблица 1.26 – Показатели качества полимеров, учитывающиеся в аддитивном производстве

Показатель качества полимера	Обозначение	Свойства
Температура размягчения	°С	Устойчивость к температурному воздействию
Усадка	%	Размерность
Продолжительность пластично-вязкого состояния	с	Скорость печати
Текучесть	мм	Точность печати

При соблюдении требований к полимерам, которые планируется применять в послойном синтезе и учёте момента гомогенизирования, который достигается путём соблюдения температурных режимов, получится достичь требования к качеству изделий, произведённых при помощи аддитивного производства.

Благодаря моделированию процессов послойного синтеза 3D печати и учёту особенностей технологии, удаётся обеспечить качество построения физической модели объекта. Обеспечение качества в аддитивном производстве позволяет добиться экономии полимеров и сокращения времени подготовительных этапов печати.

## Результаты и выводы по главе 1

Проведенный в главе анализ состояния вопроса позволяет сделать следующие выводы:

1. Современное состояние производственно-технической базы достаточно для организации производств, направленных на производство наукоёмкой продукции с использованием аддитивных технологий.

2. Описаны основные подходы к внедрению аддитивных технологий в производство корпусных элементов РЭА и их преимущества по сравнению с традиционными технологиями на основании ГОСТ Р 57586-2017 в аддитивном производстве, что позволяет обеспечить непрерывную информационную поддержку жизненного цикла производства корпусов РЭА.

3. Рассмотрены особенности функционирования аддитивных технологий применительно к производству корпусных элементов РЭА с использованием композиционных материалов. В работе сформулирован подход к производству корпусных элементов РЭА на основе аддитивного производства с использованием цифрового прототипа с дополнением показателей качества.

4. Проведен сопоставительный анализ стандартов, моделей и подходов к аддитивному производству, применимый в рамках производства корпусных элементов РЭА.

5. Выявлены физико-механические свойства полимеров и терморелаксационные характеристики материалов, используемых в аддитивном производстве.

6. Произведён расчёт максимальных нагрузок при различных температурах корпуса РЭА произведённого по МПН технологии выявлены аспекты устойчивости корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям к эксплуатационным факторам РЭА внешней среды и работы оборудования, установленного в корпус.



7. Разработана параметрическая модель зависимости характеристик корпусного элемента от технологических факторов температуры, давления, что позволяет установить режимы формирования корпуса РЭА на аддитивной установке.

## **2. РАЗРАБОТКА ПРОЦЕДУР ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА**

### **2.1 Разработка процедур оценки экологических показателей технологии послойного наплавления**

Для обеспечения работы с аддитивными технологиями и безопасности обращения с расплавленными полимерами разработан метод оценки экологической обстановки в процессе 3D печати в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 16000-1-2007, регламентирующий и устанавливающий требования к качеству воздуха в замкнутых помещениях и отбор проб.

Экспертиза проводилась с помощью следующих приборов:

- Газовый хроматограф ФГХ-10;
- Спектрофотометр РV 1251С;
- Аспиратор ПУ-2П исп. 1;
- Пробоотборный компрессор ПК-1 – устройство набирает пробу воздуха в специальный полиэтиленовый пакет.

Пробы воздуха брались методом «максимальной разовой пробы» – максимальная концентрация определяется путем кратковременного отбора проб в непосредственной близости с источником выброса.

С самого начала замерялись фоновые показатели воздуха в помещении, рядом с рабочим местом, оборудованным 3D принтером. После этих замеров запускался процесс экструзии.

Замеры происходили при следующих условиях окружающей среды:

- температура: 19 С
- влажность воздуха: 40 %
- атмосферное давление: 762 мм ртутного столба

Пробы представляют из себя заборы воздуха двумя приборами. Первый прибор, Аспиратор ПУ-4Э, пропускает воздух через колбы с дистиллированной

водой. На каждый вид выброса ставится отдельная колба, колбы меняются при смене материала для печати.

С помощью второго прибора, пробоотборного компрессора ПК-1, отбираются пробы непосредственно в рабочей зоне принтера. Для этого используется специально обработанный запакованный полиэтиленовый пакет.

После смены колб замера окружающей среды запускается экструзия полимеров на 3D принтере, для каждого полимера применяемого в печати свой собственный температурный режим:

- температурный режим печати ABS: 230 С;
- температурный режим печати PLA: 210 С;
- температурный режим печати HIPS: 195 С;
- температурный режим печати FLEX: 237 С;
- температурный режим печати RUBBER: 235 С.

Фоновые значения и ПДК (предельно допустимая концентрация):

- фенол: <0,15 мг/метр кубический, при ПДК 1,00 мг/метр кубический;
- формальдегид: <0,25 мг/метр кубический, при ПДК 0,50 мг/метр кубический;
- метанол: <0,1 мг/метр кубический, при ПДК 15,00 мг/метр кубический;
- уксусная кислота: <2.5 мг/метр кубический, при ПДК 5 мг/метр кубический;
- стирол: <0,05 мг/метр кубический, при ПДК 30,00 мг/метр кубический;
- хлористый винил: <0,05 мг/метр кубический, при ПДК 5,00 мг/метр кубический;
- ацетон: <1,840±0,460 мг/метр кубический, при ПДК 800.00 мг/метр кубический;
- ацетальдегид: <0,5 мг/метр кубический, при ПДК 5,00 мг/метр кубический.

Результаты проводимых измерений по каждому полимеру, применяемому в синтезе, представлены в (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Данные по анализу экологических показателей 3D печати

Результаты анализа пробы воздуха «пластик HIPS»				
№ п/п	Определяемые компоненты	Результаты, мг/м <sup>3</sup> *	Фоновые значения	ПДК <sup>^</sup> , мг/м <sup>3</sup>
1	Стирол	<0,05	<0,05	30.00
2	Ацетальдегид	<0.5	<0.5	5.0
Результаты анализа пробы воздуха «пластик PLA»				
№ п/п	Определяемые компоненты	Результаты, мг/м <sup>3</sup>	Фоновые значения	ПДК <sub>мр.</sub> мг/м <sup>3</sup>
1	Метанол	<0.1	<0.1	15.0
2	Уксусная кислота	<2.5	<2.5	5.0
3	Ацетон	1,285+0.320	1.840+0.460	800.000
Результаты анализа пробы воздуха «пластик FLEX»				
№ п/п	Определяемые компоненты	Результаты, мг/м <sup>1</sup>	Фоновые значения	ПДК <sub>ир.</sub> мг/м <sup>5</sup>
1	Метанол	<0.1	<0.1	15.0
2	Формальдегид	<0.25	<0.25	0.50
3	Ацетальдегид	<0.5	<0.5	5.0
4	Стирол	<0.05	<0.05	30.00
Результаты анализа пробы воздуха «пластик ABS»				
№ п/п	Определяемые компоненты	Результаты, мг/м <sup>3</sup>	Фоновые значения	ПДК <sub>ир.</sub> мг/м <sup>3</sup>
1	Фенол	<0.15	<0.15	1.00
2	Ацетальдегид	<0.5	<0.5	5.0
3	Хлористый винил	0.197+0.049	<0.05	5.000
4	Стирол	<0.05	<0.05	30.00
Результаты анализа пробы воздуха «пластик RUBBER»				
№ п/п	Определяемые компоненты	Результаты, мг/м <sup>3</sup>	Фоновые значения	ПДК <sup>^</sup> , мг/м <sup>3</sup>
1	Метанол	<0.1	<0.1	15.0
2	Формальдегид	<0.25	<0.25	0.50
3	Стирол	<0.05	<0.05	30.00
4	Ацетальдегид	<0.5	<0.5	5.0

В результате исследования установлено, что HIPS, FLEX и RUBBER не выделяют во время печати вышеуказанных ядовитых веществ. А значит, печать ими безопасна для здоровья, так как не оказывает вредного воздействия на организм человека.

У PLA пластика продуктом распада является ацетон, однако его выделение при экструзии, согласно результатам, находится в пределах погрешности, а общее

содержание в воздухе в ходе эксперимента приблизительно в 7.5 раз ниже, чем предельно допустимая концентрация.

При печати ABS пластиком выделяется хлористый винил. По результатам экспертизы его содержание превышает фоновые показатели в 3.94 раза, но такое содержание хлористого винила приблизительно в 25.38 раза меньше, чем предельно допустимые концентрации.

Из всего вышеописанного можно сделать вывод, что предложенный метод оценки экологичности 3D печати корпуса РЭА позволяет определить соответствие требованиям ПДК ГН 2.2.5.1313-03 вредных веществ в воздухе рабочей зоны».

## **2.2 Показатели качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям РЭА**

Для выделения и анализа факторов, влияющих на качество объекта производства 3D-печати, необходимо также отталкиваться от нормативных и законодательных требований стандартов в совокупности с требованиями потребительского сектора. Успешное управление процессом во многом зависит от управленческих решений, которые являются реакцией на изменяющиеся условия, среду организации, факторы, в которых осуществляются процессы. Для получения качественных деталей необходимо осуществлять планирование, которое включает не только установление целей и задач, но и определение, обеспечение и поддержание инфраструктуры и ресурсов, необходимых для функционирования процессов, а именно планирование использования оборудования и поддержание процесса производства на надлежащем уровне качества. В этом случае и качество деталей будет на высоком уровне. Из предыдущего пункта стало ясно, что четкие требования потребительского сектора отсутствуют, но были выявлены основные критерии, которые позволяют осуществлять выбор при планировании процесса.

Таблица 2.2 – Этапы разработки технологических процессов

Этап	Основные задачи этапа	Оценка
Анализ исходных данных	Изучение конструкторской документации.	1-10
Выбор типового (базового) ТП	Определение места изделия в классификационных группах ТП.	1-10
Разработка схемы сборки	Анализ состава изделия.	1-10
Составление маршрутного ТП	Определение последовательности операций. Определение штучного времени.	1-10
Разработка технологических операций	Расчет режимов, составляющих Тшт и загрузки оборудования, последовательность.	1-10
Расчет технико-экономической эффективности	Выбор вариантов операций по технологической себестоимости	1-10
Анализ ТП с точки зрения техники безопасности	Выбор и анализ требований по шуму, вибрациям, воздействию вредных веществ.	1-10
Оформление технологической документации	Оформление эскизов технологических операций и карт.	1-10
Разработка ТЗ на специальную оснастку	Схема базирования заготовок.	1-10

Расчет коэффициента прироста показателей качества для дисперсии и математического ожидания показателей качества выходов подпроцесса и входов технологического процесса приведены в табл. 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3 – Результаты расчета коэффициента прироста показателей качества для математического ожидания

№	Показатель качества	Коэффициент вклада	Коэффициент прироста
0.1	Структура заполнения	9,8%	9,8%
0.2	Прижим сопла	1,5%	1,5%
0.3	Характеристики покрытия стола	2,7%	2,7%
1.1	Внутренний диаметр	14,6%	14,6%
2.1	Наружный диаметр	52,3%	36,1%
2.2	Присоединительный диаметр	10,5%	7,2%

2.3	Величина изгиба	9,7%	6,7%
3.1	Длина	19,6%	13,5%
4.1	Жесткость дистального конца	8,8%	5,0%
4.2	Жесткость проксимальной части	4,3%	2,9%

Таблица 2.4 – Результаты расчета коэффициента прироста показателей качества для дисперсии

№	Показатель качества	Коэффициент вклада	Коэффициент прироста
0.1	Структура заполнения	17,0%	17,0%
0.2	Прижим сопла	0,2%	0,2%
0.3	Характеристики покрытия стола	1,0%	1,0%
1.1	Внутренний диаметр	1,6%	1,6%
2.1	Наружный диаметр	63,0%	50,6%
2.2	Присоединительный диаметр	8,5%	6,8%
2.3	Величина изгиба	10,5%	8,4%
3.1	Длина	18,0%	14,4%
4.1	Жесткость дистального конца	3,2%	1,5%
4.2	Жесткость проксимальной части	1,8%	0,7%

Результаты на основании данных, представленных в (табл. 2.4), показывают, что сумма коэффициентов прироста в каждой подгруппе как для математического ожидания, так и дисперсии больше  $0,8 K_g$  показателей качества «Наружный диаметр». Соответственно, состав выделенных ПК является правильным, и его корректировка не требуется.

Таблица 2.5 – Данные для принятия решения о расчете коэффициента уровня возмущающих воздействий

№	Показатель качества	$K_{MВ}$	$K_{\sigma В}$
ПК входов ПК «Наружный диаметр»			
1	Структура заполнения	10,1%	10,7%
2	Прижим сопла	1,6%	0,1%

3	Характеристики покрытия стола	14,4%	1%
ПК управляющих воздействий ПК «Наружный диаметр»			
4	Жесткость	2,5%	1,9%
5	Температура в рабочей камере	6,5%	42,3%
6	Влажность	3,2%	4,3%
7	Температура экструдера	10,2%	11,6%
8	Скорость нанесения полимера	0,6%	5,3%
9	Отклонение размеров от 3D модели	37,5%	3,7%
10	Температура стола	4,2%	7,8%
	<b>Σ</b>	<b>91,7%</b>	<b>89,2%</b>

Данные, представленные в таблице, отражают коэффициент вклада соответствующих ПК в ПК «размер». Значение 91,7%  $K_{МВ}$  в строке сумма следует читать как 0,97  $K_{МВ}$ .

Уровень качества производственных процессов определяется по формуле:

$$Y_K = N_{без.д.} / N_{общ.},$$

где  $Y_K$  – коэффициент качества продукции;

$N_{без.д.}$  – количество изделий, выполненных без дефектов;

$N_{общ.}$  – общее количество изделий.

Показатель гибкости и адаптивности организации производственного процесса аддитивного производства определяется по формуле:

$$Y_{гиа} = (t_{гиб} + t_{адап}) / \sum_{i=1}^n T_{ц},$$

где  $t_{адап}$  – время адаптации к изменениям производственного процесса;

$t_{гиб}$  – время изменения производственного процесса под внешние требования;

$\sum_{i=1}^n T_{ц}$  – общая длительность производственного цикла изделия.

Показатель параллельности выполнения работ определяется по формуле:

$$Y_n = 1 - \sum_{i=1}^n T_{ц} / \sum_{i=1}^n T_{ц.оп}$$

$\sum_{i=1}^n T_{ц.оп}$  – сумма операций, составляющих изделие;



$\sum_{i=1}^n T_{i}$  – общая длительность производственного цикла изделия.

Формула показатель интеграции:

$$Cm_{инт} = (N_{ИС} / N_{общ}) * 100\%$$

где  $Cm_{инт}$  – степень интеграции аддитивного производства;

$N_{общ}$  – общее количество подразделений/организаций;

$N_{ИС}$  – количество производственных этапов, использующих аддитивные технологии.

### **2.3 Разработка формализованной процедуры обеспечения качества сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА**

Качество поверхности во многом определяется состоянием поверхностного слоя полимера класс шероховатости по ГОСТ2789-59 - 10, основные свойства которого формируются в процессе изготовления изделий с применением аддитивных технологий. Учитывая, что аддитивные технологии создают поверхности на основе ступенчатой аппроксимации, можно рассчитать затраты на исправление, что влияет на качество корпусных элементов на этапе производства, и типовые дефекты при использовании аддитивных технологий.

Отклонений формы конструктивного элемента от модели определяется выражением:

$$ГП_{\Delta\phi} = F(\Delta_{\phi}^{локал})$$

где  $\Delta_{\phi}^{локал}$  – локальное отклонение формы, F – функционал ГП отклонений формы СПП, например,  $\max(\Delta_{\phi}^{локал})$  соответствует определению ГП отклонений формы СПП, как наибольшему расстоянию от точек прилегающей поверхности по нормали к реальной поверхности.

Обеспечение заданной точности конструктивного элемента основное требование к технологическому процессу. Точность элементов корпуса измеряется согласно ГОСТ Р 8.563-2009 Государственная система обеспечения единства

измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений. Под точностью 3D печати понимают степень соответствия изготовленной конструктивного элемента требованиям чертежа и технических условий.

В Приложении Д представлена документированная процедура (Приложение Д) «контроль геометрических параметров корпусов РЭА».

Анализ точности технологического процесса печати позволил для каждой технологической операции выявить причины возникновения производственных погрешностей, обосновать границы технологического допуска, правильно настроить технологический процесс и выбрать экономический метод достижения требуемой точности рис. 2.1.

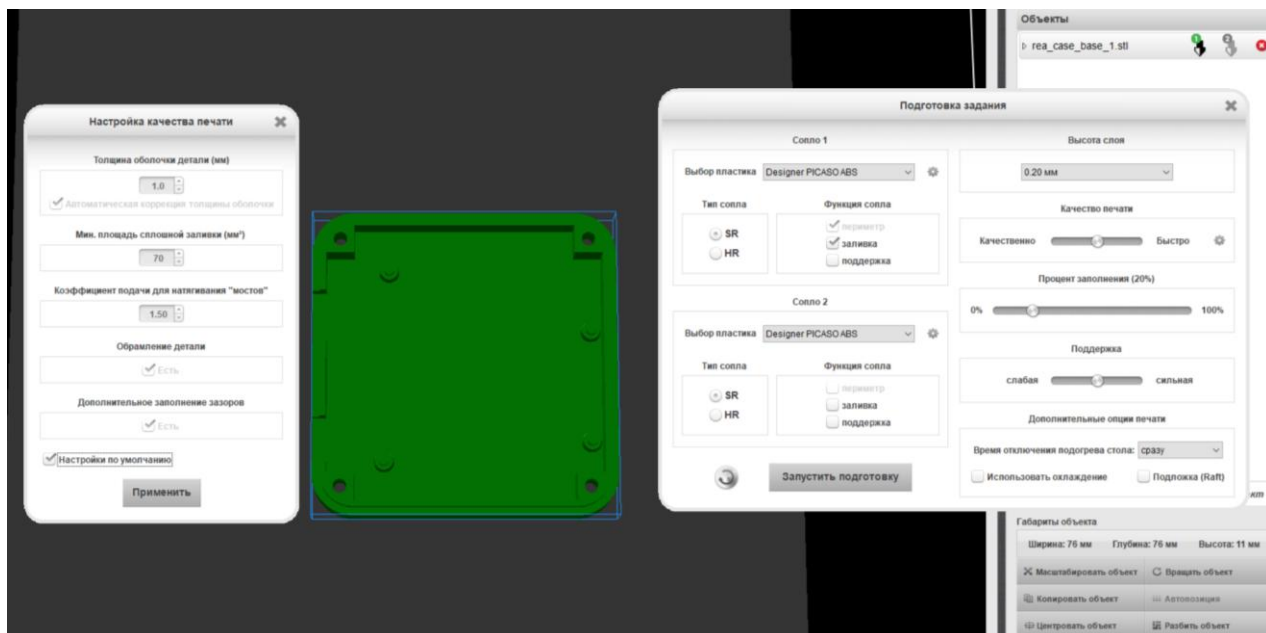


Рисунок 2.1 – Выставление пределов точности в программном комплексе установки печати

В 3D принтерах с декартовой кинематической схемой следует рассматривать вопрос точности по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в этой схеме печатающая головка движется по осям  $X$  и  $Y$ , а платформа опускается слой за слоем по оси  $Z$ . Когда говорят о точности принтера, то имеют в виду точность позиционирования печатающей головки. Эта точность зависит от схемы управления шаговыми двигателями принтера и качества исполнения механических узлов. Чем выше точность, тем лучше будет получаться боковая поверхность модели.

Большинство принтеров имеют точность позиционирования 30 - 50 мкм рис.

## 2.2.

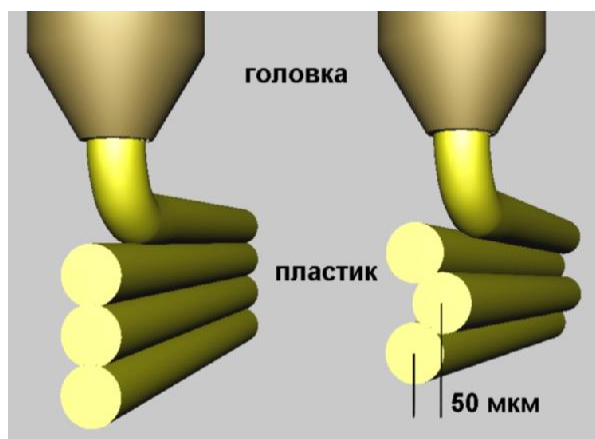


Рисунок 2.2 – Графическое отражение отклонения печати

Точность позиционирования по вертикальной оси  $Z$  существенно меньше влияет на качество печати модели. На практике для получения моделей хорошего качества достаточно шага 100 мкм и опыты показали, что в большинстве случаев качество существенно не улучшается при уменьшении шага до 50 мкм. Исключение составляют поверхности близкие к горизонтальным, на которых с уменьшением шага снижается ступенчатость поверхности. Разрешающая способность. Большинство МПН 3D принтеров имеют сопло с диаметром отверстия 0.3 - 0.4 мм.

Например, для принтера «3D принтер Hercules Mini» точность построения равна 0,05 мм. 0,1 входит в интервал между значениями 0 и 0,24, соответственно  $100 > 0,05 > 90\%$  (табл. 2.6).

Для более точной оценки уровня качества использован комплексный метод, в котором учитываются коэффициенты весомости. Пример расчета уровня свойства «точность построения» с учетом весового коэффициента для принтера «Picaso 3d designer pro 250»:

В новой технологии исключаются ошибки в геометрии отливки, если они отсутствуют в модели конструктивного элемента, используемой при проектировании оснастки.

Применение аддитивных технологий в производстве корпусных элементов позволяет достичь требуемых показателей точности исполнения элементов. Отклонения составили не более 0,05 мм.

Таблица 2.6 – Результаты расчётов

Исследуемый корпус	Заданный допуск, мм	Для составляющих элементов	Для стыкующихся элементов			Значение качества исходя из суммарного отклонения
		Установленный квалитет	Среднее значение, мм	Верхнее отклонение, мм	Нижнее отклонение, мм	
Корпус модуля управления	0,05	5	0.034	0,014	-0,014	6
Корпус выполненный МПН	0,10	6	0,051	+ 0,025	- 0,025	7

Разработана математическая модель, которая позволяет оценить точность различных конструкций корпусов и отверстий, как реальных, так и вновь проектируемых, а также оптимизировать допуски на размеры деталей аналитическим расчетным методом.

Применение данных мер позволит достичь обеспечения точности позиционирования компонентов корпуса РЭА.

Статистический анализ партии обработанных изделий на отклонение размеров.

Качество процесса складывается из нескольких составляющих, что схематично отражено ниже (рис. 2.3). Модель обеспечения качества должна покрывать и вопросы качества изделий, которое, как было выяснено ранее, зависит от качественного уровня оборудования, и вопросы результативности, которые зависят от организации процесса аддитивного производства. Несложно отследить взаимосвязь между уровнем качества и организацией производства 3D-печати, выбор оборудования влияет на качество и наоборот, от того, какое качество необходимо, будет выбираться необходимое оборудование, а далее

процесс рассматривается как задача линейного программирования для обеспечения минимальных затрат на производство.



Рисунок 2.3 – Основные направления, на которые направлена модель обеспечения качества

При использовании модели обеспечения качества могут быть достигнуты следующие результаты:

1. Сокращение потерь;
2. Увеличение объемов выпускаемой продукции;
3. Увеличение уровня качества выпускаемой продукции;
4. Повышение ликвидности продукции;
5. Скорость реагирования на новые технические регламенты;
6. Значительное снижение времени планирования, проектирования и производства.

Для оценки качества оборудования используется регистрационный метод, а сбор информации происходит экспертным путём.

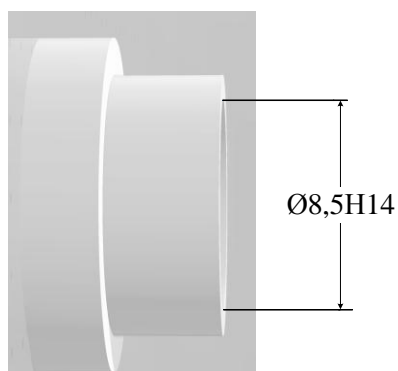


Рисунок 2.4 – Изделие, выполняемое при помощи аддитивных технологий  
Ø8,5H14

Оценка результативности технологического процесса аддитивного производства включает следующие этапы:

- определение частных показателей результативности;
- определение интегрального показателя результативности;
- установление уровня значения результативности СМК (классификация интегрального показателя на шкале его возможных значений).

В научной литературе выделяют различные подходы к определению показателей результативности процессов. Первый подход основывается на показателях, которые определяет внутренний потребитель процесса. Второй связан с преобразованием целей в области качества в показатели результативности процессов. Третий подход – установка показателей по нормативно – методической базе организации [42].

Исходные данные для определения значений показателей в каждой организации определяются исходя из сферы деятельности. Перечень процессов, для которых определяется значение показателя результативности формируется самостоятельно на основе типовых показателей. В работе использованы организационно-методические указания по анализу и определению результативности систем менеджмента качества, которые разработаны и применяются в системе добровольной сертификации «Военный Регистр» (табл. 2.7).

Таблица 2.7 – Показатели результативности процесса аддитивного производства

Показатели результативности	Веса	Значения показателей до внедрения модели, $R_0$	Значения показателей после внедрения модели, $R_1$
Время обработки заказа (до начала производства)	0,15	645	255
Доля продукции соответствующего качества в общем числе произведенной продукции	0,18	2	1
Себестоимость единицы заказа	0,17	2155	1781
Количество задержек по заказам	0,18	3	1
Время производства заказа	0,17	1180	630
Процент сдачи продукции с первого предъявления	0,15	20%	5%
Сумма	1		

Величина показателя  $R$  определяется как средневзвешенная оценка частных показателей с учетом весовых коэффициентов:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n R_i * \beta}{\sum \beta},$$

где  $R$  – результативность процесса аддитивного производства;  $R_i$  – единичный относительный  $i$ -ый показатель результативности;  $\beta$  – весовой коэффициент;  $n$  – количество выбранных частных показателей, представленных в таблице 2.8.

Для вычисления единичного относительного показателя используют установленные требованиями целевые показатели (критерии) результативности процессов, тогда показатель результативности рассчитывается по формуле:

$$R_i = \frac{r_i}{r_0},$$

где  $r_i$  – показатель  $i$ -го процесса;  $r_0$  – критерий результативности  $i$ -го процесса.

Определение результативности предложенной модели сопровождается сравнением результативности до ( $R_{i \text{ до}}$ ) и результативности после ( $R_{i \text{ после}}$ ) применения модели обеспечения качества аддитивного производства, тогда получим:

$$\frac{R_{i \text{ после}}}{R_{i \text{ до}}} = \frac{r_{i \text{ после}}}{r_0} : \frac{r_{i \text{ до}}}{r_0} = \frac{r_{i \text{ после}}}{r_0} \times \frac{r_0}{r_{i \text{ до}}} = \frac{r_{i \text{ после}}}{r_{i \text{ до}}},$$

Таким образом, чтобы определить, во сколько повысилась или понизилась результативность процесса после введения модели, достаточно знать показатели процесса до и после применения модели, поэтому итоговая формула будет иметь вид:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_{i \text{ после}}}{r_{i \text{ до}}} * \beta}{\sum \beta} = \sum_{i=1}^n \frac{r_{i \text{ после}}}{r_{i \text{ до}}} * \beta, \text{ при } \sum \beta = 1$$

Результаты расчетов приведены в сводной таблице (табл. 2.8).

Таблица 2.8 – Сводные данные оценки результативности модели обеспечения качества аддитивного производства

Показатели результативности	Веса, $\beta_i$	Значения показателей до внедрения модели, $r_{i \text{ до}}$	Значения показателей после внедрения модели, $r_{i \text{ после}}$	$\frac{r_{i \text{ после}}}{r_{i \text{ до}}}$	Результативность, $R$
Время обработки заказа (до начала производства)	0,15	645	255	2,53	0,38
Доля продукции соответствующего качества в общем числе произведенной продукции	0,18	2	1	2,00	0,36
Себестоимость единицы заказа	0,17	2155	1781	1,21	0,21
Количество задержек по заказам	0,18	3	1	3,00	0,54
Время производства заказа	0,17	1180	630	1,87	0,32
Процент сдачи продукции с первого предъявления	0,15	20%	5%	4,00	0,6
Сумма	1				<b>2,4</b>



По итогам оценки результативности видно, что после применения модели результативность процесса аддитивного производства повысилась примерно в 2 раза по отношению к процессу без модели. Необходимо также проанализировать риски, которые могут возникнуть в ходе широкого распространения модели рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Корпус РЭА, произведённый при помощи технологии МПН

Данная документированная процедура относится к приёмо-сдаточному контролю корпусов РЭА, изготовленных с использованием аддитивных технологий. Владелец процесса является контролер ОТК [19].

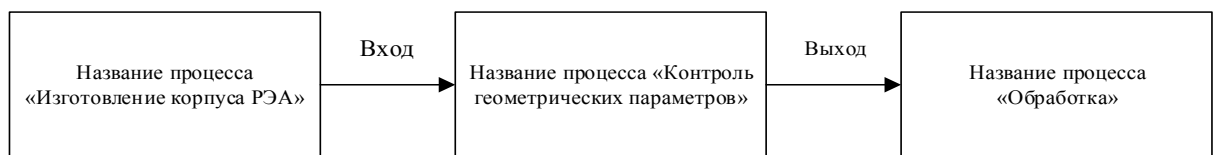


Рисунок 2.6 – Модель взаимодействия процессов СМК

Требования ко входу процесса управление качеством сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА.

Таблица 2.9 – Разделы «Область применения» формализованной процедуры

Вход	поставщик	Владелец	Требования к входу
Экструдер	Цех. с аддитивными установками	Мастер участка готовой продукции	Соответствие Геометрических параметров конструкторско-технологической документации

В «Общих положениях» формализованной процедуры определены владелец аддитивного процесса, модель взаимодействия процессов и влияние персонала. Требования к выходу процесса, входу и сама формализованная процедура процесса разработана ориентируясь на опыт работы с аддитивным оборудованием [20].

Требования к выходу процесса управление качеством сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА.

Таблица 2.10 – Требования к выходу процесса управление качеством

Выход	Процесс потребитель (подразделение)	Владелец процесса потребителя (руководитель подразделения)
Экструдер, Запись в журнале отклонений	Участок обработка	Мастер участка готовой продукции

Модель процесса управление качеством сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА рис. 2.7.

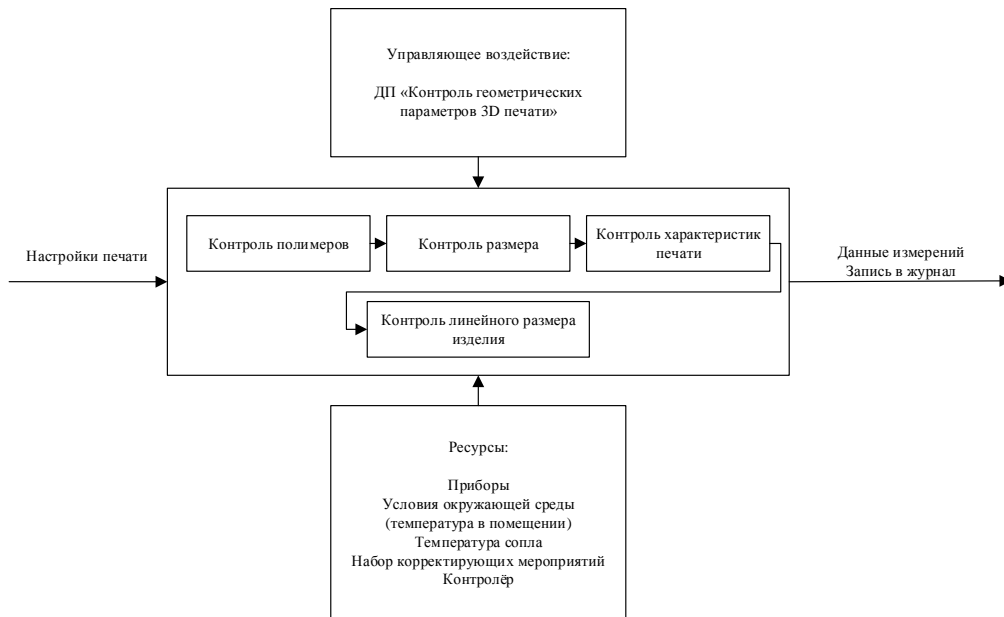


Рисунок 2.7 – «Общие положения»

Таблица 2.11 – Требования к ресурсам [21]

Ресурс	Процесс- поставщик процесса (подразделение)	Владелец процесса поставщика ресурса (руководитель подразделения)	Требования к Р«УР<7
Приборы	Отдел технического контроля	Начальник ОТК	Аттестат поверки
Условия окружающей среды	ОТК	Начальник ОТК	Н у. окружающей среды
Особенности задания	ОТК	Начальник ОТК	Аттестат поверки
Набор габаритов корпуса РЭА	ОТК	Начальник ОТК	Аттестат поверки
Контролер	ОТК	Начальник ОТК	Среднее техническое образование

Требования управляющим воздействиям процесса управление качеством сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА.

Таблица 2.12 – Пункты раздела «Общие положения»

Управляют не воздействия	Процесс управления (подразделения)	Владелец процесса управления
ДП «Контроль геометрических параметров корпуса РЭА»	ОТК	Начальник ОТК
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ процесс	Техно логический ОТДЕЛ	Технолог
Чертёж	Конструкторский отдел	Конструктор

В настоящей процедуре применяются термины с соответствующими определениями согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015.

### 2.1. Обозначения и сокращения

В настоящей процедуре применяются следующие обозначения и сокращения [22]:

ДП – документированная процедура

### 3. Нормативные ссылки

В настоящей процедуре ссылки на следующие нормативные документы: ГОСТ Р ИСО 9000-2015, чертежи технологическая документация на корпуса РЭА.

Приведена блок схема процесса контроля аддитивного производства в виде описания алгоритма процесса (рис. 2.8) [23].

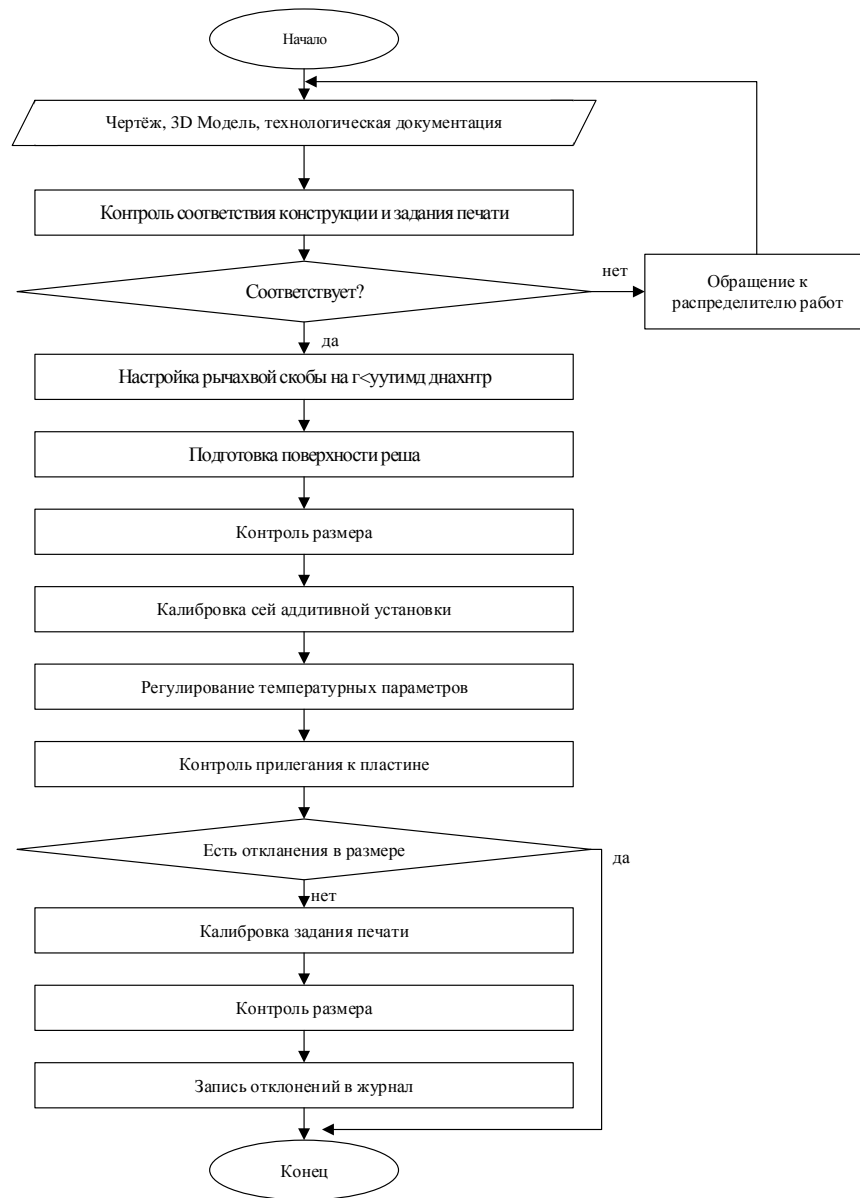


Рисунок 2.8 – Блок схема процесса контроля аддитивного производства

Таблица 2.13 – Раздел «Оценка результативности»

Показатель результативности процесса	Оценка показателя результативности	Периодичность оценка	Форма записи
Доля годных корпусов	Количество корпусов за исключением тех, что признаны бракованными к общему количеству	Ежемесячно	журнал
Доля доработок	Доля корпусов, подвергшихся какой-либо доработки к общему количеству корпусов	Ежемесячно	Журнал

В разделе формализованной процедуры «Ответственность и полномочия» прописываются обязанности всех участников процесса аддитивного производства

реализуются в форме матрицы распределения ответственности персонала на основе должностных инструкций и рабочих обязанностей. Матрица распределения ответственности представляет собой таблицу, в которой столбцы участники процесса СМК, а строки этапы процесса СМК табл. 2.14 [25]:

У – утверждающий документ;

С – соисполнитель этапа;

О – ответственный за этап;

И – исполнитель этапа;

Ответственность и полномочия [26].

Таблица 2.14 – Матрица распределения ответственности

Название этапов процесса СМК	Участники процесса		
	Контролер отк	Начальник отк	Технолог
Контроль соответствия корпуса и тип размера	О, И		
Настроим аддитивной установки	О, И		
Подготовка задания печати	О, И		
Контроль размеров	О, И		
Корректировка параметров печати	О, И		
Настройка температурного режима	О, И		
Контроль прилегания к заготовки к платформе	О, И		
Контроль давления в экструдере	О, И		
Контроль геометрических параметров	О, И		
Регистрация возникающих отклонений в контрольный листок и журнал	И	О	У

Формализованная документированная процедура (Приложение Д) позволила составить алгоритм работы с оценкой качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям, и обеспечила контроль процесса печати с использованием аддитивной установки.

## 2.4 Согласование качества корпусных элементов РЭА с требованиями технического задания

Первый этап процесса аддитивного производства – это согласование с потребителем требований, которые выражаются в виде технического задания (ТЗ), для этого составной частью модели является градация промышленной продукции по уровню качества, по которой потребитель задает в качественной форме характеристику продукции аддитивного производства.

$$ТЗ = \langle Q_k \rangle,$$

где  $N_{ТЗ}$  – это требования заказчика, предъявляемые к качеству конечного изделия в виде ТЗ;  $Q_i$  – качественная характеристика продукции согласно градации.

Качественная характеристика продукции соответствует определенной количественной характеристике качества.

$$Q_k = \langle Q_{изд} \rangle,$$

где  $Q_{изд}$  – количественная характеристика качества изделия, произведенного методом послойного синтеза.

Количественная характеристика качества конечного изделия, находится под влиянием от уровня используемых установок и оснастки.

$$Q_{изд} = \langle Y_k \rangle,$$

где  $Y_k$  – качественный уровень установки.

На уровень качества оборудования также влияет важность параметра, то есть его вес, поэтому вносится коэффициент весомости, и конечно сами установки:

$$Y_k = \langle Q_n; k \rangle,$$

где  $Q_n$  – качество установки послойного синтеза с соответствующими свойствами;  $k$  – коэффициент весомости свойства продукции [28].

Так как стандарты не регламентируют требования о конкретных свойствах установок 3D-печати, организация в праве выбрать те свойства, которые на их взгляд сильнее отражают качество изделий на выходе процесса, таким образом, модель не ограничивает, и направлена на различные типы производств с различными требованиями в зависимости от допустимости, доступности и потребности.

Модель ограничивается техническими характеристиками, которые указаны в паспортах установок, согласно требованиям потребителей и требованиям стандартов, но допустимо изменение ряда оцениваемых параметров. Установка характеризуется техническими параметрами.

$$Q_n = \langle E; D; S; F \rangle,$$

где  $E$  – точность построения (позиционирования);  $D$  – разрешение по элементам;  $S$  – скорость печати;  $F$  – толщина слоя.

Таким образом, качество изделия должно соответствовать;  $N_{тз}$  и выражаться через уровень качества, который зависит от показателей качества установки и весовых коэффициентов.

$$Q_{изд} = Q_i = Y_k = \langle Q_n; k \rangle = N_{тз},$$

В связи с этим выбор аддитивных установок осуществляется на основе уровня качества в  $N_{тз}$ , то оборудование может быть использовано в производстве, если уровень качества ниже  $N_{тз}$ , то установка не используется.

$$\begin{cases} Y_k \geq N_{тз} \Rightarrow N_{тз} = Q_n, \\ Y_k < N_{тз} \Rightarrow N_{тз} \neq Q_n. \end{cases}$$

Предложенная в данной работе модель позволяет разработать на ее основе алгоритм (рисунок 2.9) обеспечения качества процесса аддитивного производства.

Для создания алгоритма был использован программный продукт Microsoft Visio для более наглядного отображения и удобства создания рис. 2.9.

Для обеспечения качества аддитивного производства используется:

1. Комплексную оценку качества;



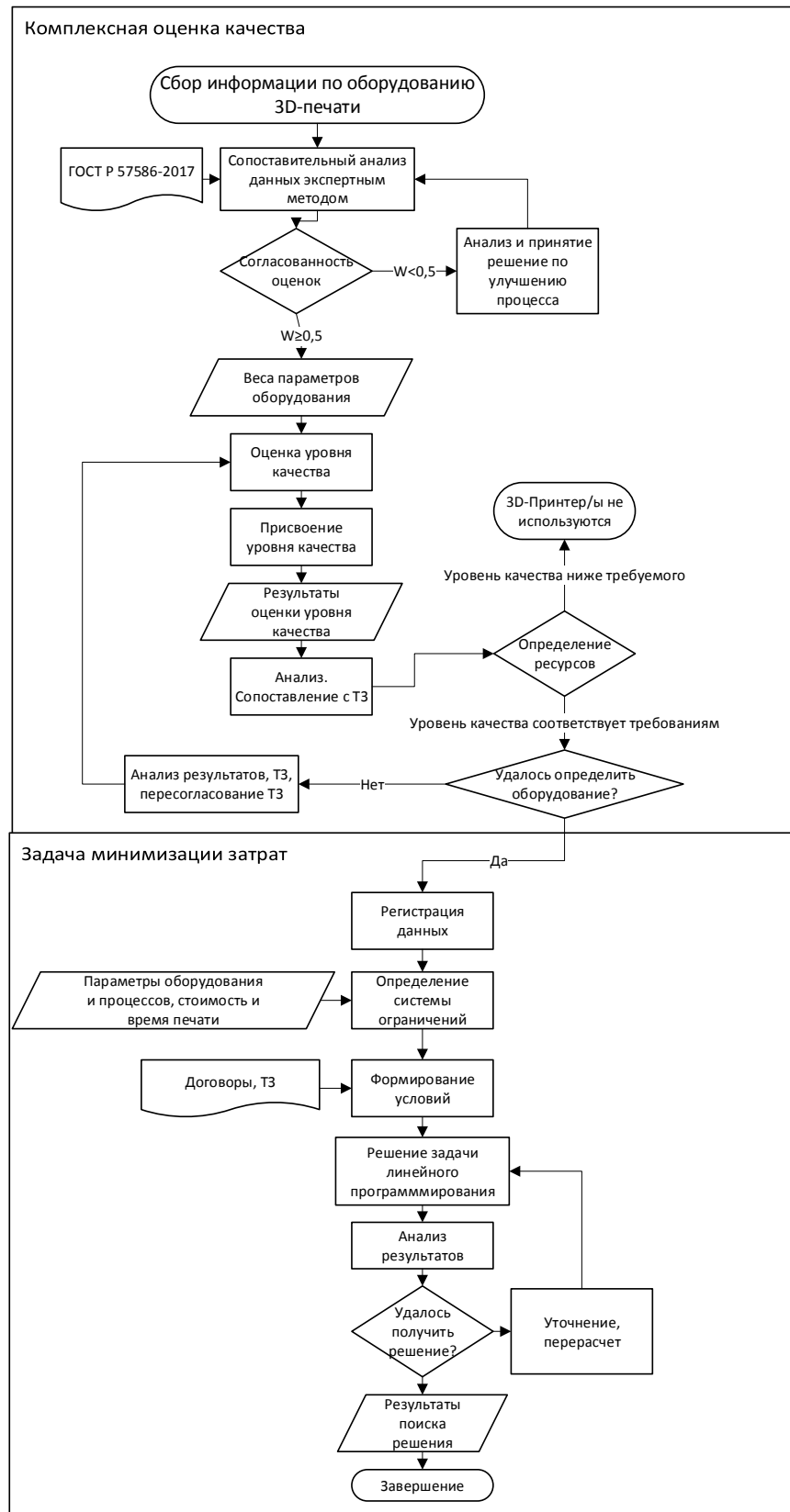


Рисунок 2.9 – Алгоритм обеспечения качества аддитивного производства

Алгоритм позволяет взглянуть на модель обеспечения качества аддитивного производства сверху и понять целостную картину, что она разделена на 2 этапа, которые взаимосвязаны между собой, результаты первого этапа являются

отправной точкой второго, а в конце формируется целостная картина процесса, которая направлена на повышение результативности аддитивного производства, посредством планирования организации процесса производства с учетом требований потребителей к качеству.

Принято считать, что качество объекта проявляется через его свойства (рис. 2.10), то есть через объективные особенности объекта, соответственно для оценки качества аддитивного производства необходимо:

1. определить перечень (номенклатуру) свойств объекта, совокупность которых в достаточной мере характеризует его качество;
2. измерить свойства изделий, выполненных на оборудовании;
3. проанализировать и сопоставить данные с другими изделиями

рис.2.10.



Рисунок 2.10 – Этапы оценки уровня качества аддитивной продукции выполненной при послойном синтезе

Показателем качества продукции называют количественную характеристику одного или нескольких свойств продукции.

Все параметры оцениваемых объектов необходимо привести к виду, когда возможно их сопоставить, то есть к таким величинам, пользуясь которыми можно получить значение уровня качества оцениваемого объекта. Для этого необходимо провести процедуру формализации (нормализации) разнородной информации в безразмерные относительные величины, чтобы была возможность сопоставить анализируемые объекты.

При реализации перцентильного подхода границы норм определяются на основе частных показателей. В общем виде этот набор можно представить в виде множества  $R^z$  ( $z = 1, 2, 3, \dots, 100$ ). В результате получим оценки от 1 до 5.

Количественно величину итогового показателя качества каждого из 3D-принтеров, то есть уровень качества ( $Y_k$ ), можно рассчитать, как среднее арифметическое значение всех уровней учитываемых свойств ( $Y_i$ ), сопоставляемых объектов:

$$Y_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i.$$

Дифференциальный метод оценки качества изделий осуществляется через сопоставление показателей каждого свойства оцениваемого оборудования с соответствующими показателями также оцениваемого оборудования. Этот метод помогает наглядно оценить различия между принтерами, выделить на сколько отличаются параметры.

Для более точной оценки уровня качества при более сложном распределении показателей свойств принтеров необходимо использовать комплексный метод, в котором учитываются коэффициенты весомости. В этом случае формула преобразуется к виду:

$$Y_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \times k_i,$$

где  $k_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го свойства продукции.

Коэффициент весомости  $i$ -го свойства продукции определяется по следующей формуле:

$$k_i = \frac{A_i}{\sum A_i}, \text{ при } \sum k_i = 1,$$

где  $k_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го;  $A_i$  – измеренное значение  $i$ -ой важности свойства;  $\sum A_i$  – суммарное значение  $i$ -ых.

Коэффициент весомости определяется основным методом – экспертным по методу парных сравнений.

Метод предусматривает использование эксперта, который производит оценку показателей. Далее проводятся парные сравнение целей. В каждой выбранной паре выделяется более важный параметр. И это предпочтение выражается с помощью оценки по шкале от 0 до 2, где 2 – если вес первого параметра выше второго, 1 – равнозначны, 0 – обратное 2. Обработка матрицы оценок дает возможность найти веса параметров, которые характеризуют их относительную важность. Нормирование производится путем деления на количество элементов матрицы.

$$Q_n = \frac{\sum q_{ni}}{n^2},$$

где  $Q_n$  – свойство установок послыоного синтеза;  $q_{ni}$  – элемент строки матрицы, оценка по выбранной шкале  $i$ -го свойства.

Оценки экспертов проходят проверку согласованности действий, при помощи коэффициента конкордации.

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)},$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений;

$n$  – общее количество экспертов;

$m$  – общее количество оцениваемых изделий.

Сумма квадратов отклонений рангов ( $S$ ) от среднего:

$$S = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m q_{ij} - \bar{q} \right)^2,$$

где  $q_{ij}$  – оценка в рангах, данная  $i$ -му объекту  $j$ -м экспертом;

$\bar{q}$  – среднеарифметическое значение рангов.

При  $W = 0$  – абсолютная несогласованность, а при  $W = 1,0$  – полное совпадение мнений (оценок). Связь между оценками,  $0 \leq W \leq 1$ .

Величина коэффициента конкордации при  $W = 0$  связь между оценками различных экспертов отсутствует, при  $W = 1$  согласованность является полной, нормативное значение принимается равным 0,5 ( $W_{\text{норм}} = 0,5$ ), при  $W > 0,5$ , что говорит о согласованности экспертов.

Далее из внесённых показателей строится таблица по группам в процентном соотношении при помощи использования перцентильного подхода, исходя из минимального и максимального приведенного значения  $i$ -го объекта  $j$ -го свойства. Значение показателя, полученного ранее по формуле, интерпретируется в бальную шкалу от 1 до 5.

Оценки по формуле находятся с учетом весовых коэффициентов.

Далее выводится средний интерпретированных по пяти балльной шкале оценок показателей по всем параметрам по каждому принтеру, и обобщённая оценка оборудования.

Ниже представлены результаты модели оценки качества, выведенные в качественную шкалу.

В соответствии с «Общими методическими рекомендациями по оценке технического уровня промышленной продукции» образцы промышленной продукции по результатам оценки их типического уровня относятся к одной из градаций, приведенных ниже (табл. 2.15). Что варьирует статистические данные для более качественного анализа.

Таблица 2.15 - Градация промышленной продукции по уровню качества

Процентные интервалы	Бальная шкала	Градация качества продукции	Качественная характеристика продукции
$90\% < Y_k \leq 100\%$	5	Градация П — превосходный (идеал) уровень качества	Высокое качество печати, минимальные погрешности в построении моделей. Изделия 3 группы (ГОСТ Р 57586-2017) Изделия особо ответственного назначения

$75% < Y_k \leq 90%$	4	Градация С — выше среднего уровень качества (высокий)	Изделия 2 группы ответственного назначения, высокое качество печати, малозаметные отличия от первой группы, но не идеальное соответствие
$50% < Y_k \leq 75%$	3	Градация У — удовлетворительный уровень качества (средний)	Изделия общего назначения, удовлетворяет требованиям потребителей и имеет спрос, но уступает первым двум группам, соответствует требованиям
$25% < Y_k \leq 50%$	2	Продукция низкого качества (не удовлетворительный)	Пользуется спросом для изделий, чаще относящихся к моделям, которые изготавливают на этапе проектирования, для примерного анализа и планирования
$Y_k \leq 25%$	1	Некачественная (низкий) продукция	Изделия являются примерным образцом исходной модели, размеры могут отличаться от заданных

Таким образом, получение качественной оценки позволяет реализовать в соответствии с требованиями к характеристикам изделия, заявленным потребителем, выявить аддитивные установки, обладающие необходимыми техническими характеристиками.

## **2.5 Методика выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов**

Методика ограничивается техническими характеристиками, которые указаны в паспортах установок, учитывающие требования потребителей и требования стандартов, но допустима корректировка ряда оцениваемых параметров, алгоритм обеспечения качества и минимизации затрат на расходные материалы, используемые при печати.

Особую актуальность имеет выбор композиционного материала, который будет использоваться в послойном синтезе корпусных элементов РЭА.

Методика выбора полимеров, используемых в процессе филаментизации представлена в (рис. 2.11).

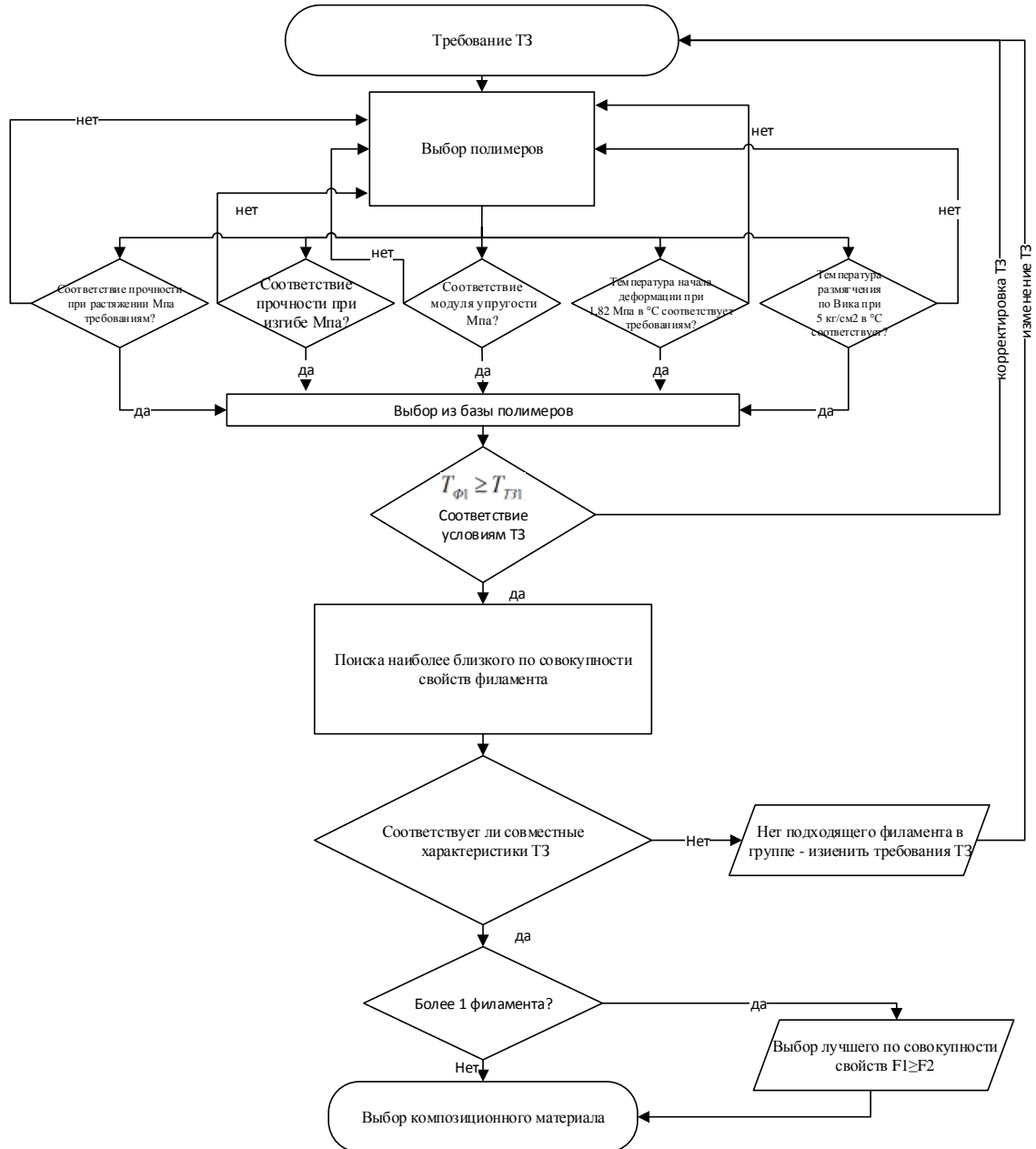


Рисунок 2.11 – Алгоритм выбора композиционного материала

Установлены обязательные требования ТЗ, каждый из которых должен строго соблюдаться: Температура, прочность, модуль и пр. полимера должны превышать или соответствовать числу, указанному в ТЗ. В случае, если не

соблюдается хотя бы одно требование ТЗ, то полимер не может использоваться для филаментизации (рис. 2.11):

Установлены 5 групп для поиска наиболее соответствующего по совокупности своих свойств филамента к требованиям ТЗ:

$$C_F = \begin{cases} \text{Прочность при растяжении Мпа.} \\ \text{Прочность при изгибе Мпа.} \\ \text{Модуль упругости Мпа.} \\ \text{Температура начала деформации С} \\ \text{Температура размягчения Вика С.} \end{cases}$$

Проведён анализ по блокам свойств композиционных  $T_{\phi 1-5}$  материалов и зависимости связующих компонентов при перемешивании с учётом печати различными филаментами на этапе гомогенизации.

$$\begin{aligned} a_1 &= [T_{\phi 1} \geq T_{T31}] \\ a_2 &= [T_{\phi 2} \geq T_{T32}] \\ a_3 &= [T_{\phi 3} \geq T_{T33}], \\ a_4 &= [T_{\phi 4} \geq T_{T34}] \\ a_5 &= [T_{\phi 5} \geq T_{T35}] \end{aligned}$$

где  $T_{\phi}$  – требование к полимеру,  $T_{T3}$  – требование ТЗ

Применяется логическая операция "И", которая позволяет установить 0.

"И"=1(истина), если все операнды равны единицам.

"И"=0(ложь), если хотя бы один операнд равен нулю.

$$C_F = \bigcap_{i=1}^n a_i = 1$$

$$a_i = \begin{cases} 0, \text{ если } x_i < x_{0i} \\ 1, \text{ если } x_i \geq x_{0i} \end{cases}$$

$x_{0i}$  –  $i$  требование ТЗ;

$x_i$  – характеристика полимера, соответствующая  $i$ -му требованию ТЗ.

Операция реализована в ячейке "Пригодности полимера".

Возможны три ситуации:



$$\text{Полимер} = \begin{cases} a_1 - \text{нет подходящего полимера в группе. } T_3 \leq \text{Полимер.} \\ a_2 - \text{только один подходящий полимер в группе полимер.} \\ a_3 - \text{несколько подходящих полимеров в группе. } F_1 \geq F_2 \end{cases}$$

Набор признаков качества выбранных полимеров соответствует характеристикам аддитивного производства и предусматривает возможность корректировать технические характеристики в зависимости от требований к корпусам РЭА.

Для контроля над процессом производства и определением качества объекта рассчитана величина интегрального показателя ресурсоэффективности на основе физических свойств корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям.

## **2.6 Дополнение номенклатуры показателей качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям**

При выборе номенклатуры показателей качества устанавливался перечень наименований количественных характеристик свойств корпусных элементов, выполненных по аддитивным.

Качество конструктивного элемента, выполненного послойным наплавлением полимера, базируется на точности исполнения и свойствах полимера.

Классифицирование высокомолекулярных соединений имеет возможность изготавливаться сообразно разным показателям, познание каких даёт возможность заполучить ценнейшие сведения о текстуре и главных параметров показателей соединений и композиций, приобретенных на их базе был применён инструмент управления качеством для установления причинно-следственных связей рис. 1.22 [92,93,94].

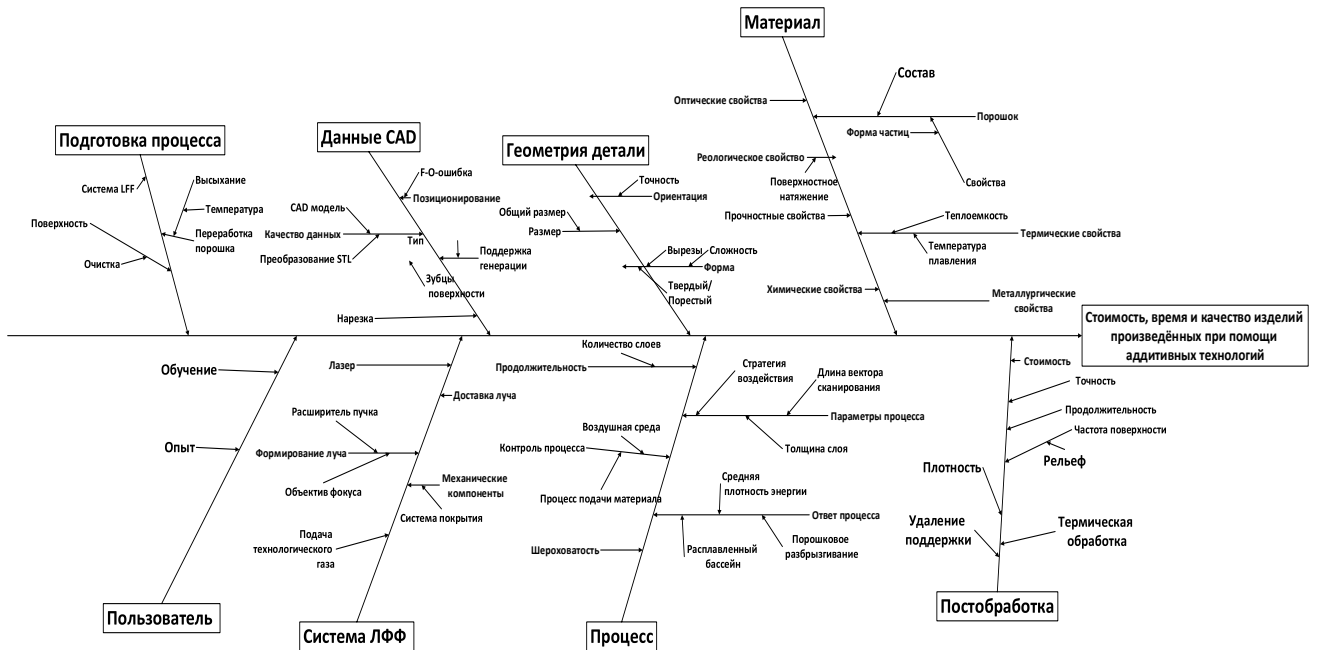


Рисунок 2.12 – Причинно-следственные связи качества изделий произведённым при помощи аддитивных технологий полная версия

Проведённый анализ позволил выделить показатели качества полимеров применяемых в производстве корпусных элементов ПРИЛОЖЕНИЕ Е.

Произведённое структурирование показателей качества позволило выделить наиболее важные показатели качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям: изгиб, плотность, водопоглощение, ударная вязкость, прочность при сдвиге в плоскости листа.

Структурирование показателей качества позволило выделить основные взаимосвязь требований и свойств полимеров (табл. 2.16).

Таблица 2.16 – Показатели качества полимеров выявленных при помощи структурирования ПК для аддитивных технологий

Показатель качества	Базовое значение	Нормируемый документ
Испытание на статический изгиб:	117,6Мпа	ГОСТ 50598-93
Плотность:	1,4г/см <sup>3</sup>	ГОСТ 9590-76
Ударная вязкость по Шарпи:	8,8 кгс·см/см <sup>2</sup>	ГОСТ 50598-93
Водопоглощение:	186мг	ГОСТ 50598-93
Ударная вязкость по Изоду:	0,075Дж/мм	ГОСТ 50598-93
Прочность при сдвиге в плоскости листа:	250Мпа	ГОСТ 9590-76
Предел прочности при сжатии:	98Мпа	ГОСТ 9590-76

Количественная оценка показателей качества пластмассы и стандарты применяемые при оценке.

Таблица 2.17 – Оценка уровня качества корпусных элементов

№	Наименование показателя	Формула	Единица измерения	Расчетное значение показателя	Значение базового показателя	Уровень качества	ГОСТ
1	Испытание на статический изгиб	$s_f = \frac{3F \cdot L_v}{2bh^2}$	МПа	115,24	117,6	0,979	ГОСТ 4648-71
2	Плотность	$\rho_t = M/V$	г/см <sup>3</sup>	1,372	1,4	0,98	15139-69
3	Ударная вязкость по Шарпи	$\alpha_n = \frac{A_n}{b \cdot s} \cdot 10^3$	кгс·см/см <sup>2</sup>	8,624	8,8	0,98	ГОСТ 4650-80,
4	Водопоглощение	$x = m_2 - m_1$	Мг	182,28	186	0,98	ГОСТ 50598-93
5	Ударная вязкость по Изоду	$a = A/b$	Дж/мм	0,0735	0,075	0,98	ГОСТ 50598-93:
6.	Прочность при сдвиге в плоскости листа	$\tau_B = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{P_{max}}{a \cdot h}$	МПа	245	250	0,98	ГОСТ 24778-81
7.	Предел прочности при сжатии	$\sigma_{сж} = \frac{P_{max}}{S}$	МПа	96,04	98	0,98	ГОСТ 23206-78
	Итого по изделию					0,979	Соответствие

Анализируя данную таблицу, можно сделать вывод, что пластмасса, которая была использована для оценки уровня качества, соответствует всем требованиям, которые прописаны в нормативных документах.

Произведен анализ показателей качества, оказывающих влияние на технологический процесс аддитивного производства, с учётом специфики проектирования и изготовления корпусных элементов РЭА.

Благодаря произведённому моделированию стало возможным дополнить номенклатуру показателей в рамках физико-механических свойств полимеров, применяемых в аддитивном производстве.

Дополненная номенклатура показателей качества, учитывает особенности аддитивного производства и композиционных материалов в форме

дополнительных свойств композиционных материалов с учётом специфики аддитивного производства.

Проведённый анализ показал, что текущие показатели качества не учитывают особенности аддитивных технологий по прочностным показателям композиционных материалов и температурным режимам.

Таблица 2.18 – Дополненные показатели качества полимеров для аддитивного производства

№	Показатель полимера	Вид показателя	Гос. стандарт на базовые требования
1	Прочность при растяжении	Мпа	ГОСТ Р 57556–2017
2	Прочность при изгибе	Мпа	ГОСТ Р 57556–2017
3	Модуль упругости	Мпа	ГОСТ Р 57556–2017
4	Температура начала деформации при 1,82 Мпа	в °С	ИСО/ASTM CD 52903–2
5	Температура размягчения по Вика при 5 кг/см <sup>2</sup>	в °С	ИСО/ASTM CD 52903–2

Использование аддитивных технологий в процессе производства корпусных элементов позволяет практически полностью исключить этап изготовления опытных образцов и изделий вручную или на традиционных станках с ЧПУ, а также разработку технологической оснастки, сокращая сроки подготовки производства новых изделий на 50 – 80 %.

Сравнение значений интегральных показателей различных технологий подтверждает преимущества аддитивных технологий в производстве корпусных элементов РЭА с позиции функционирования установки и ресурсной эффективности.

Выявление числовых значений частных показателей производственных процессов аддитивного производства. Предлагаемые частные показатели учитывают принципы и особенности аддитивного производства.

Для снижения уровня дефектности с помощью диаграммы причинно-следственных связей разработаны и реализованы корректирующие мероприятия

по изменению физических характеристик корпуса в технологической документации и корректировке температурного режима.

Ввиду неполного охвата особенностей цифрового производства разработан стандарт организации, учитывающий все технологические особенности аддитивных технологий и требования современной РЭА [98].

Для управления качеством технологического процесса установлена зависимость между показателями качества и результатом процесса.

Основная цель метода статистического контроля технологического процесса выявление и идентификация ключевых показателей качества рис.2.13.

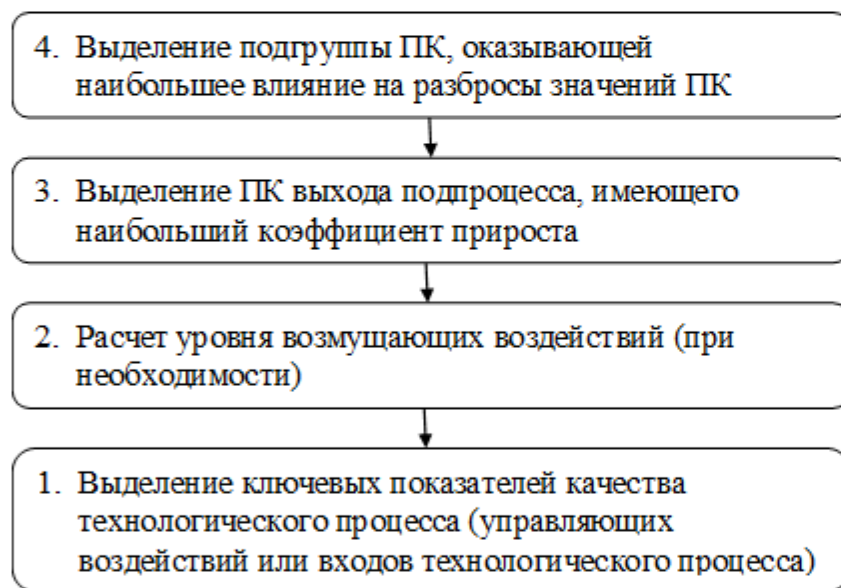


Рисунок 2.13 – Схема установления зависимости между показателями качества и определения ключевого показателя качества

Начальным этапом является выявление, группы показателей качества, оказывающие наибольшее влияние на качество готового изделия.

Это позволит реализовать метод мониторинга и статистического управления технологией послойного синтеза базируясь на конструктивных особенностях принтера рис. 2.14.

Уровни качества выделены на основе непрерывных величин и дискретных величин табл. 2.19 [91].

Таблица 2.19 – Регистрация уровней показателей качества управляющих воздействий

Обозначение	Наименование управляющего воздействия	Значение для уровня		
		1	2	3
ASA-пластик	Температура полимера	160°C	200°C	240°C
АБС EG-пластик	Температура полимера	210°C	225°C	250°C
АБС HG-пластик	Температура полимера	220°C	212°C	260°C
АБС MP-пластик	Температура полимера	200°C	210°C	220°C
АБС 2020-пластик	Температура полимера	190°C	200°C	260°C

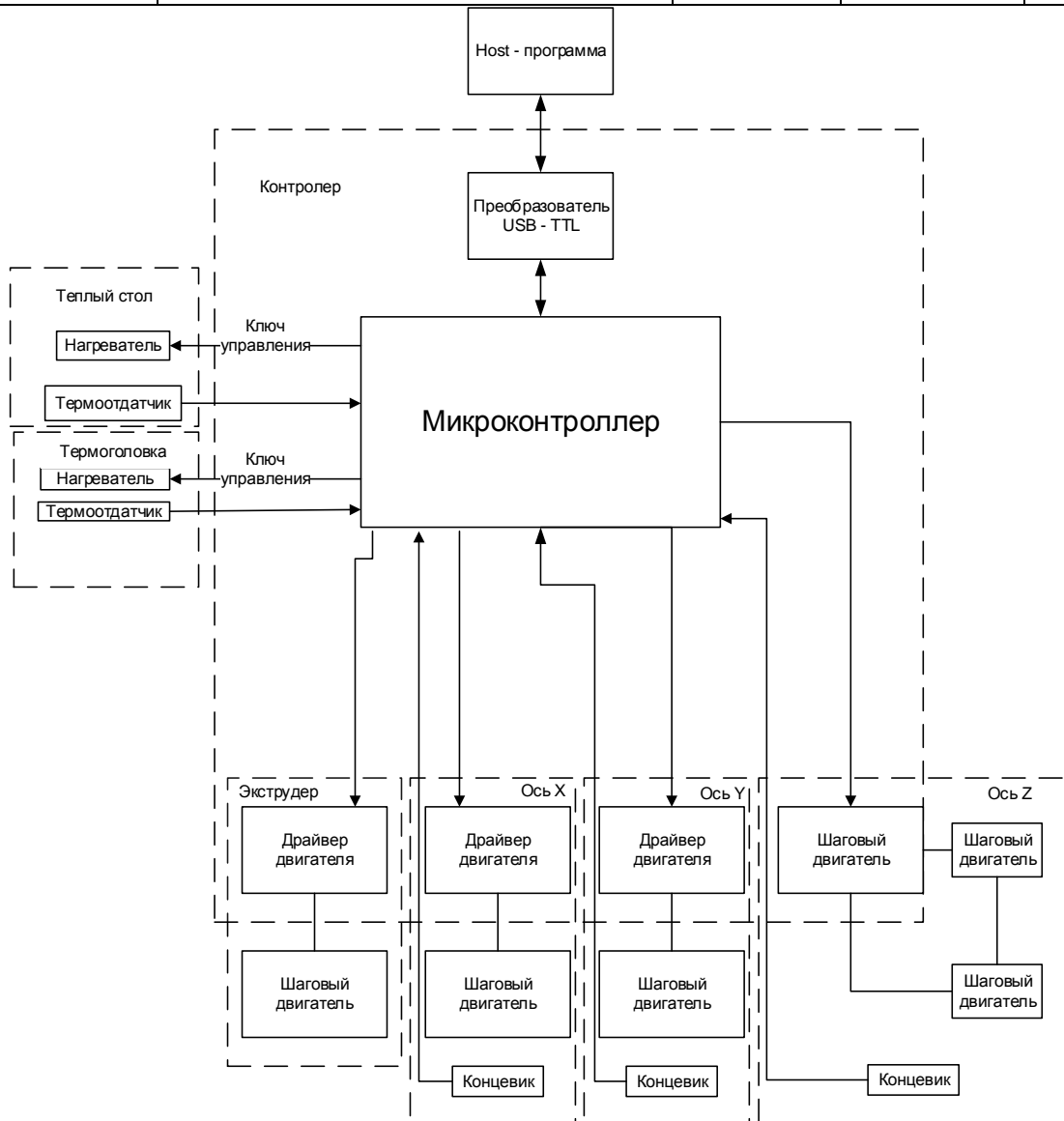


Рисунок 2.14 – Схема управление процессом 3D печати

Для анализа управляющих воздействий на процессы, имеющих наибольший коэффициент прироста, применено робастное проектирование для ПК «Точность печати». Ниже приведен результат этого исследования.

На основе определённых ПК используемого оборудования для 3D-печати и определены их весовые коэффициенты.

В паспортах различных 3D-принтеров принято описывать ограниченный ряд технических характеристик, которые можно сравнивать, но они в полной мере не могут охарактеризовать оборудование и качество изделий на выходе. Согласно основным требованиям потребителей и требованиям стандартов дополним ряд параметров 3D-принтеров, что позволит лучше оценить уровень качества каждого принтера. Данные могут быть собраны опытным путем или на базе имеющихся опытных данных для дополнения таблицы параметров.

В лаборатории представлено три принтера с различными характеристиками и технологиями (табл. 2.20)

Таблица 2.20 - Показатели качества 3D-принтеров лаборатории

Показатели Виды принтеров	Точность построения (позиционирования), мм	Толщина слоя, мм	Разрешение по элементам (диаметр "пикселя" (капли/пятна лазера)), мм	Скорость печати, мм/ч
Picaso 3d designer pro 250	0,011	0,05	0,3	300
3D принтер Formlabs The Form 2	0,14	0,025	0,14	240
3D принтер Hercules Mini	0,02	0,02	0,5	150

Для приведения показателей к общему виду, чтобы располагать возможностью их сравнения, проведена нормализация.

При использовании перцентильного подхода границы ситуативных норм определяются для статистик каждого признака на основе расчета значений произвольного набора перцентилей.

Таким образом, получение качественной оценки позволяет в зависимости от требований потребителя в соответствии с необходимыми качественными характеристиками продукции выбрать те 3D-принтеры, которые обеспечат необходимое качество, то есть выше или равное указанному в требованиях.

Далее из внесённых показателей автоматически при помощи возможностей программы Microsoft Excel строится таблица по группам в процентном соотношении, а также минимальные и максимальные показатели (табл. 2.21). При этом, учитывая характер параметра, для удобства зеленым выделены те значения, которые в приведенной таблице являются лучшими, от этого зависит также в последующем градация по процентам.

Таблица 2.21 – Максимальные и минимальные показатели с процентным соотношением

Показатели		Точность построения (позиционирования)	Толщина слоя	Разрешение по элементам (диаметр "пикселя" (капли/пятна лазера))	Скорость печати
М а х	М а х	0,140	0,050	0,500	300,000
М in	М in	0,011	0,020	0,140	150,000
90%		0,024	0,023	0,176	285,0
75%		0,043	0,028	0,230	262,5
50%		0,076	0,035	0,320	225,0
25%		0,108	0,043	0,410	187,5

В соответствии с градацией промышленной продукции по уровню качества получают оценки путем интерпретации численных характеристик в бальную шкалу от 1 до 5 (табл. 2.22).

Таблица 2.22 – Перцентильные эквиваленты

Эквиваленты				
Показатели	Точность построения	Толщина слоя	Разрешение по элементам	Скорость печати
Picaso 3d designer pro 250	5	1	5	5
3D принтер	1	5	5	3



Formlabs The Form 2				
3D принтер Hercules Mini	5	5	1	1

Например, для принтера «3D принтер Hercules Mini» точность построения равна 0,02 мм. 0,2 входит в интервал между значениями (табл. 2.25) 0 и 0,24, соответственно  $100 > 0,02 > 90\%$ .

Для более точной оценки уровня качества использован комплексный метод, в котором учитываются коэффициенты весомости. Пример расчета уровня свойства «точность построения» с учетом весового коэффициента для принтера «Picaso 3d designer pro 250»:

$$Y_{k11} = Y_{11} \times k_{11} = 5 \times 0,4 = 2.$$

Результаты оценки аддитивных установок приведены ниже (табл. 2.23):

Таблица 2.23 – Результаты расчетов уровней свойств установок 3D-печати

Параметр	Точность построения (позиционирования)	Толщина слоя	Разрешение по элементам (диаметр "пикселя" (капли/пятна лазера))	Скорость печати
Веса	0,40	0,27	0,17	0,17
Виды принтеров				
Picaso 3d designer pro 250	1,98	0,27	0,83	0,83
3D принтер Formlabs The Form 2	0,40	1,35	0,83	0,50
3D принтер Hercules Mini	1,98	1,35	0,17	0,17

Для сведения к удобному виду для градации по привычной пятибалльной шкале используем уже знакомый механизм нормализации при помощи перцентильного подхода (табл. 2.24):

Таблица 2.24 – Данные для перевода оценок свойств качества установок в пятибалльную шкалу

Параметр	Точность построения	Толщина слоя	Разрешение по элементам	Скорость печати	Среднее
Picaso 3d designer pro 250	1,98	0,27	0,83	0,83	0,98
3D принтер Formlabs The Form 2	0,40	1,35	0,83	0,50	0,77
3D принтер Hercules Mini	1,98	1,35	0,17	0,17	0,92
Максимальное значение					0,98
Минимальное значение					0,77

После определения минимума и максимума определяются интервалы для нахождения интегрального показателя для каждого свойства принтера (табл. 2.25).

Таблица 2.25 – Зоны нахождения комплексного показателя

Интервалы по перцентильному подходу		Процентные интервалы	Интервалы оценок уровней свойств	Бальная шкала
100%	1	$90\% < Y_k \leq 100\%$	$0,96 < Y_k \leq 1$	5
90%	0,96	$75\% < Y_k \leq 90\%$	$0,93 < Y_k \leq 0,96$	4
75%	0,93	$50\% < Y_k \leq 75\%$	$0,88 < Y_k \leq 0,93$	3
50%	0,88	$25\% < Y_k \leq 50\%$	$0,82 < Y_k \leq 0,88$	2
25%	0,82	$Y_k \leq 25\%$	$Y_k \leq 0,82$	1

В соответствии с полученными интервалами выводятся итоговые комплексные оценки качества свойств. Количественно величину итогового показателя качества каждого из 3D-принтеров, то есть уровень качества ( $Y_k$ ), рассчитывается как среднее арифметическое значение всех уровней учитываемых свойств, которая для удобства интерпретируется в качественный вывод о прогнозируемом качестве изделий (табл. 2.26) [55].

Таблица 2.26 – Комплексные показатели

Параметр	Точность построения	Толщина слоя	Разрешение по элементам	Скорость печати		
Виды принтеров	Эквиваленты				Среднее	Вывод
Picaso 3d designer pro 250	5	1	3	3	3,00	норма
3D принтер Formlabs The Form 2	1	5	3	1	2,50	не удовлетворительное
3D принтер Hercules Mini	5	5	1	1	3,00	норма

Полученные оценки также подразумевают анализ полученных данных для последующих улучшений процессов, для удобства часто применяется визуализация рис. 2.15 и 2.16 [55].

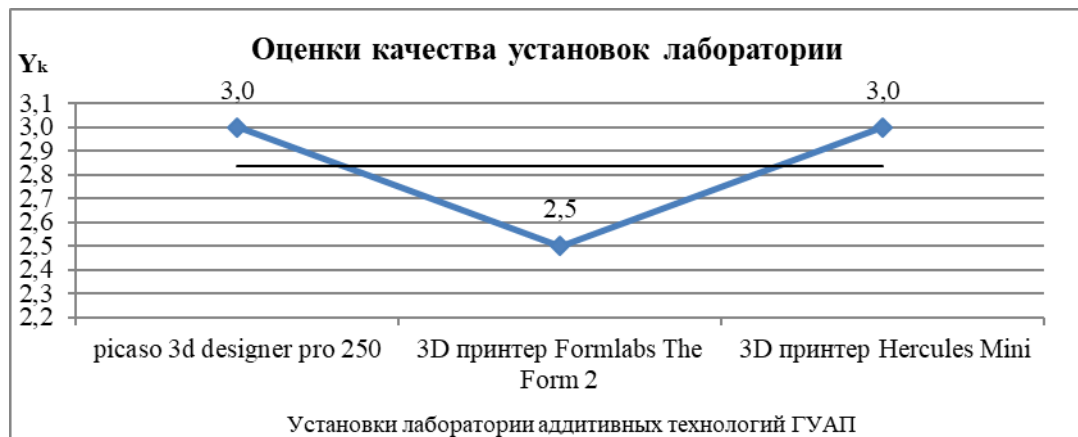


Рисунок 2.15 – Оценки качества установок лаборатории аддитивных технологий ГУАП

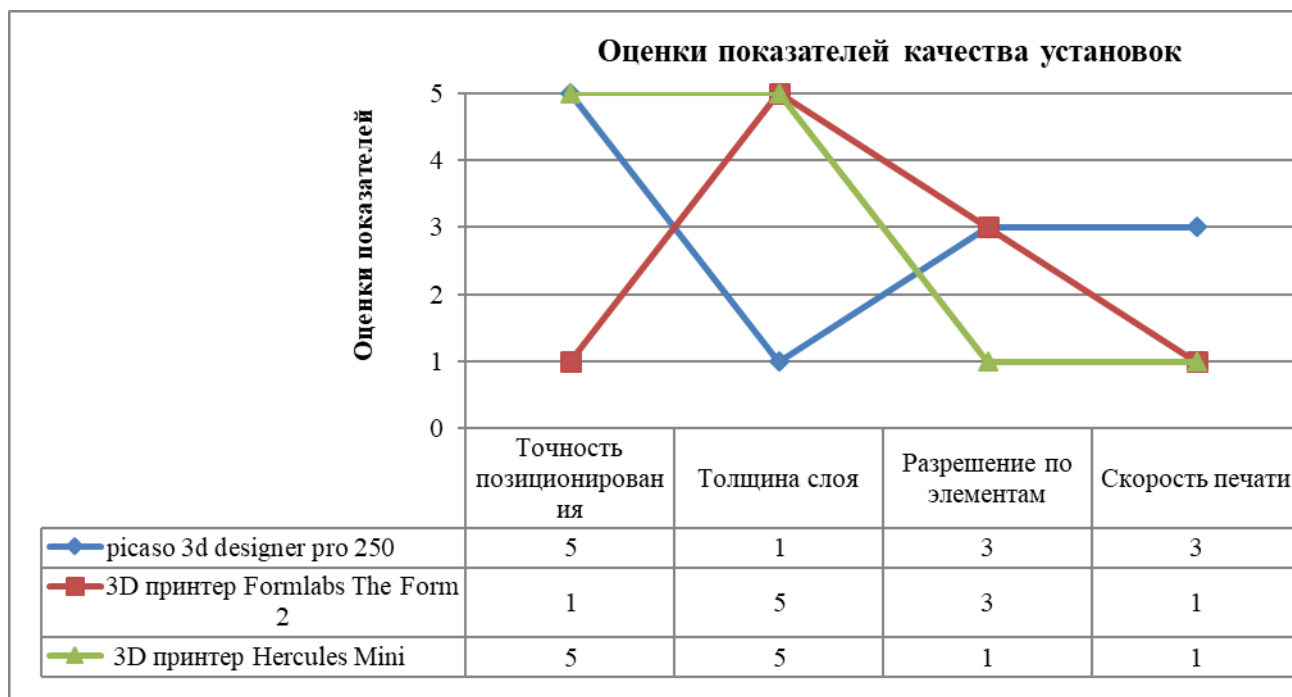


Рисунок 2.16 – Наглядное изображение оценок показателей

Результаты сравниваются с заданным техническим заданием и решается задача минимизации затрат с учетом того, какие принтеры удовлетворяют качеству, требуемому заказчиком (табл. 2.27).

Таблица 2.27 – Результаты модели оценки качества видов 3D-принтеров

Виды принтеров	Качественная оценка	ТЗ	Отвечает ТЗ
Picaso 3d designer pro 250	норма	норма	+
3D принтер Formlabs The Form 2	не удовлетворительное		-
3D принтер Hercules Mini	норма		+
Количество принтеров, отобранных для производства			2

Таким образом, получены качественные оценки, которые позволили в соответствии от требованиями ТЗ выбрать два 3D-принтера из трех, которые обеспечат необходимое качество, то есть выше или равное указанному в требованиях.

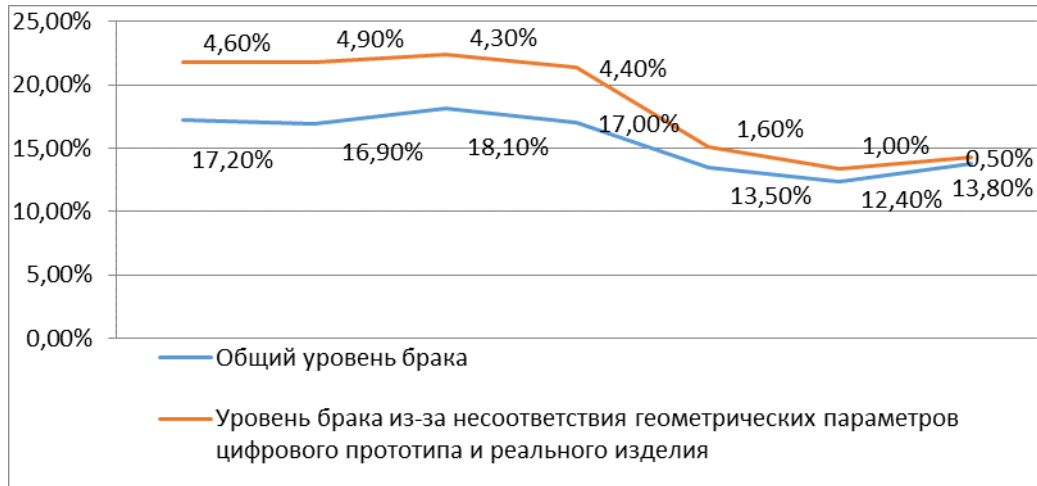


Рисунок 2.17 – Анализ уровня несоответствий печати в зависимости от корректировки температуры сопла

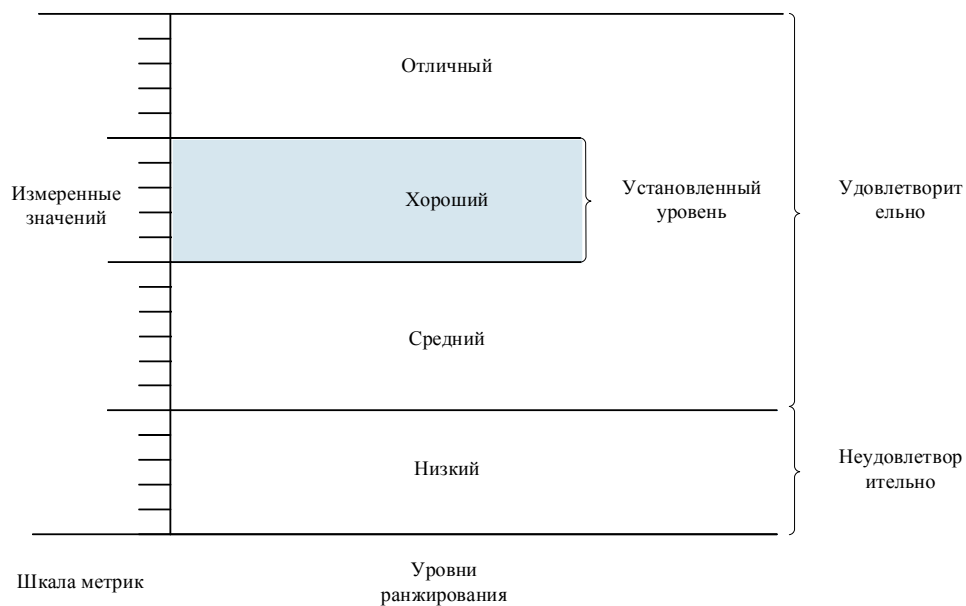


Рисунок 2.18 – Измеренное значение и установленный уровень

## Результаты и выводы по главе 2

1. Разработана процедура оценки экологичности МПН.
2. Проведен анализ требований потребительского сектора. Выявлены основные параметры, которые, по мнению потребителей и производителей оборудования и изделий на аддитивном производстве, влияют на качество производимых изделий методом послойного синтеза. Рассмотрены требования к

аддитивным технологиям, которые регламентированы государственными стандартами. Было выявлено, что существующие стандарты не описывают и не конкретизируют требования к качеству процессов, материалов, оборудованию и изделиям аддитивного производства. В связи с этим предложена градация уровня качества для обеспечения единого представления о необходимом качестве изделий заинтересованными сторонами.

3. Разработка формализованной процедуры обеспечения качества сложнопрофильных поверхностей корпусных элементов РЭА, в основе которой лежит комплексная оценка качества, позволяющая обеспечить качество процесса, что приведет к повышению результативности процесса аддитивного производства и качественным изделиям на выходе, которые удовлетворяют требованиям потребителей.

4. Проведена экспертная оценка весовых коэффициентов показателей качества процесса производства методом послойного синтеза. Полученные результаты отвечают требованиям согласованности и достоверности. Выбрано технологическое оборудование для процесса производства корпусных элементов РЭА.

5. Создана методика выбора подходящего полимера для композиционного материала.

### 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОСЛОЙНОГО НАЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ НИТИ

#### 3.1 Структурирование показателей качества корпуса РЭА, влияющих на эксплуатационные свойства

Для выявления наиболее важных показателей качества корпусных элементов РЭА выполненных по аддитивным технологиям, реализована процедура СФК, включающая в себя следующие этапы развертывания функций качества (Quality Function Deployment – QFD) собой системный подход к проектированию, основанный на четком понимании желаний потребителей. В целях поддержания уровня качества продукции и его повышения разработано множество подходов, одним из которых является QFD-методология. Суть данной методологии заключается в построении матрицы «дома качества», в которой отражаются структурированные преобразования основополагающих характеристик продукции, исходя из потребительских предпочтений.

Структурирование функций качества производилось на основе данных исследования полимеров представленных в Приложении Г.

Для развёртывания функций качества произведено определение степени корреляции между качественными показателями и требованиями потребителей.

Комплексный показатель качества представляет собой сумму нормированных частных материальных показателей со своими «весовыми» коэффициентами, или коэффициентами значимости параметра для суммарного качества изделия:

$$K = j_m m_0 + j_v V_0 + j_L L_0 + j_p P_0 + j_c C_0 + j_T T_0$$

где  $m_0, V_0, L_0, P_0, C_0, T_0$  – нормированные значения материальных параметров относительно заданных по техническому заданию (ТЗ), либо отношения этих материальных параметров для разных сравниваемых вариантов конструкции;

Интегральная оценка аддитивного производства включает ряд критериев: полимеры из которых производится корпус РЭА, тип аддитивной установки, технологические режимы печати, данные САД, пользователь, постобработка. Интегральная оценка аддитивного производства описывается выражением

$$IE = F(I_{n.m.}, I_{m.a.y.}, I_{m.p.}, I_{cad.p.}, I_n., I_{nocm.o.})$$

где  $I_E$  – интегральный критерий – функция частных критериев.

$$I_i = F(I_{1h} \dots I_{6h})$$

где  $I_{ih}$  – основные установленные критерии;

$h$  – количество основных критериев.

Основные критерии являются функциями дифференциальных критериев

$$I_{vh} = F(Q_{vh1} \dots Q_{vhg}),$$

где  $Q_{vh1}$  – дифференциальные критерии;  $g$  – общее количество дифференциальных критериев.

Для реализации СФК выявлены потребительские требования и технические характеристики РЭА, которые в последствии сопоставлены друг с другом для нахождения связи между ними.

В результате получена основа СФК, изображенная на (рис. 3.1).



Требуемое качество	Качественные характеристики																								
	Прочность при растяжении МПа	Прочность при изгибе МПа	Модуль упругости МПа	Ударная вязкость по Изаду 1А, 1В <sup>0</sup> (ударном) Дж/м	Материал	Твердость по Роквеллу R <sub>ц</sub> шкала	Температура начала деформации при 1,5Н МПа в С	Температура размягчения по Вика при 5 кгсм <sup>2</sup> в С	Плотность при 23 С в г/см <sup>3</sup>	Показатель качества расплава при 220 С в 10 мин в С	Усадка при 23 С в %	Степень стойкости к горению в НВ	Массовая доля воды, не более	Блеск в %	Массовая доля легучих веществ менее	Относительное удлинение при разрыве не менее %	Ударная вязкость по Шарпи, образец типа 2 с надзором типа В при 23 С	Ударная вязкость по Шарпи, образец типа 2 с надзором типа В при -30 С	Температура изгиба под нагрузкой не менее С	Технология производства	Массовая доля остаточных мономеров стирола ларинитрила	Способ формирования корпуса	Диаметр нити	Диаметр сотла, мм	Количество эструдеров
Стоимость производства	○	○	○									▲	▲	▲					○						○
Материал	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
Требования к доработке поверхностей	○				○									○						○		○	○	○	
Ускорение производства																				○					
Диаметр опорной поверхности		▲			○								○							○					
Высота слоя																				○			○	○	○
Низкая истираемость краски					▲									▲						○			○	○	○
Точность позиционирования				○												▲				○		○	○		
Возможность заложить в конструкцию DIN рейку																				○					
Объем производства															▲					○			○	○	○
Скорость печати					▲			▲		▲				▲						○			○	○	○
Объем корпуса					▲					○					▲						○		▲	▲	
УФ защита					○	▲							○												
Шероховатость поверхностей										○							▲	▲							
Теплопроводность материала					○			○		▲									○			▲			
Металлический корпус	○	○	○																○						
Пластиковый корпус					○			▲	○											○					
Комбинированный корпус																				○					
Литой корпус из пластмасс	▲				○									▲			○			○			▲	▲	
3D модель корпуса и контроль					▲															▲		○			
Степень защиты от проникновения (Влаго-пыле защита)					▲			▲				▲								▲		▲			
Сложность конструкции					○						▲									○		○			
Ударопрочность	○	○	○	○	○	○												○	○		▲				
Навесные конструкции																				○		○	○	○	○
Теплопроводность	▲				○								○							○		○	○	○	○

Рисунок 3.1 – Матрица зависимостей «потребительские требования – технические характеристики» корпусов РЭА

После построения матрицы зависимости, установлены связи между техническими характеристиками (рис. 3.2) [100].

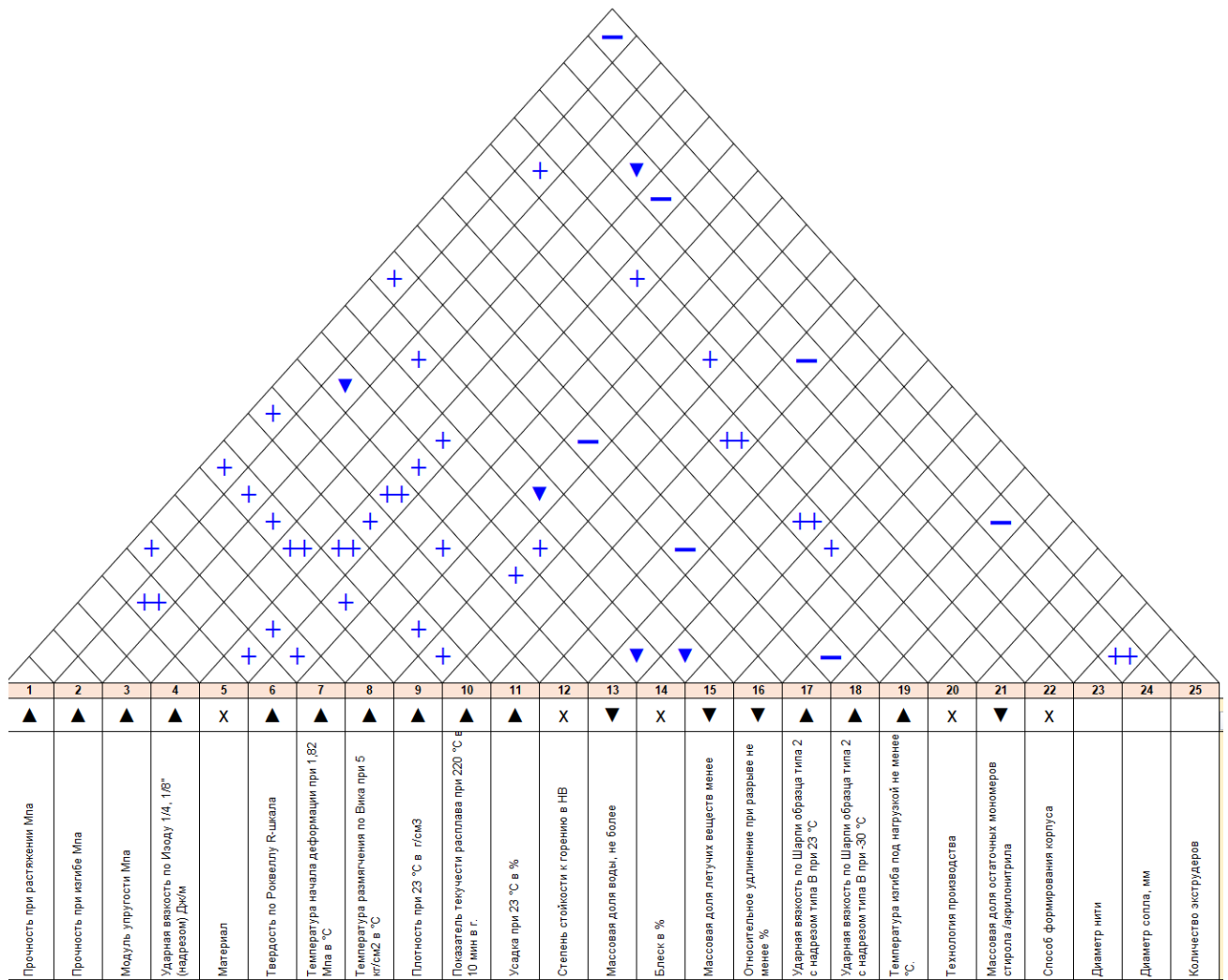


Рисунок 3.2 – Матрица зависимостей связи между техническими характеристиками корпусных элементов РЭА

После построения «крыши», рассчитывается абсолютный вес характеристики, используя сумму произведений каждого потребительского требования (рейтинг критерия) на вес связи. Полученный «подвал» и его значения можно посмотреть в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Расчёт абсолютного веса характеристик корпусных элементов РЭА

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Целевое или предельное значение	49	63	2500	390 и 620	130	92	109	1,2	14	0,5	1,9
Сложность (0 = простота в выполнении, 10 = чрезвычайно сложная)	8	4	5	6	8	9	7	7	9	5	5
Максимальное значение связи в столбце	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Вес/значение	123,3	114	111,6	132,6	250,4	86	62,8	62,8	137,2	69,8	102,3
Относительный вес	3,8	3,5	3,4	4	7,6	2,6	1,9	1,9	4,2	2,1	3,1



В результате проведенного СФК построено Дерево показателей качества и безопасности корпусных элементов рис. 3.4.

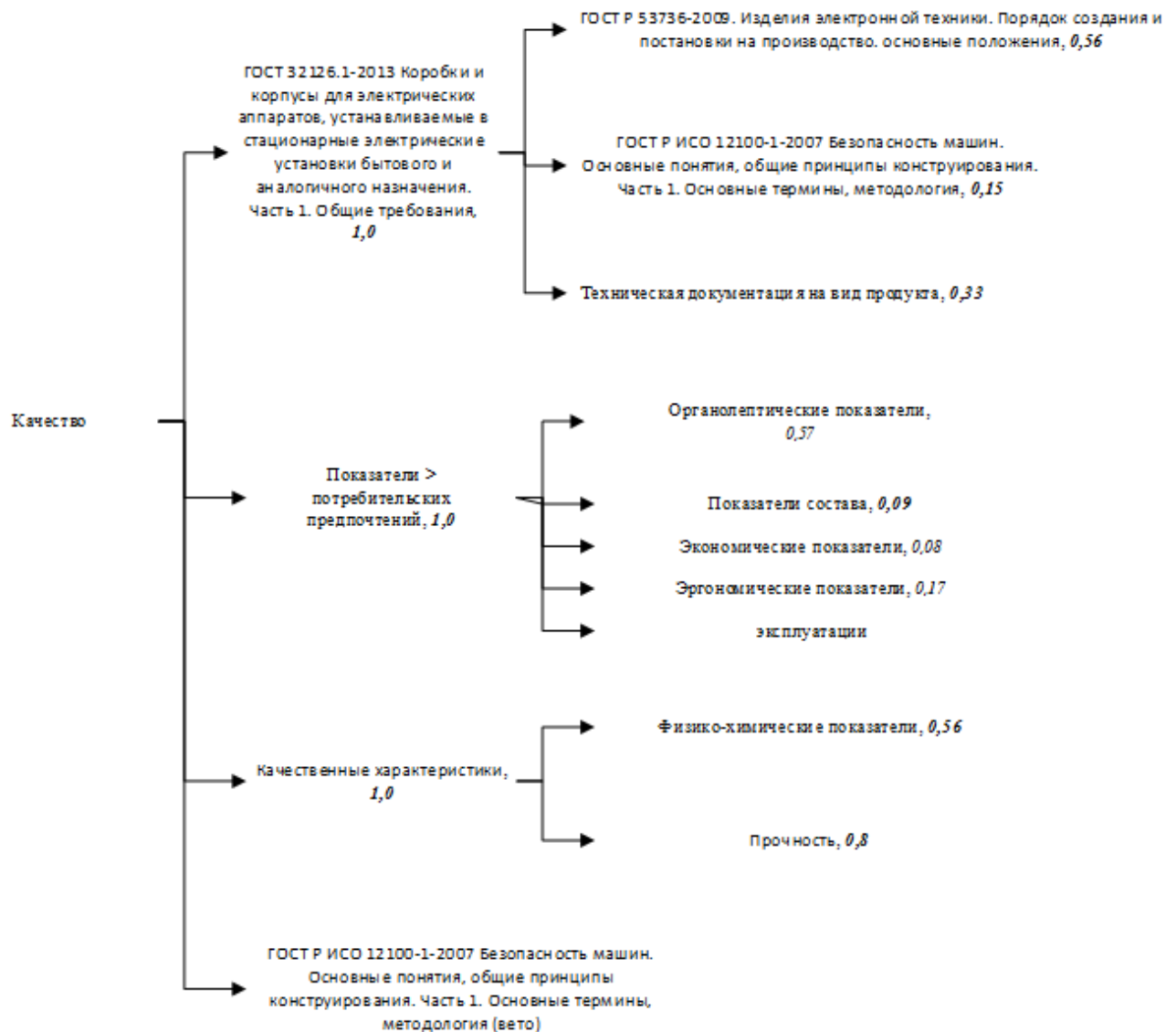


Рисунок 3.4 – Иерархическое дерево показателей качества и безопасности корпусных элементов

В рассматриваемом примере определены 25 технических характеристик корпуса РЭА на основе МПН, связанные с требованиями к корпусам РЭА, а именно: массовая доля нелетучих веществ; условная вязкость; степень перетира; твердость; прочность покрытия при ударе; эластичность при изгибе; адгезия;

стойкость покрытия к статическому воздействию; цвет; морозостойкость; термостойкость.

Успех проектирования корпуса РЭА определяется правильным выбором значений этих технических характеристик.

Рекомендации по улучшению корпуса РЭА на основе МПН – использовать сопло большего диаметра [103].

### **3.2 Методы управления качеством формования корпусных элементов РЭА**

Управление качеством технической продукции базируется на оценке показателей качества конечного изделия и оборудования, применяемого для производства.

Разработанное иерархическое дерево свойств на основе описанных моделей было использовано на базе лаборатории аддитивных технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

На данном этапе необходимо определить набор измеряемых показателей качества аддитивного производства для дальнейшей оценки результативности модели обеспечения качества.

В паспортах различных 3D-принтеров принято описывать ограниченный ряд технических характеристик, которые можно сравнивать, но они в полной мере не могут охарактеризовать оборудование и качество изделий на выходе. Согласно основным требованиям потребителей и требованиям стандартов дополним ряд параметров 3D-принтеров, что позволит лучше оценить уровень качества каждого принтера. Данные могут быть собраны опытным путем или на базе имеющихся опытных данных для дополнения таблицы параметров.

В диссертационной работе исследовались полимеры различных групп. ABS пластик – который используется в промышленности. Его полное название – акрилонитрилбутадиенстирол. Это смола, которая образована акрилонитрилом, стиролом и 1,3-бутадиеном с различными дополнениями и разными свойствами.

И пластик группы PLA представляет собой биоразлагаемый материал, полученный из возобновляемых ресурсов, таких как кукурузный крахмал. Он содержит множество свойств, которые делают его подходящим для 3D печати (рис. 3.5).

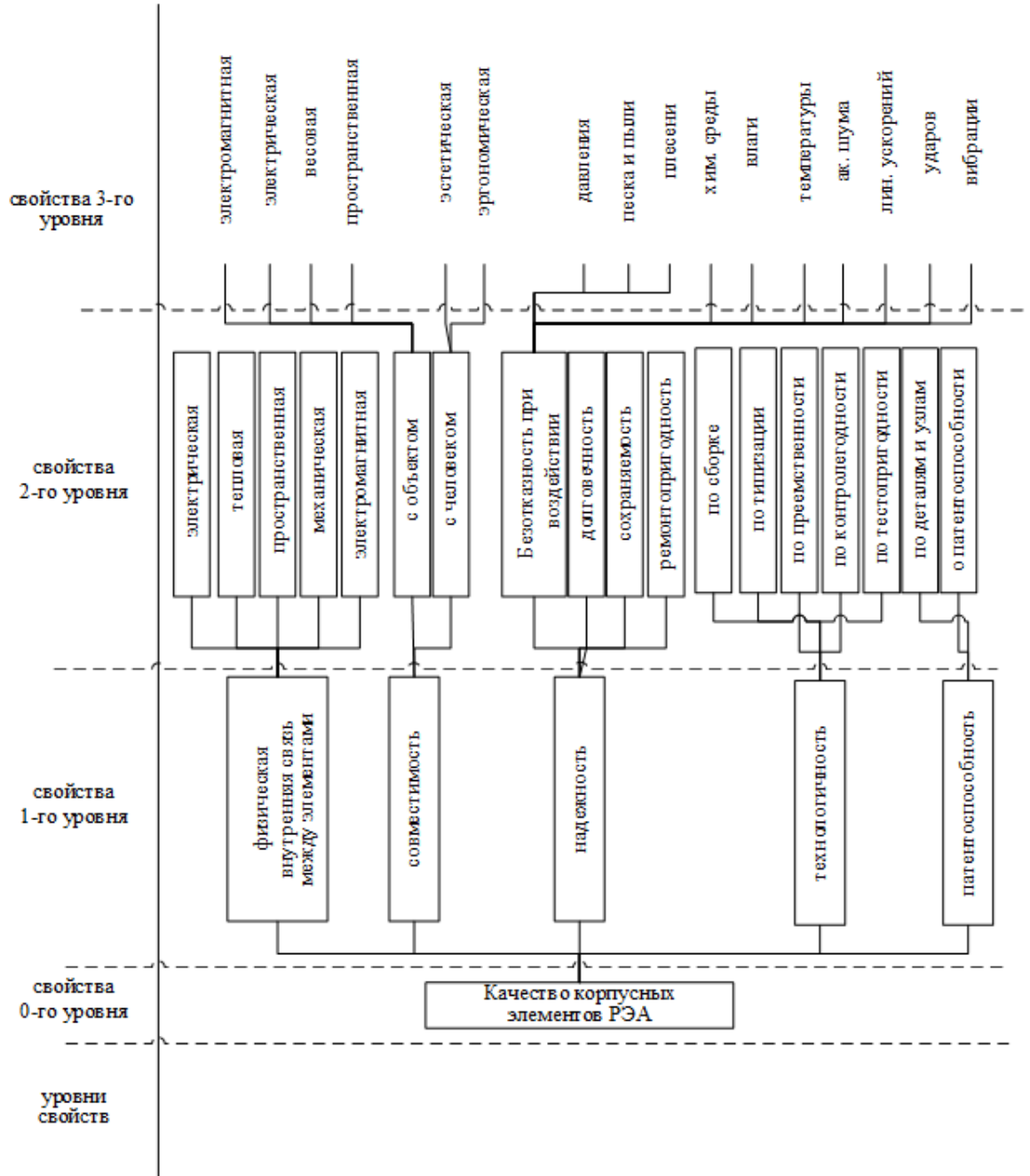


Рисунок 3.5 – Иерархическое дерево свойства корпусных элементов РЭА

Разработчиками полимеров рекомендованы следующие режимы печати:

Ресурсы:

- Модель принтера: PICASO Designer PRO 250.

- Модель: корпус РЭА.
- Диаметр сопла: 0.3 мм.
- Материал: PLA-пластик.
- Метод повышения адгезии: клей для 3D печати.
- Слайсер: KISSlicer.

Настройки печати [104]:

- Температура печати: 215°C.
- Толщина слоя: 0.1 мм.
- Заполнение: 20%.
- Скорость печати: 15 мм/с.
- Скорость заливки полостей: 160 мм/с.
- Охлаждение модели: Да.
- Поддержка: Да.

Таблица 3.2 – Режимы работы с полимерами для PLA

Диаметр сопла мм.	0,3	0,4
Средняя высота слоя. Определяется соотношением скорости печати и точности мм.	0.05-0.2	0.1-0.2
Толщина стенки Кратна соплу, определяется соотношением прочности и времени печати мм.	0.3-0.9	0.4-1.2
Скорость печати мм/с.	30-40	30-40
Температура печати. Определяется изготовителем полимера °С.	200-220	200-220
Температура стола °С.	60-73	60-73
Текучесть (%).	100	100
Скорость отката мм/с.	40-60	40-60
Подъем экструдера при откате мм.	0.0-0.3	0.0-0.3
Расстояние отката мм.	0.2-0.5	0.5-0.7
Начальная высота слоя мм.	0.2	0.2
Скорость перемещения головки мм/с.	60-100	60-100
Скорость печати первого слоя мм/с.	20	20
Обдув модели включать только в случае перегрева конструктивного элемента, когда слишком мелкая или остроконечная ( %.).	100	100

Таблица 3.3 – Режимы работы с полимерами для ABS

Диаметр сопла мм.	0,3	0,4	0,6
Высота слоя (соответствует режиму PLA) мм.	0.05-0.2	0.1-0.2	0.1-0.4
Толщина стенки (для режима PLA) мм.	0.3-0.9	0.4-1.2	0.6-1.8
Скорость печати мм/с.	30-40	30-40	30-40
Температура печати (зависит от конкретного пластика) °С.	230-245	230-245	230-245
Температура стола в аддитивной установке °С.	100-110	100-110	100-110
Наклейка °С.	90	90	90
Текучесть. Может быть меньше, если пластик сильно расширяется при выходе из сопла (%).	100	100	100
Скорость отката (для режима PLA) мм/с.	40-60	40-60	40-60
Расстояние отката CmPLA мм.	0.2-0.5	0.5-0.7	0.5-0.7
Начальная высота слоя (для режима PLA) мм.	0.2	0.2	0.3-0.4
Скорость перемещения экструдера мм/с.	60-100	60-100	60-10Q,
Скорость печати первого слоя (для режима PLA) мм/с.	20	20	20
Обдув модели включать только в случае перегрева детали, когда слишком мелкая или остроконечная.	0	0	0

Таблица 3.4 – Режимы работы с полимерами для FLEX

Диаметр сопла мм.	0,3	0,4	0,6
Высота слоя (ДЛЯ режима PLA) мм.	0.05-0.2	0.1-0.2	0.1-0.4
Толщина стенки (соответствует режиму PLA) мм.	0.3-0.9	0.4-1.2	0.6-1.8
Скорость печати Завышение температуры для быстрой печати неэффективно из-за высокой вязкости полимера мм/с.	30-40	30-40	30-40
Температура печати (Зависит от конкретного пластика) °С.	230-245	230-245	230-245
Температура стола °С.	100-110	100-110	100-110
Наклейка °С.	90	90	90
Текучесть% Может быть меньше, если пластик сильно расширяется при выходе из сопла	100	100	100
Скорость отката в случае отката должна быть снижено мм/с.	40-60	40-60	40-60
Расстояние отката выключается из-за ненужности или опасности зажёвывания пластика в экструдере мм.	0	0	0
Начальная высота слоя мм.	0.2	0.2	0.3-0.4
Скорость перемещения головки мм/с.	60-100	60-100	60-100.
Скорость печати первого слоя мм/с.	20	20	20



Обдув модели включать только в случае перегрева конструктивного элемента, когда слишком мелкая или остроконечная.	0	0	0
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---	---	---

Важнейшей характеристикой является модуль упругости корпусного элемента, выполненного из полимеров. Структурное отклонение при печати ABS определялось при разных температурно-временных режимах печати. В процессе опытов известно, будто отклонение температур больше 238 °С приводит к загрязнению экструдера и нарушению экструзии полимера, для устранения которого нужно проводить печать при 212 °С. Итоги изучения и экспериментов печати ABS и режимы печати приведены в (табл. 3.2).

Таблица 3.5 – Зависимость модуля упругости полимеров от температуры

Характеристика напряжений,	Температура проводимых испытаний, °С					
	140	160	180	200	220	240
E, МПа	46	72	42	73	69	47
S, МПа	98	26	35	61	27	44
V, %	2.2	7.4	11.8	35.3	10.0	9.4

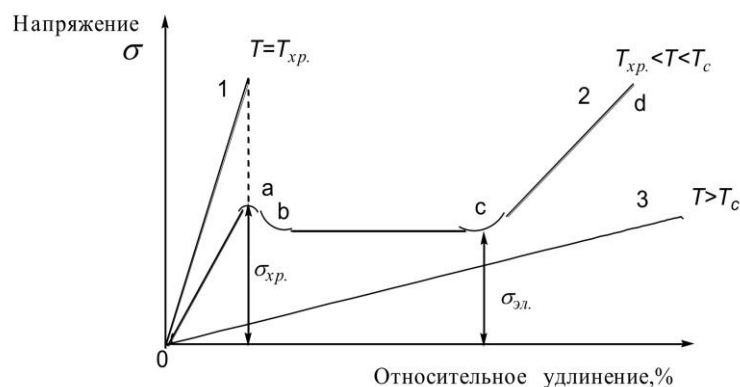


Рисунок 3.6 – График деформации аморфного полимера (с учетом постоянной скорости растягивания и разных температур)

При температурах ниже  $T_{xp}$  разрушению полимера предшествуют небольшие деформации, которые связаны с проявлением упругости (кривая 1). При  $T_{xp} < T < T_c$  напрямую за участком Oa, отвечающим упругим деформациям стеклообразных полимеров, начинается область bc крупных деформаций,

развивающихся почти в постоянном напряжении (кривая 2). Феномен возникновения больших обратимых деформаций в полимерных стеклах под действием механического напряжения было названо Александровым А. П. вынужденной эластичностью. Данное явление объясняется тем, что при воздействии больших механических напряжений на стеклообразный полимер сегменты его макромолекул обретают определенную подвижность. Также немаловажно, что деформация вынужденной эластичности при  $T < T_c$  необратима, и лишь при  $T > T_c$  образец восстанавливает форму и размеры [44,45].

Выявлена, зависимость физико-механических свойств корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным от температурно-временного режима послойного синтеза.

### **3.3 Разработка прогнозной модели отказов оборудования в процессе послойного наложения полимерной нити**

Анализ данных о несоответствиях при производстве корпусного элемента РЭА выполнен по трем фазам: подготовка данных, анализ данных, выражение и интерпретация результатов.

В качестве «правил» сбора, обработки и формой для подачи данных в сеть выступает сбор данных по различным группам несоответствий. Для обучения взято 8 несоответствий при производстве корпусного элемента РЭА с применением МПН технологии. Все эти несоответствия актуальны при использовании аддитивных технологий. Вероятность несоответствия оценивалась либо 0, либо 1.

Таблица 3.6 – Перечень несоответствий аддитивного производства

Признаки	Значения признаков	Накопленная доля значимости	Порог	Подсветка
Нет экструдирования при начале печати	549	10%	80%	1
Распечатка не прилипает к платформе	470	19%	80%	1
Недостаточное экструдирование	439	27%	80%	1
Избыточное экструдирование	407	35%	80%	1

Щели на верхнем слое	357	41%	80%	1
Волоски или паутина	355	48%	80%	1
Перегрев	300	54%	80%	1
Смещение слоев или отсутствие выравнивания	259	59%	80%	1
Слои разделяются и расщепляются	245	63%	80%	0
Филамент стачивается	220	67%	80%	0
Засорился экструдер	211	71%	80%	0
Экструдирование прерывается	209	75%	80%	0
Плохое наполнение	202	79%	80%	0
Натеки и «прыщи»	200	83%	80%	0
Щели между наполнением и контуром	188	86%	80%	0
Загибающиеся или неровные углы и края	135	89%	80%	0
Царапины на верхней плоскости	123	91%	80%	0
Щели между углами слоев	100	93%	80%	0
Линии на боках распечатки	85	94%	80%	0
Вибрации и «волнение»	80	96%	80%	0
Щели между тонкими стенками	77	97%	80%	0
Мелкие конструктивного элемента не пропечатываются	75	99%	80%	0
Неравномерное экструдирование	72	100%	80%	0

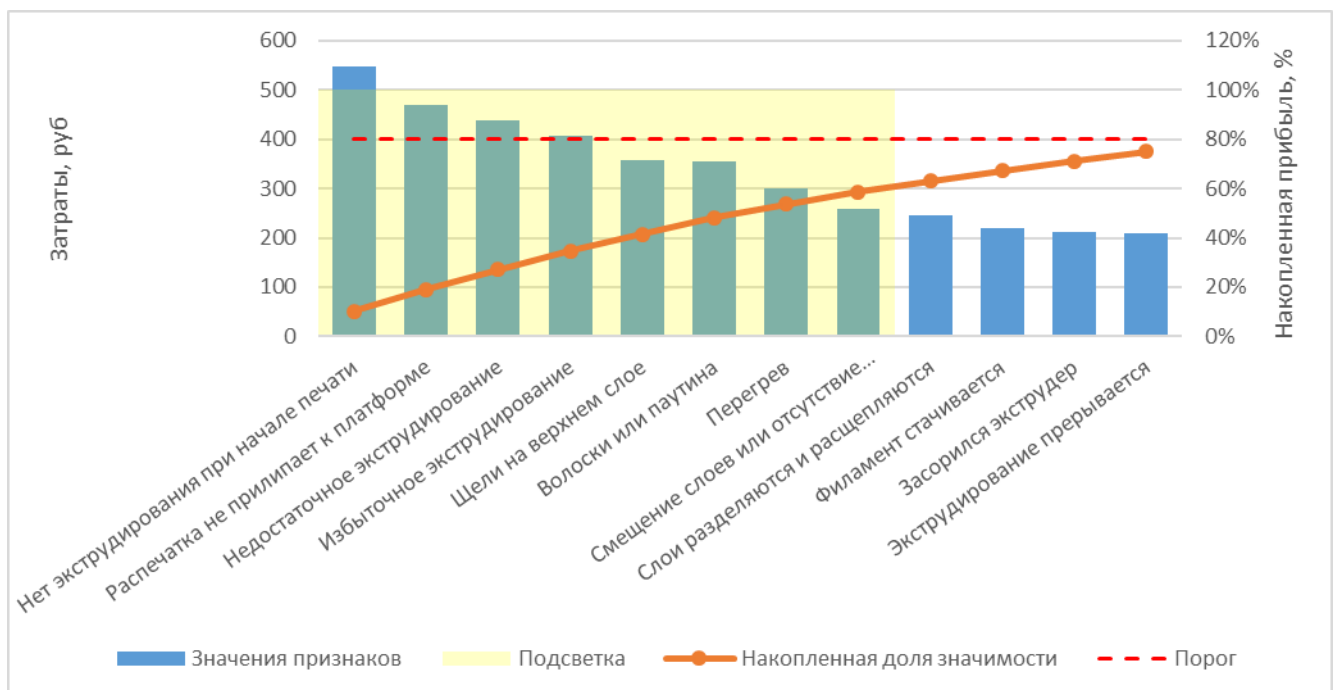


Рисунок 3.7 – Диаграмма Паретто по несоответствиям 3D печати

На этом выводится статистика по критериям оценки, которые теперь уже выступают в роли входных данных [106].

Для удобства создания нейронной сети использовался программный пакет Matlab.

Структурная схема нейронной сети представлена на рис. 3.8, в которой (чёрный цвет – входной слой нейронов, серый – скрытый(промежуточный) слой нейронов, светлый – выходной слой нейронов).

Сеть состоит из нейронов, соединенных синапсами через сумматоры по следующей схеме (рис. 3.11). Сигналы, возникающие в процессе работы сети разделяются на прямые (используемые при выдаче результата сетью) и двойственные (использующиеся при обучении).

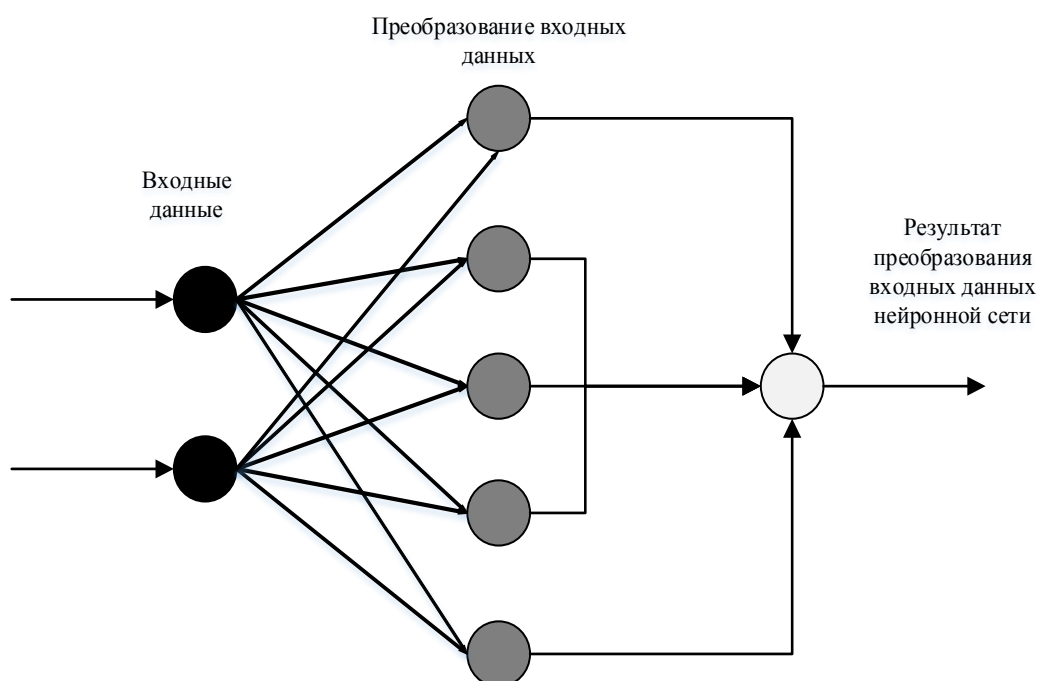


Рисунок 3.8 – Пример нейрона в нейронной сети

### Обучение и проверка сетей

Всего использовано 531 наблюдение.

Применить данную нейронную сеть было решено для прогнозирования числа несоответствий процессов аддитивного производства.

Данные были взяты на основе перечня несоответствий (табл. 3.7) [104].

Таблица 3.7 – Данные по несоответствиям

Вид несоответствия	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	123	2054	200	1508	5252	6514	8468	8907	9506	8042	9890
B	220	556	25	1055	3454	3456	4711	4412	4969	4965	5331
C	202	3025	100	556	3499	3588	5167	5512	5524	5779	5154
D	355	956	50	229	202	390	320	301	274	271	305
E	357	457	12	596	955	1402	1977	1603	1898	1807	2033
F	259	2257	123	914	988	2237	3062	2761	3246	3453	3459
G	300	4522	221	601	1720	2463	3734	3881	4381	4285	4484
H	188	541	62	569	1087	3147	2883	2622	3082	3036	3294
<b>Итого:</b>	<b>2004</b>	<b>14368</b>	<b>793</b>	<b>6028</b>	<b>17157</b>	<b>23197</b>	<b>30322</b>	<b>29999</b>	<b>32880</b>	<b>31638</b>	<b>33950</b>

В поле выбора строк заносятся значения входных данных: [1 2 3 4 5 6 7 8; 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19], в которых числа 1–8 являются кодом каждого показателя МПК, а 9–19 кодируют этапы печати. На (рис. 3.9) приведена настройка параметров нейронной сети.

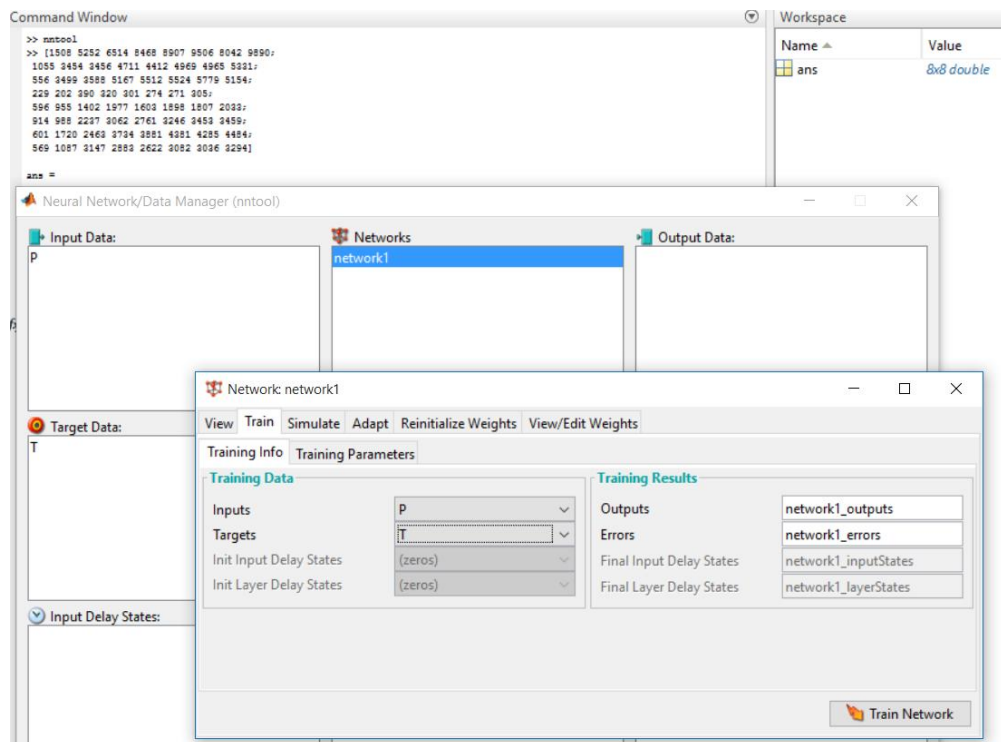


Рисунок 3.9 – Настройка нейронной сети

На (рис. 3.10), представлен график обучения сети где для нахождения экстремума используется градиент функционала ошибки по настраиваемым параметрам,  $\mu$  показывает коэффициент уменьшения ошибки сети,  $\text{val fail}$

отображает контрольные векторы используемые для досрочной остановки тренировки если показатель функционирования сети на контрольном массиве векторов перестанет улучшаться или будет оставаться на одном уровне для MAX\_FAIL эпох подряд, а на (рис. 3.11) представлено построение базовой структуры прогнозирования нейронной сети в Matlab.

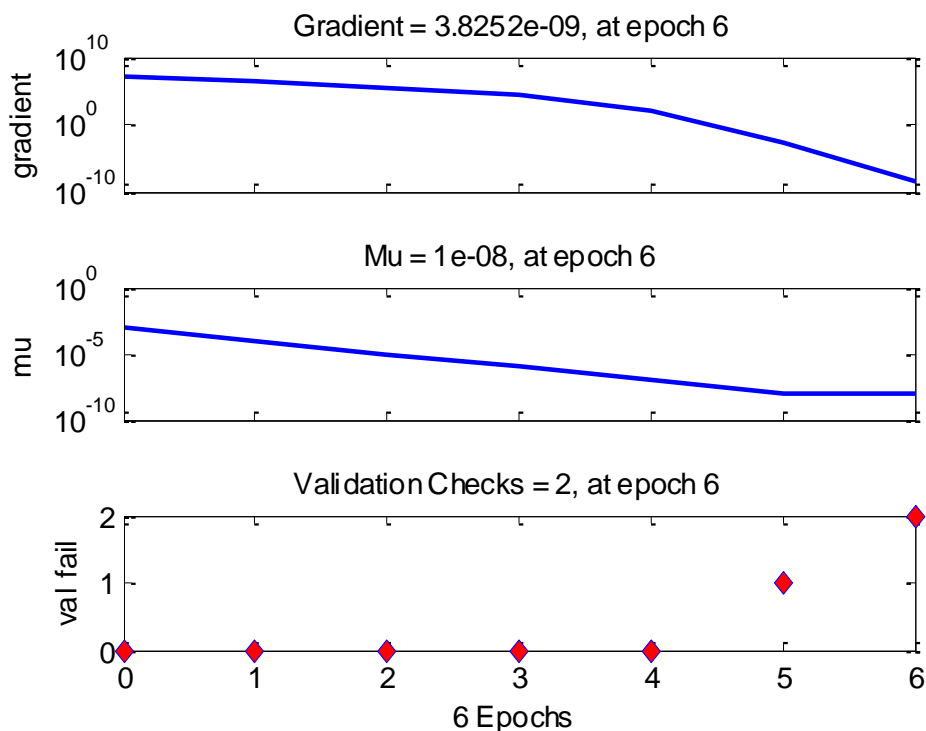


Рисунок 3.10 – Обучение нейронной сети

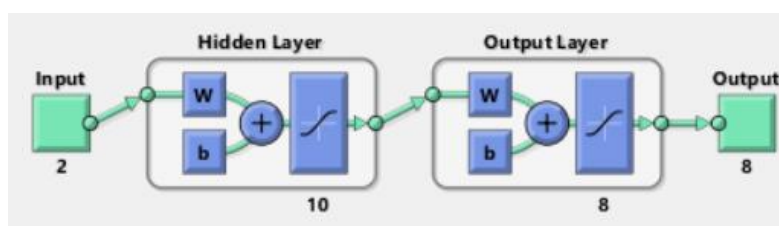


Рисунок 3.11 – Структура нейронной сети

Для оценки точности использовалась средняя абсолютная ошибка в процентах, ошибка сети составила 7.95 %, что говорит о продуктивной работе системы.

Сравнивая данные, выданные системой, и реальные данные, можно убедиться, что нейронная сеть делает прогнозы, близкие к реальности (табл. 3.8).

Таблица 3.8 – Данные прогноза нейронной сети и действительные данные из источников

Прогноз несоответствий при печати	Реальные данные.
979	982
505	494
543	542
290	311
190	192
347	359
429	435
318	347

а) данные сети б) данные из источника

Данный метод можно применять и для прогнозирования других результатов.

### **3.4 Методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов.**

Известно, что причины возникновения дефектной продукции универсальны, отчасти это обуславливается физико-химическими процессами формирования изделий, а отчасти эти причины сопряжены с вариабельностью (изменчивостью) использованных материалов, процессов, способов работы, методов контроля и т.д. Методика уменьшения уровня дефектности с применением статистических методов управления качеством в аддитивном производстве представлена на (рис. 3.12). Предлагаемая методика использует подход к расчету прогнозируемого уровня дефектности технологического процесса в ppm, предложенный ГОСТ Р 50779.11-2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения рис.3.12.



Рисунок 3.12 – Схема базового статистического контроля процесса применяемая к послойному синтезу

Схема статистического управления технологическими процессами аддитивного производства учитывает показатели качества, зависящие от технологического процесса и особенностей аддитивного производства.



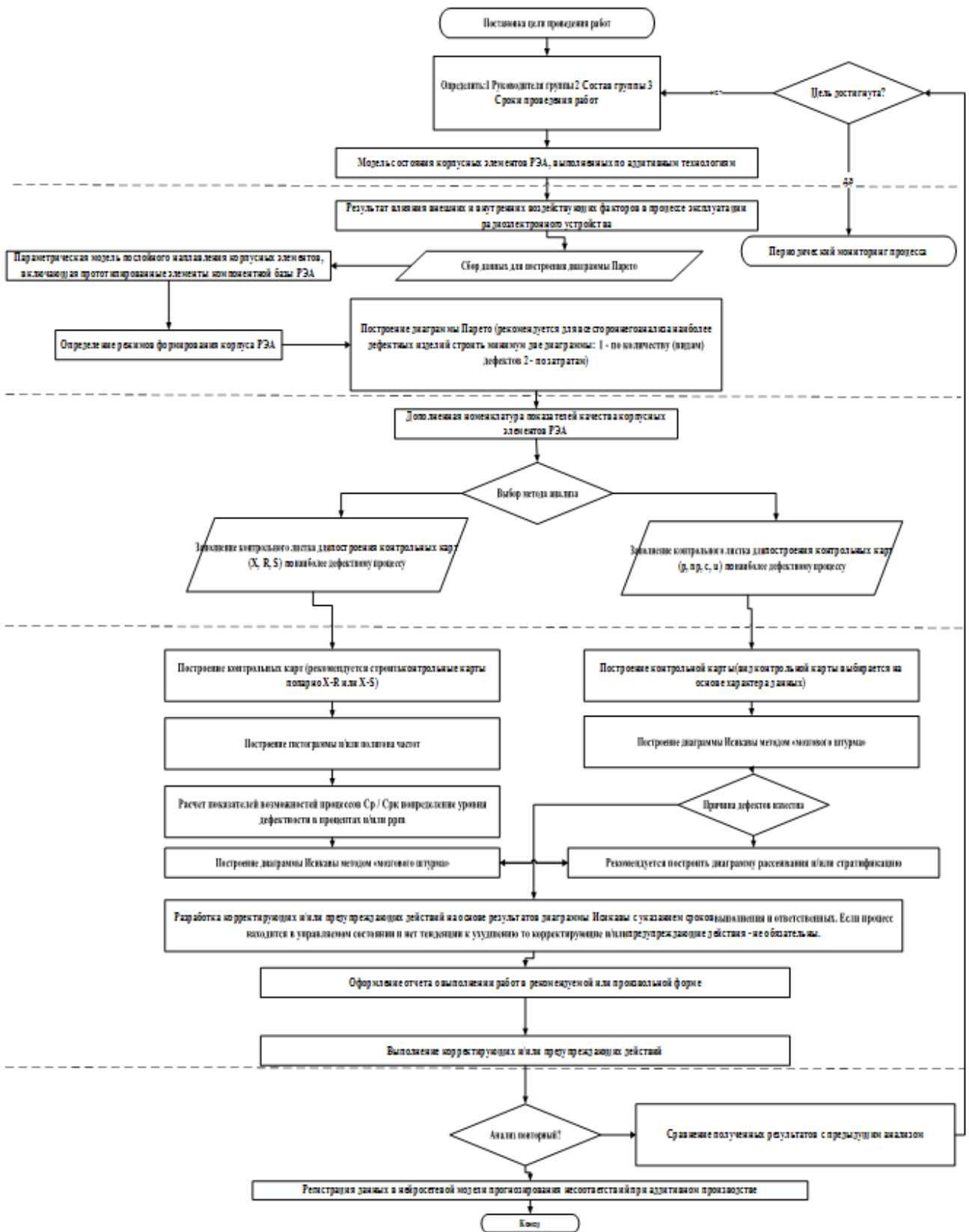


Рисунок 3.13 – Методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов

Технологический параметр, по причине которого появлялись несоответствия, это – высота равная 15 мм с допуском  $\pm 1$  мм (рис. 3.14).

Выбранные контролируемые параметры выходил за предельные границы в процессе послойного синтеза изделия и приводил к возникновению несоответствия, что влекло за собой повышение материалоемкости и потребность в дополнительной механической обработки.

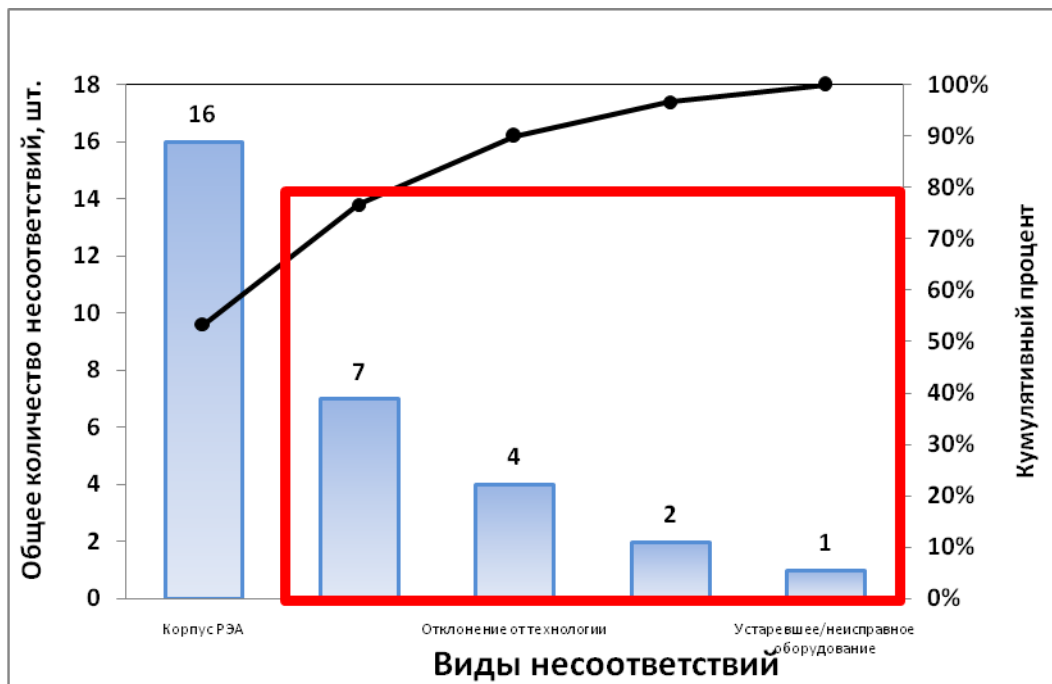
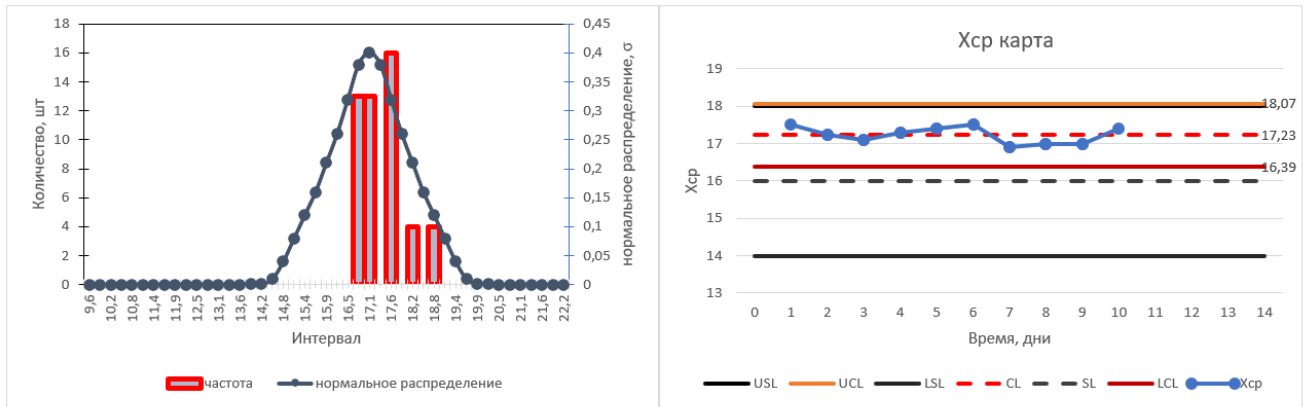


Рисунок 3.14 – Диаграмма Парето по дефектным изделиям и (б) – технологический параметр конструктивного элемента.

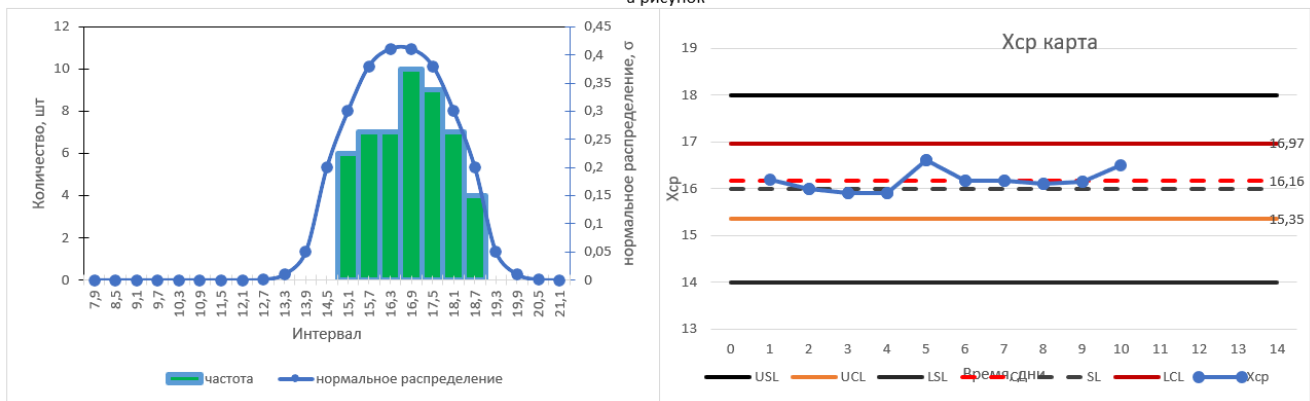
Проведённый анализ состояния технологического процесса, процесс нестабилен и имеет смещение к верхней границе контрольной карты и сигнализирует о выходе за границы установленного поля допуска. Границы возможных исправлений заметны на X-карте (рис. 3.15). Количество несоответствий  $C_p$  – протекание хода печати, и  $C_{pk}$  – середина поля допуска, составил около 21,5 %. Это свидетельствует о том, что в отсутствии вмешательства в технологический процесс приблизительно каждое пятое изделие будет иметь дефект.

Для снижения такого уровня дефектности, основываясь на данных

диаграммы Исикавы, были разработаны корректирующие мероприятия по управлению температурного режима и цифрового прототипа. Реализация корректирующих действий дала возможность достичь статистически контролируемого поведения процесса, настроенного на середину поля допуска (рис. 3.15).



а рисунок



б рисунок

Рисунок 3.15 – Текущее положение процесса послойного синтеза изготовления корпуса РЭА до (а) и после (б) реализации корректирующего мероприятий

Значительная доля изделий после печати начали соответствовать номинальному значению отклонения (равному 0.1 мм при толщине корпуса 16 мм), что подтверждено контрольной X-картой. На гистограмме заметно, что технологический процесс сведён к нормальному распределению протекания процесса. Количество несоответствий снижено до 850 ppm. ( $C_p = 1,217$  и  $C_{pk} = 1,120$ ). Средняя экономия в результате реализации мероприятий составила 52 человека часов с учетом выпуска 100 корпусных элементов РЭА, что ведёт к повышению результативности процесса.

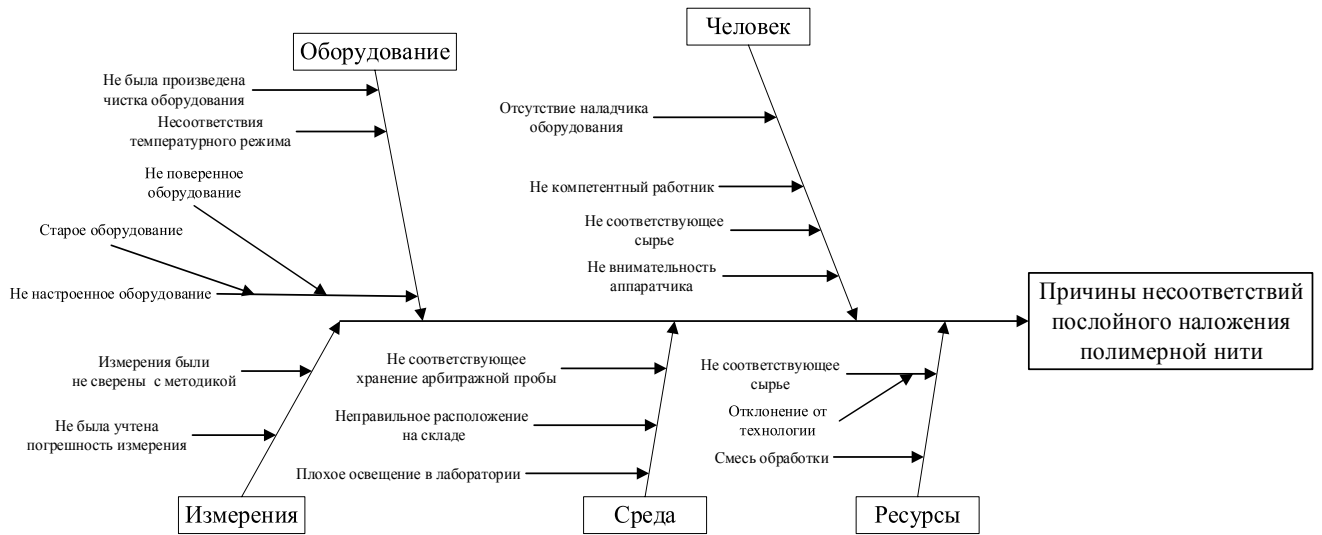


Рисунок 3.16 – Диаграмма основные причины брака полимерной нити

Системный статистический анализ нынешнего состояния технологического процесса, выполненный с помощью диаграммы Исикавы, обнаружил основные причины брака, а непосредственно, несовершенство оснастки и нарушение технологической процедуры печати, что ведёт к нарушению геометрических параметров рис. 3.17.

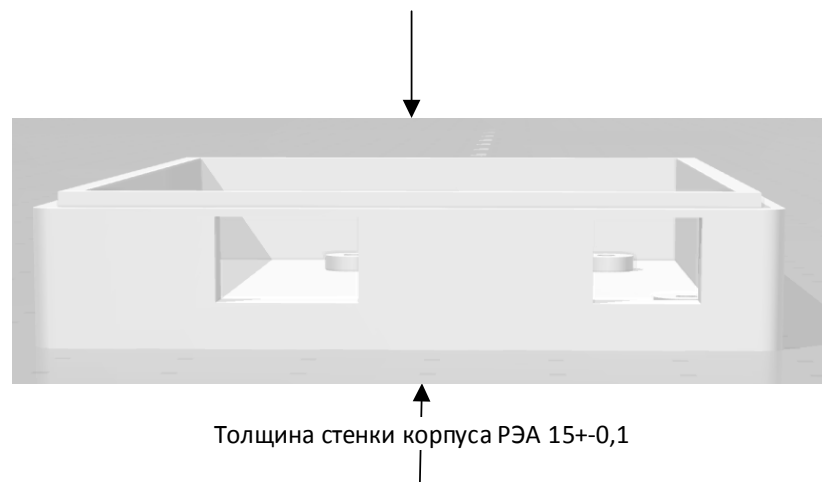


Рисунок 3.17 – Контролируемый размерный параметр на элементе корпуса РЭА

По итогу анализа были получены следующие данные:

– на гистограмме и контрольной карте заметно, что технологический процесс выходит за пределы нижней границы поля допуска и, равно как

результат, влечет возникновение брака (рис. 3.17);

– уровень дефектности процесса составил приблизительно 62 %, что соответствует 620 тысяч дефектов на миллион произведенных изделий.

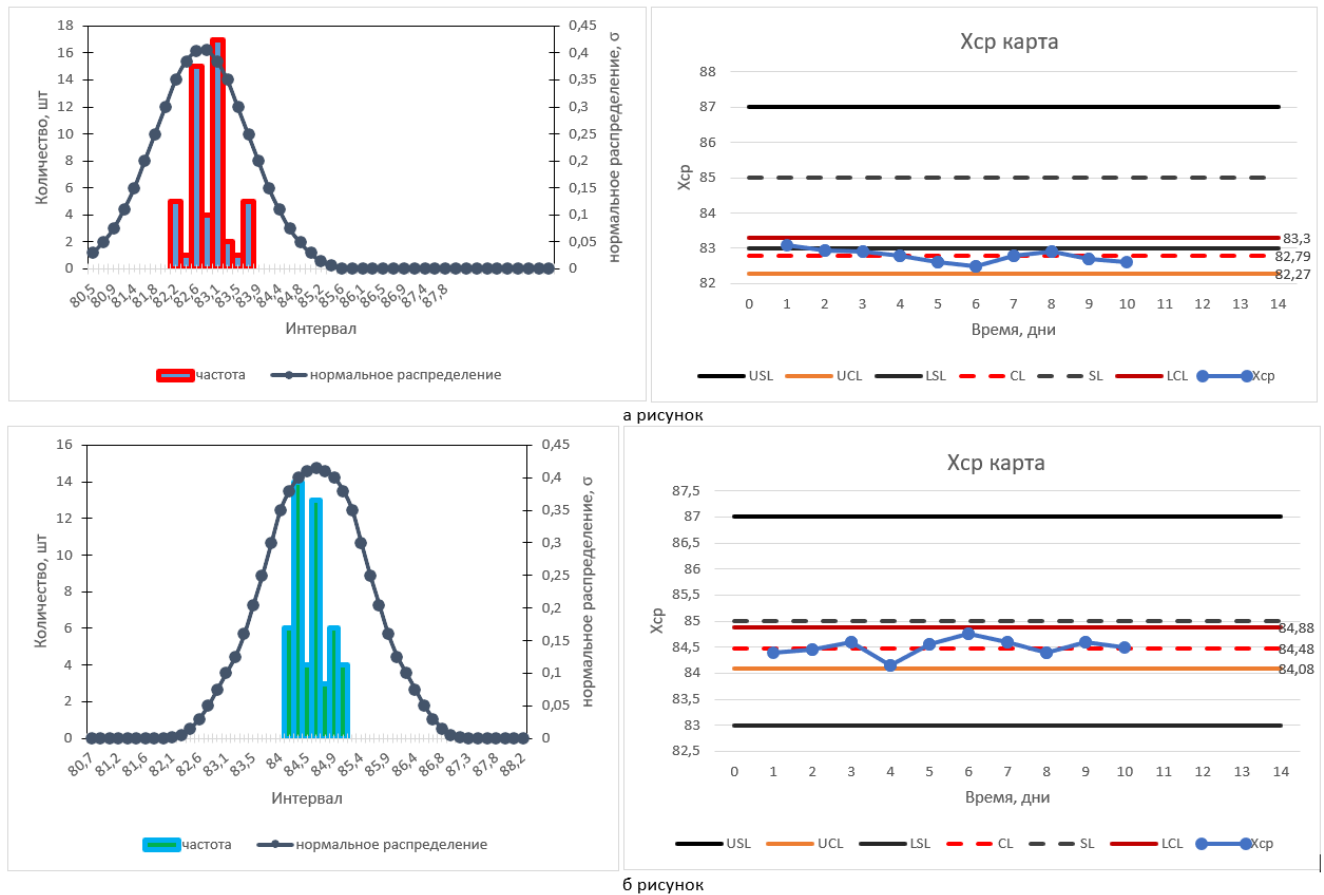
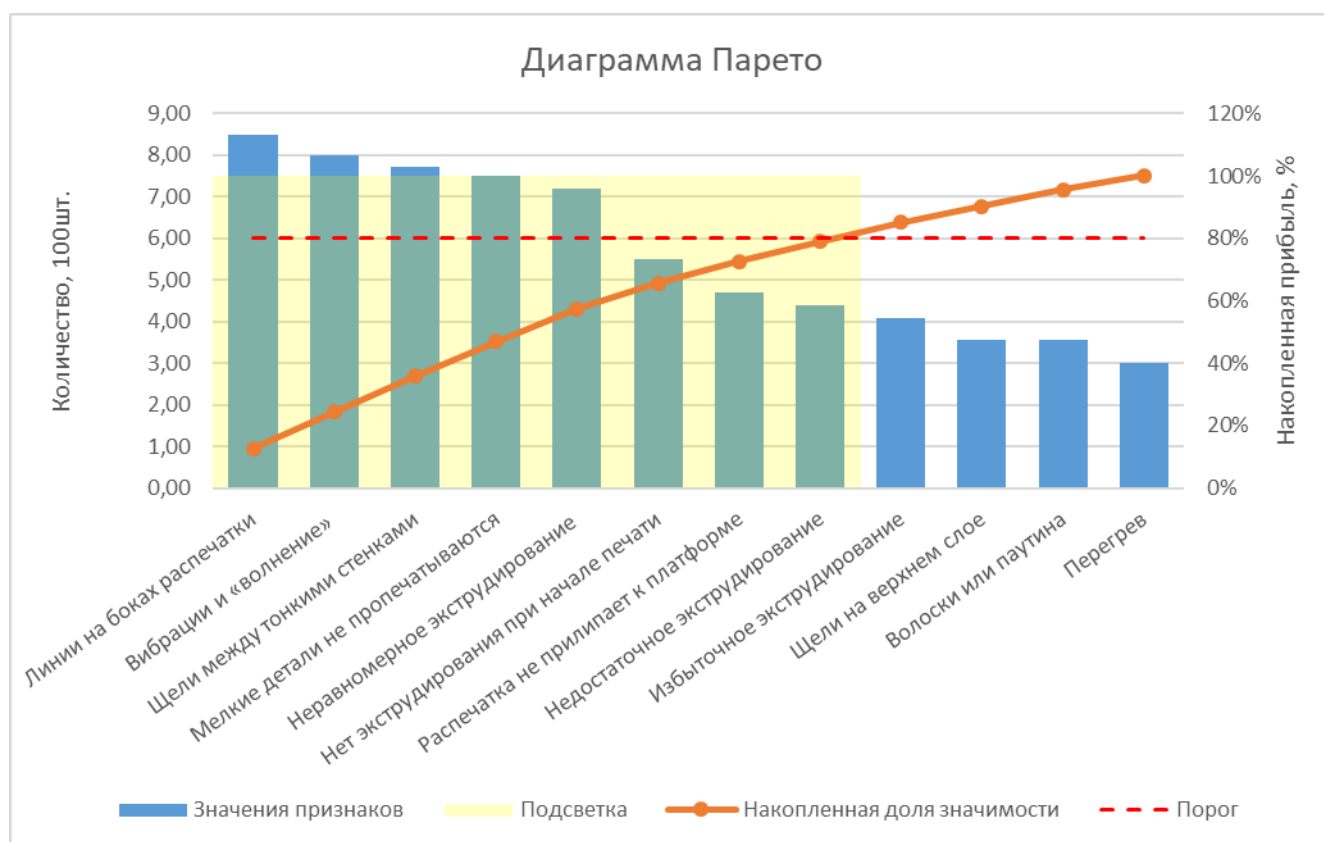


Рисунок 3.18 – (а) – Положение технологического процесса производства «Корпуса РЭА» до реализации корректирующего действия; (б) – после реализации корректирующего действия

На основе проведённого исследования процесса было разработано корректирующее действие по изменению температурного режима и геометрических параметров. После реализации корректирующих действий получен устойчивый процесс, настроенный на середину поля допуска (рис. 3.18), с уровнем брака менее 0,007 %. Получилось достичь снижения уровня дефектности на 62 % ( $C_p = 2,252$  и  $C_{pk} = 1,672$ ). С целью предотвращения повторного отклонения послойного синтеза от управляемого состояния реализована проверка аддитивного оборудования. Результатом работы данной

системы является уменьшение уровня дефектности аддитивного производства в среднем на 0,04 %.

Анализ дефектов продукции на основе послойного синтеза технологии необходим для разработанного метода и алгоритма, которые были применены для аддитивного производства. На начальном этапе были выявлены несоответствия, которые приводят к наибольшим потерям. Для выявления наиболее затратных несоответствий и формализации процесса производства корпусных элементов РЭА с использованием аддитивных технологий построена диаграмма Парето, использующая статистические данные работы установок (рис. 3.19).



**Рисунок 3.19 – Распределение видов дефектов в процессе печати аддитивного производства**

Кривая Лоренца на диаграмме позволяла отметить из общей массы наиболее существенные дефекты, после устранения которых, значительно снижался уровень брака.

По результатам диаграммы Парето дефекты, составляющие основную долю несоответствующей продукции, следующие:

- Нет экструдирования при начале печати.
- Распечатка не прилипает к платформе.
- Недостаточное экструдирование.
- Избыточное экструдирование.
- Щели на верхнем слое.

В соответствии с Классификатором видов брака произведен анализ причин образования данных несоответствий (рис. 3.20).

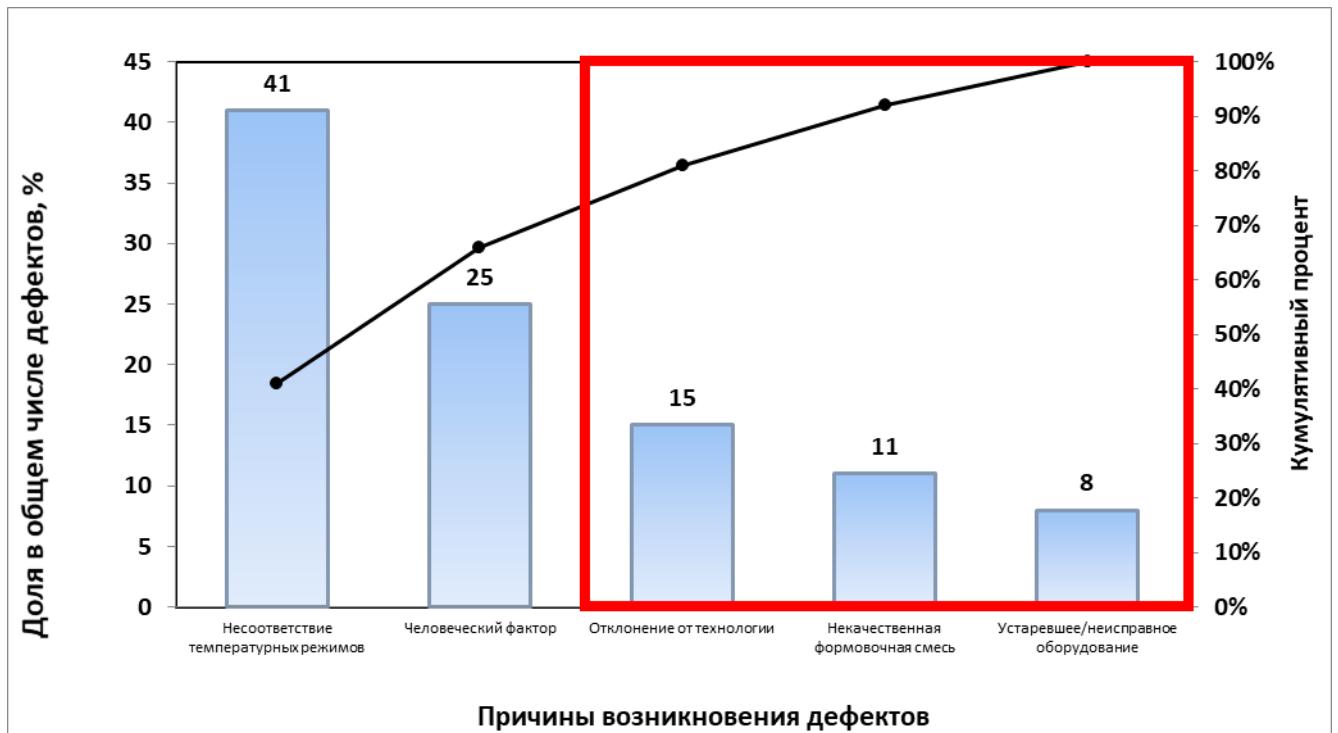


Рисунок 3.20 – Диаграмма Парето причин возникновения дефектов

Проведенный анализ данных о дефектах и причинах их возникновения показал, что большая часть несоответствующей продукции 41 изделий из-за несоответствия температурного режима по причине отклонения от технологии изготовления, среди которых несоблюдение температурных режимов выделено в особую графу для наглядного представления преобладания данного фактора.

### 3.5 Разработка рекомендаций по снижению рисков производства корпусных элементов РЭА

Исходя из стандарта ГОСТ Р 56275-2014 Национальный Стандарт Российской Федерации: Менеджмент рисков Руководство по надлежащей практике менеджмента рисков проектов 2016 год. И практики управления рисками разработаны критерии оценки рисков технологического процесса производства корпуса РЭА.

На основе данных о рисках был составлен PEST и SWOT анализ представленный на (табл. 3.9, 3.10), связанных с концепцией ALARP рис. 3.21.

Таблица 3.9 – PEST анализ нового продукта

<b>Внешняя среда</b>	
<b>Политика</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Экологические проблемы</li> <li>Финансирование, гранты</li> <li>Текущее законодательство на рынке</li> <li>Торговая политика</li> <li>Влияние государства в отрасли</li> </ul>
<b>Экономика</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Увеличение тарифов на коммунальные услуги</li> <li>Повышение налогообложения</li> <li>Инфляция</li> <li>Налогообложение</li> <li>Инвестиционный климат в отрасли</li> <li>Потребности конечного пользователя</li> </ul>
<b>Общество</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Снижение платёжеспособности населения</li> <li>Мода на экологичные товары</li> <li>Закрепление брэнда</li> <li>Информация СМИ</li> <li>Демография</li> <li>Базовые ценности</li> <li>Бренд, репутация</li> </ul>
<b>Технология</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Развитие конкурентных технологий</li> <li>Новые технологические открытия.</li> <li>Появление конкурентов с схожей продукцией</li> <li>Потенциал инноваций</li> <li>Зрелость технологии</li> <li>Изменение и адаптация новых технологий</li> <li>Патенты</li> <li>Информация и коммуникации</li> </ul>



Таблица 3.10 – SWOT-анализ нового продукта

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
Занять нишу на рынке Положительные тенденции спроса Сотрудничество с другими компаниями Получение грантов Применение новых технологий Увеличение рекламы Хорошие связи с общественностью Государственная поддержка Тенденции спроса	Продукты-заменители Новые игроки на рынке Появление конкурентов Смена тенденций спроса / моды Ненадежные поставщики оборудования, расходных материалов, энергоресурсов Экономический спад Активность конкурентов Сезонный спад Экономический спад Нестабильное поступление сырья
<b>Преимущества</b>	<b>Недостатки</b>
Инновационные технологии Удовлетворенность клиентов Новый вид продукции Новые качественные характеристики. Инновационный подход Низкая себестоимость Забота об экологии Высокое качество продукции	Недостаток оборотных средств Мало дополнительных услуг Малая аудитория. Неизвестный бренд. Возможность отпугнуть покупателя. Слабый имидж продукции Нет послепродажного обслуживания Мало дополнительных услуг

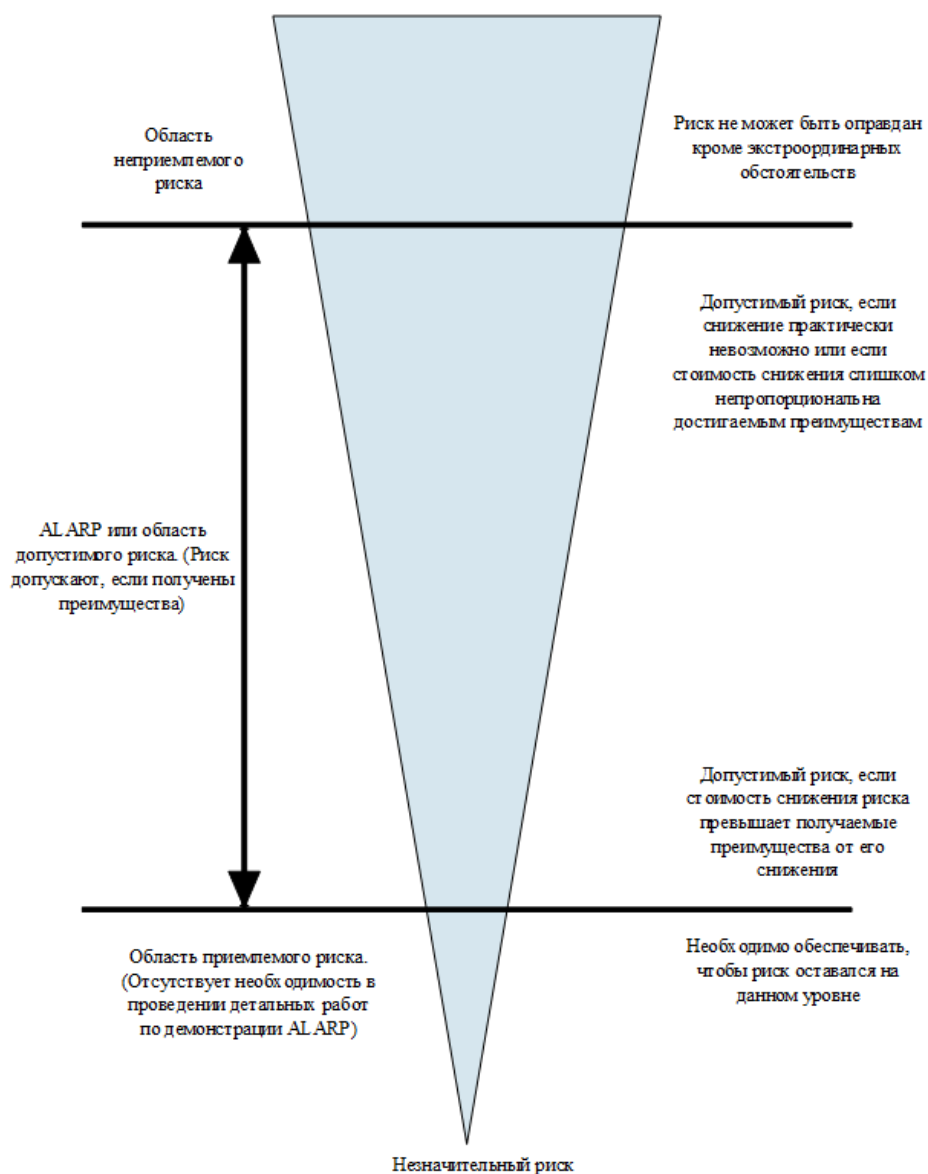


Рисунок 3.21 – Концепция ALARP при управлении рисками применимая к аддитивному производству

При оценке уровня риска в аддитивном производстве и неопределенности возникновения риска необходимо разработать показатель, с помощью которого можно дать как количественную, так и качественную оценку риска производства [1,2,3,4,5,6].

Порядок оценки рисков представлен на (рис. 3.22). Выбор прямого или косвенного метода.

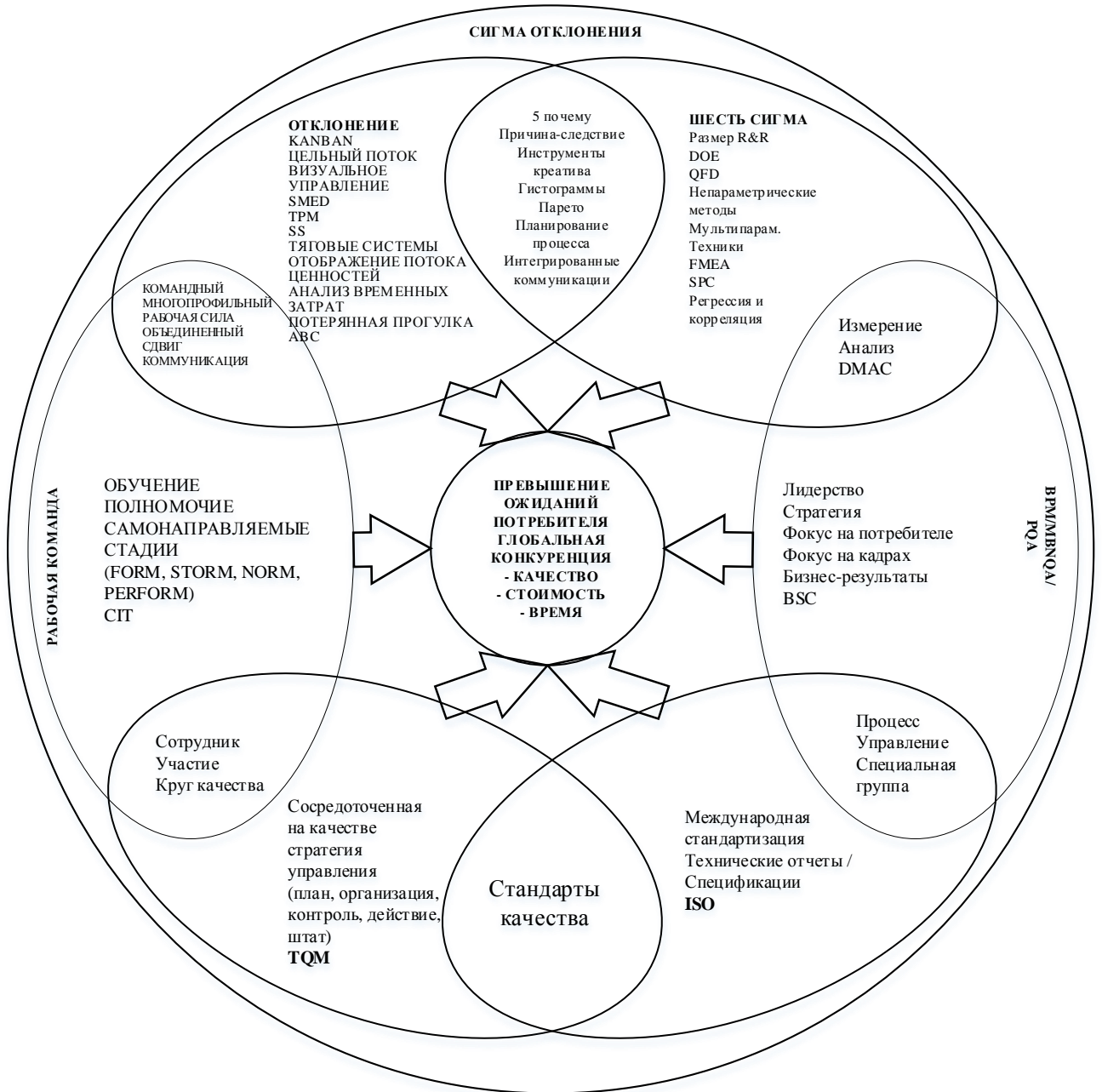


Рисунок 3.22 – Схема взаимодействия и взаимосвязи различных подходов к совершенствованию организационных процессов

Управление рисками является неотъемлемой частью управления процессом организации производства продукции с использованием наукоёмких технологий.

В данном исследовании за основу была взята модель представленная в серии международных стандартов BS 7000-1:2008 [110].

Управление рисками – это системный процесс принятия и выполнения управленческих решений, направленных на преодоление негативных событий.

В Российских стандартах ГОСТ Р ИСО 31000- 2010 Менеджмент риска дано понятие анализа риска.

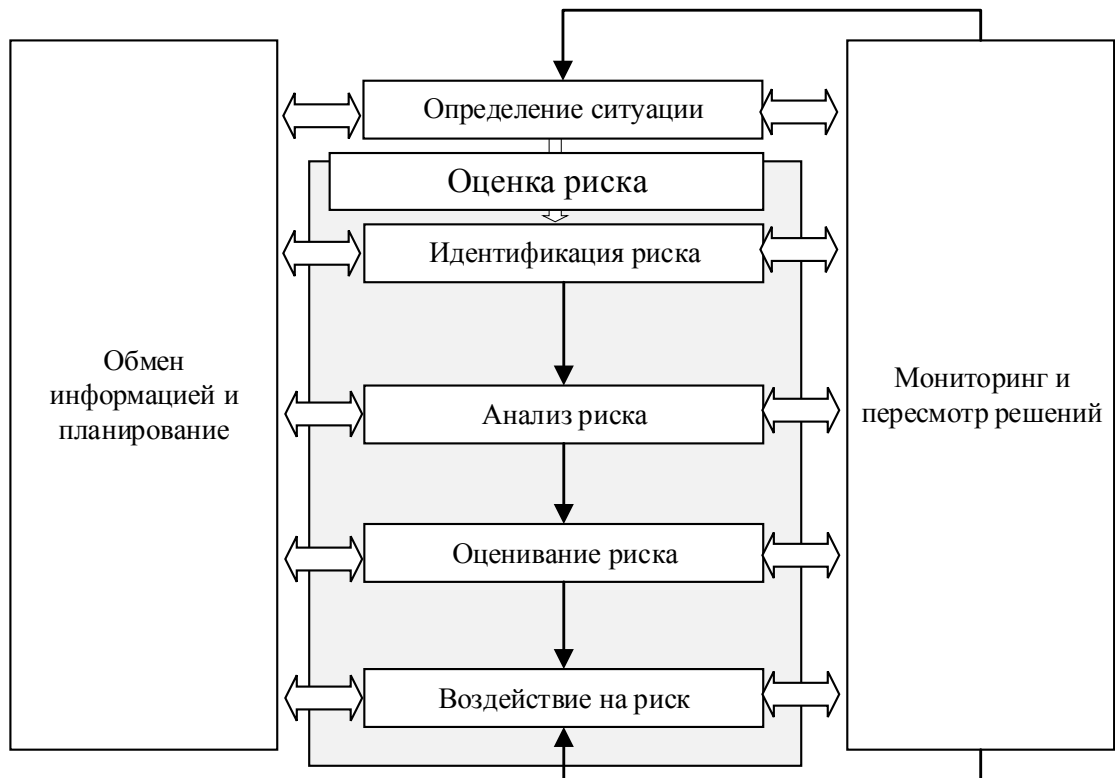


Рисунок 3.23 – Процесс риск-менеджмента

Анализ применимости также подразумевает оценку риска. Разработано дерево рисков (рис. 3.24) для формирования полного представления о риске.



Рисунок 3.24 – Иерархическая структура рисков

По результатам проведённых экспериментов на базе лаборатории аддитивных технологий ГУАП для оценки риска, проведена оценка возможности проявления отрицательных факторов и негативных результатов. При поддержке матрицы рисков, выделены красным более приоритетные опасности. Опасности, выделенные зеленоватым, считаются незначимыми. Риски с определённым значением указанного приоритета в диапазоне от 1 до 2 относятся к допустимым. Ключевое внимание необходимо уделять рискам с приоритетом больше 2, которые относятся к высоким табл. 3.11 [111].

Таблица 3.11 – Матрица риска

	Значений вероятности возникновения риска					
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Значение тяжести последствий	1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
	2	0,2	0,6	1	1,4	1,8
	3	0,3	0,9	1,5	2,1	2,7
	4	0,4	1,2	2	2,8	3,6
	5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5

Последствия рисков, как это показано в сетке, используют ранг в качестве описания и ранжируются согласно «суровости»: несущественные, небольшие, умеренные, существенные, катастрофические. Несущественные риски меньше всего вредят проекту и потому их ранг минимален. Катастрофический риск – это тот, который будет иметь наибольшее значение в ранжировании по суровости табл. 3.12.

Таблица 3.12 – Качественно-количественная шкала последствий

Ранг	Последствия	Размер экономических последствий
1	Несущественные	Низкие
2	Небольшие	Средние
3	Умеренные	Высокие
4	Существенные	Очень крупные
5	Катастрофические	Огромные, потеря возможности продолжить деятельность

Вероятность возникновения рисков определяется такими значениями (табл. 3.13), как изредка, маловероятно, возможно, очень вероятно, почти наверняка.

Таблица 3.13 – Качественно-количественная шкала вероятностей

Ранг	Значение вероятности возникновения риска	Описание риска
5	Крайне вероятно наступление риска	Предполагается при всех возможных обстоятельствах
4	Вероятно наступление риска	Возможно, возникает почти всегда
3	Риск возможен	Происходит периодически
2	Маловероятен	Может произойти при определённых обстоятельствах
1	Крайне мал	Возникает при исключительных обстоятельствах

Полученные результаты приведены в (табл. 3.14). К ним относятся риски, связанные с финансированием, рынком, расстановкой приоритетов заказчиком, технологией, планированием.

Таблица 3.14 – Оценка рисков предприятия

№ п.п.	Риски проекта	Балл	%	Кумулятивность	Оценка риска
1	Рынок	2,8	12,1	12,1	Высокий
2	Требования	2,8	12,1	24,2	Высокий
3	Заказчик	2,8	12,1	36,4	Высокий
4	Ресурсы	2	8,7	45,0	Высокий
5	Качество	2	8,7	53,7	Высокий
6	Финансирование	1,5	6,5	60,2	Допустимый
7	Технология	1,5	6,5	66,7	Допустимый
8	Планирование	1,5	6,5	73,2	Допустимый
9	Расстановка приоритетов	0,9	3,9	77,1	Допустимый
10	Оценки	0,9	3,9	81,0	Допустимый
11	Коммуникации	0,9	3,9	84,8	Допустимый
12	Эффективность и надежность	0,9	3,9	88,7	Допустимый
13	Степень сложности	0,6	2,6	91,3	Незначительный
14	Поставщики	0,6	2,6	93,9	Незначительный
15	Контроль	0,6	2,6	96,5	Незначительный
16	Контролирующие органы	0,3	1,3	97,8	Незначительный
17	Подразделения компании	0,3	1,3	99,1	Незначительный
18	Погодные условия	0,2	0,9	100,0	Незначительный

### SPACE-матрица

Для первичной оценки позиции методики на рынке с целью формирования базового представления стратегического позиционирования путем определения параметров внешней и внутренней среды организации произведен SPACE-анализ (табл. 3.15 и рис. 3.25).

Таблица 3.15 – Результаты SPACE-анализа

Критерии	Оценка	Весомость	Обобщенная оценка баллов
<b>Финансовая сила предприятия</b>			
Рентабельность инвестиций	4	0,4	1,6
Финансовая автономия	2	0,2	0,4
Платежеспособность предприятия	4	0,1	0,4
Уровень финансового риска	3	0,1	0,3
Общая оценка критерия			2,7
<b>Конкурентоспособность предприятия</b>			
Рентабельность продукции	5	0,3	1,5
Чистая рентабельность	3	0,2	0,6
Доля рынка	2	0,1	0,2
Конкурентоспособность изделия	5	0,2	1
Общая оценка критерия риска			3,3
<b>Привлекательность отрасли</b>			
Уровень прибыли	5	0,4	2
Финансовая стабильность	4	0,3	1,2
Капиталоинтенсивность	5	0,3	1,5
Легкость доступа на рынок	2	0,2	0,4
Общая оценка критерия			5,1
<b>Стабильность обстановки</b>			
Стабильность прибыли	4	0,5	2
Доля инноваций	5	0,3	1,5
Изменчивость спроса	2	0,2	0,4
Давление конкурентов	5	0,3	1,5
Общая оценка критерия			5,4

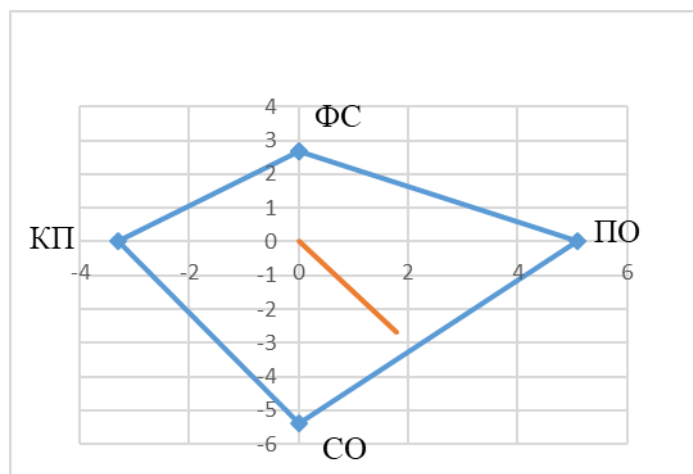


Рисунок 3.25 – Графическое представление стратегического состояния по SPACE-матрице, где ФС – финансовая сила, КП – конкурентоспособность предприятия, ПО – привлекательность отрасли, СО – стабильность обстановки



Необходимо выбрать конкурентную стратегию, которая даст конкурентные преимущества в перспективной, но нестабильной отрасли аддитивного производства. Критическим фактором является финансирование. Необходимо парировать угрозы, связанные с потерей финансирования.

Разработанные рекомендации обеспечивают постоянное улучшение процесса организации производства корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям в соответствии с принципами TQM.

### **Результаты и выводы по главе 3**

Проведенные в главе расчёты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана методика мониторинга и статистического управления МПН технологией с учётом модели состояния и динамики функционирования корпусных элементов РЭА в условиях внешних температурных воздействий и параметрического моделирования свойств полимеров.

2. Произведён расчёт периода освоения новой продукции на предприятии радиоэлектроники.

3. Проведен анализ, состояния рисков радиоэлектронного комплекса. При организации производства корпусов РЭА на основе послойного синтеза.

4. Разработана организационная подготовка с учетом ограничений на уровень надежности, сроков начала подготовки площадки и ввода производства корпуса РЭА на основе МПН.

5. По результатам, полученным в ходе анализа применимости модели и алгоритма, можно заключить, что модель и алгоритм позволяют обеспечить качество процесса, что приводит к повышению результативности процесса аддитивного производства на 20 % и качественным изделиям на выходе, которые удовлетворяют требованиям потребителей.

6. Разработаны схемы оценки риска при выпуске корпусных элементов РЭА с учётом риск-менеджмента, на основании результатов критериальной базы, что позволит снизить затраты на производство.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута поставленная цель исследования на основе разработки моделей и методики обеспечения качества процесса производства и качеством работ выполняемых на базе национальных стандартов в сфере аддитивных технологий, имеющая важное значение в соответствии с решениями правительства Российской Федерации в области наукоёмкого производства радиоэлектронной промышленности Постановления правительства Российской Федерации от 17 февраля 2016 года №110, №109 в рамках выполнения программы Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы». Способствует реализации проектов в сфере РЭА, увеличению доли импортозамещающих и инновационных товаров в общем объёме выпуска электронной и радиоэлектронной продукции [77].

Автором достигнуты следующие результаты диссертационного исследования:

1. Проведено исследование текущих технологического процесса производства корпусов РЭА Обоснован выбор интегрального и частных показателей качества корпусных элементов, мелкосерийное производство, которые используют аддитивные технологии.

2. Разработка и исследование модели анализа состояния и динамики функционирования корпуса РЭА в условиях внешних температурных воздействий в среде компьютерной математики MatLab для оценки устойчивости корпусных элементов к эксплуатационным факторам РЭА.

3. Разработана модель управления базовыми процедурами формования корпусов РЭА с использованием параметрического моделирования технологии послойного наплавления при производстве корпусов РЭА с учётом процедур обеспечения точности при 3D печати. Разработана методика управления результативностью аддитивных технологий производства корпусных элементов

РЭА.

4. Представлена процедура оценки экологичности и безопасности применения аддитивных технологий на основе МПН.

5. Разработан механизм повышения результативности технологического процесса послойного наложения полимерной нити с использованием моделирования и анализа связей прогнозной модели отказов оборудования в процессе послойного наложения полимерной нити с применением нейро-сетевой модели.

6. Разработана методика выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.

7. Разработан способ производства корпусов РЭА на основе комбинированной МПН технологии для повышения точности позиционирования элементов в мелкосерийном производстве.

8. Повышение результативности производственных процессов аддитивного производства согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015. На основе выявленного интегрального и частный показатель качества корпусных элементов РЭА. Составлен алгоритм оценки качества корпусных элементов на этапе производства РЭА. Разработана процедура определения показателей качества производства корпусных элементов РЭА.

9. Исследования процессов аддитивного производства на различных предприятиях и в стандартах в сфере аддитивных технологий позволили определить возможности повышения результативности процесса аддитивного производства посредством разработки модели обеспечения качества процесса. Успешное управление процессом во многом зависит от верной реакции на разноплановые требования заинтересованных сторон, факторов, в которых происходит процесс. Для получения качественных деталей необходимо уделять должное внимание используемому оборудованию и осуществлять планирование процесса аддитивного производства. В этом случае качество деталей будет на высоком уровне.

10. Разработана методика обеспечения качества процесса производства

корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов.

11. Применение разработанных моделей, методик и формализованной процедуры позволило сократить время производства конструктивного элемента РЭА, обеспечили сокращение несоответствий на 10-12 % в производстве корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям, снижение материальных, ресурсных и трудовых затрат на 15-20 %, что подтверждено актами внедрения и обеспечило повышение выхода годных корпусных элементов на 10-12 %.

Внедрены статистические методы контроля процесса послойного синтеза корпусных элементов для управления качеством процесса аддитивного производства, обеспечивающие расчет ожидаемого уровня дефектности технологического процесса, что позволило сократить расход полимеров при печати изделия на 20-25 %.

Возможность при прототипировании корпусов РЭА использовать композиционные материалы, что позволяет повысить прочностные характеристики филаментов с последующей имитационной оценкой.

Сокращение времени производства сложно-профильных корпусных элементов и компонентной базы РЭА при применении аддитивной технологии на 40-50 %.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АП – Аддитивное производство;
- ИИД – индекс инновационной деятельности предприятия;
- ЕМИСС – единая межведомственная информационно-статистическая система;
- МИП – малое инновационное предприятие;
- КПП – конструкторская подготовка производства;
- РРИИ – российский региональный инновационный индекс;
- ТП – технологических процессов;
- ТРПК – теплорассеивающих (теплопроводящих) полимерных композитов;
- ТК – технический комитет;
- НИОКР – Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы;
- ПК – показатель качества;
- ТПП – технологическая подготовка производства;
- РИД – Результаты интеллектуальной деятельности;
- РЭП – Радиоэлектронная промышленность;
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура;
- ЦБСД – Центральная база статистических данных Росстата;
- ЭКБ – электронная компонентная база;
- ЕСКД – Единой системы конструкторской документации;
- ЕСТПП – Единой системы технологической подготовки производства;
- КИМ – коэффициент использования материала;
- ПДК – предельно допустимые концентрации;
- МПН – метод послойного наплавления;
- ОПП – организационная подготовка производства;
- FDM – fused deposition modeling;
- TQM – total quality management;
- DPI – Dots Per Inch.

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Аддитивная установка – оборудование для послойного синтеза физического объекта;

Компонентная база – оборудование РЭА требующее защиты от внешнего воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аддитивные технологии / ООО «ПРОМЕДИА». 2016. № 1. 42 с.
2. Аддитивные технологии 3D-печати и 3D-сканирование/ «Диполь». 2016. 48 с.
3. Алексеев С. А. Актуализация отечественных стандартов в области сборки и монтажа электронных модулей специального и ответственного применения // Современная электроника. 2015. № 9.
4. Антохина Ю. А. и др. Интеграция моделей, методов и инструментов управления проектами. СПб.: Политехника, 2015. 360 с.
5. Антохина Ю. А. и др. Методы и инструменты управления качеством проектов: моногр. СПб.: ГУАП, 2013. 278 с.
6. Антохина Ю. А. и др. Управление качеством и результативностью проектов СПб.: Политехника, 2014. 330 с.
7. Барвинок, В.А. Управление качеством на предприятиях авиационно-космического кластера на основе стандартизации / В.А. Барвинок, А.Н. Чекмарёв, Е.В. Еськина // Вектор науки ТГУ. 2014. № 3. С. 39-46.
8. Боброва Н. М. Основные подходы к определению и классификации рисков инновационной деятельности // Рос. предпринимательство. 2012. № 8 (206).
9. Богоявленский С. Б. Управление рисками. СПб.: ФИНЭК, 2010.
10. Варжапетян А. Г. Имитационное моделирование на GPSSH / М.: Вуз. кн., 2007.
11. Варжапетян А. Г., Иванов Н. Н., Ивин В. К. Методы расчёта характеристик высоконадёжных изделий // Технология приборостроения. 2009. № 5.
12. Варжапетян А. Г., Иванов Н. Н., Семёнова Е. Г. Особенности оценки надежности компонентов АФАР // Вопр. радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2011. Вып. 2.



13. Варжапетян А. Г., Иванов Н. Н., Семёнова Е. Г. Применение диффузионного распределения при оценке надежности компонентов радиоэлектронных систем // Вопр. радиоэлектроники. Сер. РЛТ. 2011. Вып. 2.
14. Варжапетян А. Г., Иванов Н. Н., Стрельников В. П. Использование DN-распределений при анализе данных испытаний РЭС // Надежность. 2010. № 2(68).
15. Варжапетян А. Г., Иванов Н. Н., Стрельников В. П. Оценка долговечности паяных соединений с применением диффузионного немонотонного распределения // Надежность. 2012. № 4(43).
16. ГОСТ 12.0.002-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Термины и определения/ М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
17. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции основные понятия. Термины и определения» введён в действие постановлением. М.: Стандартинформ, 2017. 22 с.
18. ГОСТ 34250-2017 (ISO 8256:2004) Пластмассы. Метод определения прочности при ударном растяжении. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
19. ГОСТ Р 50779.11-2000 (ИСО 3534.2-93) Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.
20. ГОСТ Р 53736-2009. Изделия электронной техники. Порядок создания и постановки на производство. основные положения. М.: Стандартинформ, 2010. 14 с.
21. ГОСТ Р 56261-2014 - Инновационный менеджмент. Инновации. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.
22. ГОСТ Р 57556-2017. Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.
23. ГОСТ Р 57558-2017/ISO/ASTM 52900:2015. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
24. ГОСТ Р 57586-2017. Изделия, полученные методом аддитивных

технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 8 с.

25. ГОСТ Р 57587-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.

26. ГОСТ Р 57588-2017. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.

27. ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.

28. ГОСТ Р 57590-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2017. 12 с.

29. ГОСТ Р 57591-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы - часть 4. Обработка данных. М.: Стандартинформ, 2017. 26 с.

30. ГОСТ Р 57910-2017. Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции. М.: Стандартинформ, 2017. 7 с.

31. "ГОСТ Р ИСО 7870-2-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Контрольные карты. Часть 2. Контрольные карты Шухарта" (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 06.10.2015 N 1469-ст) из информационного банка "Отраслевые технические нормы".

32. ГОСТ Р 57911-2017. Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 8 с.

33. ГОСТ Р ИСО 16000-1-2007 «Воздух замкнутых помещений. Часть 1 Отбор проб. Общие положения». М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.

34. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартформ, 2015. 27 с.

35. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Система менеджмента качества. Требования. М.: Стандартформ, 2015. 32 с.

36. ГОСТ Р ИСО/ТО 10013-2007 «Руководство по документированию системы менеджмента качества». М.: Стандартиформ, 2007. 12 с.

37. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть четвертая) от 18.12.2006 № 230ФЗ ФЗ (ред. от 01.10.2014) // Собрание Законодательства Российской Федерации. - 25.12.2006. - N 52.

38. Действующий ГОСТ Р ИСО 9000-2015 Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь (с Поправкой).

39. Добрынин, А. П. Цифровая экономика - различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) / Добрынин А. П. //International Journal of Open Information Technologies. 2016. №. 1. С. 4-11.

40. Добрынин, А. П. Цифровая экономика - различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) / Добрынин А. П. //International Journal of Open Information Technologies. 2016. №. 1. С. 4-11.

41. Довбыш, В.М. Аддитивные технологии и изделия из металла/ В.М. Довбыш, Забеднов П.В., Зленко М.А. // Библиотечка литейщика. 2015. № 1. С. 37-43.

42. Довбыш, В.М. Аддитивные технологии и изделия из металла/ В.М. Довбыш, Забеднов П.В., Зленко М.А. // Библиотечка литейщика. 2015. № 1. С. 37-43.

43. Иванов Н. Н. Вероятностная модель диффузионного распределения для оценки надёжности радиоэлектронных приборов // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4.

44. Иванов Н. Н. и др. Инновационный подход к соединению разнородных материалов для безопасной эксплуатации РЭА в экстремальных условиях // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2012.

45. Иванов Н. Н. и др. Надежностное проектирование РЭА ответственного применения // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2013. Вып. 1. 54.  
Иванов Н. Н. и др. Проблемы отечественной стандартизации сборки и монтажа

электронных модулей специального назначения // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2015. Вып. 1.

46. Иванов Н. Н. и др. Прогнозирование усталостной долговечности паяных соединений поверхностного монтажа в приборостроении // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2015. Вып. 1.

47. Иванов Н. Н. О применении элементов бессвинцовых технологий при создании РЭА для жёстких условий эксплуатации // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2010. Вып. 2.

48. Иванов Н. Н., Ивин В. Д., Алексеев С. А. Исследование надёжности бессвинцовых и комбинированных паяных соединений в условиях жёстких воздействующих факторов // Вопр. радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2009. Вып. 4.

49. Информационно-аналитического отчета «Анализ мирового опыта развития промышленности и подходов к цифровой трансформации промышленности государств-членов Евразийского экономического союза» / ЕВРАЗИЙСКАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ. Департамент промышленной политики. М., 2017. 116 с.

50. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, Постановление Правительства № 1662-р 17 ноября 2008. URL: <http://www.consultant.ru>

51. Ларссен, Я. Аддитивное и гибридное производство с применением 3D-печати / Я. Ларссен // CAD/CAM/CAE Observer. 2015. № 3 (95). С. 26-28.

52. Лыгина, Н.И. Россия и российские предприятия в глобальной экономике / Н.И. Лыгина, О.В. Рудакова, В.П. Бардовский // Среднерусский вестник общественных наук. 2015. № 2(38). С. 163-171.

53. Назаревич, С. А. Модели и методики мониторинга процессов оценки новизны и конкурентоспособности продукции: дис. канд. тех. наук: защищена 19.02.2015: утв. 24.02.2015 / Назаревич Станислав Анатольевич. Спб., 2015. 211 с.

54. Патент РФ Способ глубокой переработки растительного органического топлива без использования химических скрепляющих компонентов и брикетированное топливо, № № RU 2 551 856 С1, заявл. 2014.

55. Петрашкевич, Е.Э. Статистические методы контроля качества в аддитивном производстве / Е.Э. Петрашкевич // Молодежная наука в развитии регионов: материалы Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех. ун-та, 2017. – Том 1. – С. 8-10.

56. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Часть 1. 2017.

57. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Часть 1. 2017.

58. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» Сколковский институт науки и технологий Дежина Ирина Геннадиевна – рук. Научной группы. 2015 г. 210 с.

59. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» Сколковский институт науки и технологий Дежина Ирина Геннадиевна – рук. Научной группы. 2015 г. 210 с.

60. Публичный аналитический доклад по развитию новых технологий, октябрь 2014 / ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://reestr.extech.ru/docs/analytic/reports/new%20technologies.pdf>

61. Публичный аналитический доклад по развитию новых технологий, октябрь 2014 / ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://reestr.extech.ru/docs/analytic/reports/new%20technologies.pdf>.

62. Р 50.1.044-2003. Рекомендации по стандартизации. Рекомендации по разработке технических регламентов. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2003. 12 с.

63. Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013-2025 годы. Госпрограмма РФ № 2396-р от 15 декабря 2012 г.

64. Свидетельство о государственной регистрации Чабаненко, А.В. «База данных компонентов обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям» // Чабаненко А.В., Семенова Е.Г. рег. № 20186221531 от 27.09.2018 г.

65. Смирнова, А.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты / А.И. Смирнова, И.И. Осовская. СПб.: СПбГТУРП, 2015. 31 с.
66. Стандарт BS 7000-1:2008 Design management systems. Guide to managing innovation [Электронный ресурс] // BSI. –2008. – Режим доступа: <http://bsigroup.com/>
67. Стандарт BS 7000-2:2008 Design management systems. Guide to managing the design of manufactured products [Электронный ресурс] // BSI. –2008. – Режим доступа: <http://bsigroup.com/>
68. Стандарт PMI PMBoK 6th Edition. [Электронный ресурс] // PMI. – 2017. – Режим доступа: <http://www.pmi.org/>
69. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.consultant.ru>
70. Стратегия развития радиоэлектронной промышленности РФ до 2030 года. URL: <http://www.cnews.ru/news/line/minpromtorg>
71. Стратегия развития электронной промышленности России на период до 2025 года. Утв. приказом № 311 Министерства промышленности и энергетики РФ от 07.08.2007 г.
72. Токарев Б.Е., Токарев Р.Б. Анализ технологий рынка 3D печати: два года спустя // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1 (2016). 15 с.
73. Тревор, У. Революционное влияние 3D-печати в семи отраслях производства / У. Тревор // [isicad.ru](http://isicad.ru). 2014. № 125. С. 29 – 31.
74. Тревор, У. Революционное влияние 3D-печати в семи отраслях производства / У. Тревор // [isicad.ru](http://isicad.ru). 2014. № 125. С. 29 – 31.
75. Трубашевский, Д. Цифровые фабрики Индустрии 4.0. Осязаемые прототипы нового технологического уклада / Дмитрий Трубашевский, Владимир Ежелевко, ООО «Современное оборудование», группа компаний «Солвер» // Умное производство. 2017. № 38. 11 с.

76. Тушавин, В.А. Управление качеством ИТ-процессов производственного предприятия: монография. // В.А. Тушавин. М.: Научные технологии. – 2015. – 247 с.

77. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. №203 “О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы”.

78. Федеральный закон РФ «О техническом регулировании (с изменениями на 29 июля 2017 года).

79. Федюкин В. К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции: учебное пособие / В. К. Федюкин. – Москва : КНОРУС, 2017. – 320 с.

80. Федюкин, В.К. Управление качеством: проблемы, исследования, опыт: сборник научных трудов. / В.К. Федюкин – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2014. – 238с.

81. ФР 1.31.2009.05414 «МВИ №64-04. Атмосферный воздух рабочей зоны, воздух не производственных помещений, промышленные выбросы. Методика выполнения измерений массовой концентрации хлористого винила, гексена, гептена, метилена хлористого, изопропилбензола, метилметакрилата, октена, пентана, пропилбензола, трихлорэтилена, хлорбензола, этилбензола, этанола на портативных газовых хроматографах ФГХ и ПГХ».

82. ФР.1.31.2009.05510 «МВИ № 46-07Атмосферный воздух рабочей зоны, воздух не производственных помещений, промышленные выбросы. Метод выполнения измерений массовой концентрации альфа-метилстирол, анилина, ацетальдегида, бутилакрилата, н-бутилбензола, винилацетата, изооктилового спирта, мезитилена, метилакрилата, метилацетата, метилбутилкетона, метилового спирта, пропилацетата, псевдокумола, скипидара, циклогексана, этилового эфира, этиленхлоргидрина, этилхлорида на портативных газовых хроматографах ФГХ и ПГХ».

83. Цифровая экономика и «Индустрия 4.0»: проблемы и перспективы: труды научно-практической конференции с международным участием / под ред. д-ра экон. наук, проф. А.В.Бабкина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 685 с.

84. Чабаненко, А.В. Analysis and synthesis of organizational and technical solutions in the organization of the high-tech production А. В. Чабаненко // Известия кафедры UNESCO «дистанционное инженерное образование» ГУАП., СПб., 2016 С. 24-28.

85. Чабаненко, А.В. Production of CEA casings based on combined FDM technology / А. В. Чабаненко // Известия кафедры UNESCO «дистанционное инженерное образование», сборник статей. ГУАП, 2017.

86. Чабаненко, А.В. Анализ технического уровня производственных мощностей предприятия / А.В. Чабаненко, Е.Г. Семенова, С.В. Богословский, А.Г. Степанов // Вопросы радиоэлектроники. 2017. №5. С. 58-60.

87. Чабаненко, А.В. Выявление ключевых показателей качества технологического процесса производства корпуса РЭА на основе FDM / А.В. Чабаненко., Семенова Е.Г., Назаревич С.А. // Радиопромышленность. 2017 №4. С. 141-145.

88. Чабаненко, А.В. Диагностические методики для повышения качества технической системы / Чабаненко А.В., Семенова Е.Г., Назаревич С.А. // Избранные научные труды Шестнадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» М.,2018. № 1 (444) С. 280-288.

89. Чабаненко, А.В. Инструменты управления качеством (методическое пособие) / А.В. Чабаненко, С.А. Назаревич // СПб.: Изд-во: ГУАП, 2015. С. 106.

90. Чабаненко, А.В. Комбинированная технология производства в авиастроительной промышленности / А. В. Чабаненко // России Международная научно-практическая конференция «Новая наука: стратегии и вектор развития» Ижевск.,2016 в 2ч. №1 С. 32-37.

91. Чабаненко, А.В. Назаревич С. А. Обучение основам работы на аддитивных установках с учётом экологических требований 3D-печати / А. В. Чабаненко // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции: "Формирование престижа профессии инженера у современных школьников" в рамках Петербургского образовательного форума, СПб. С. 248-251.



92. Чабаненко, А.В. Обеспечение качества аддитивного производства посредством системы контроля послойного синтеза / А.В. Чабаненко, Е.Г. Семенова, В.О. Смирнова, А.О. Смирнов, Н.Н. Рожков // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №10. С. 75-79.

93. Чабаненко, А.В. Обеспечение качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям с учётом входимости модулей РЭА / А.В. Чабаненко, В.О. Смирнова // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. науч. сессии ГУАП – СПб.: ГУАП, 2018. - 192-194.

94. Чабаненко, А.В. Оценка качества дрейфующих моделей базовых структур инновационных технологий / Чабаненко А.В., Назаревич С.А., Балашов В.М., Гулевитский А.Ю. // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 109-114.

95. Чабаненко, А.В. Оценка производства корпусов РЭА на основе комбинированной FDM технологии / А. В. Чабаненко // Избранные научные труды Шестнадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» М. 2017. Вып. 1 (416) С. 374-379.

96. Чабаненко, А.В. Повышение качества производства с использованием аддитивных технологий / Chabanenko, A.V. Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование. Курск. 2017. С. 186-190.

97. Чабаненко, А.В. Разработка и внедрение системы управления производством инновационной продукции / А. В. Чабаненко, Г.Ю. Гулевитский // Избранные научные труды Четырнадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» М.,2015. №1 (931) С. 159-164.

98. Чабаненко, А.В. Разработка методов повышения качества аддитивного производства конструктивных элементов РЭА / Смирнов, А.О., Чабаненко, А.В. // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 1. С. 118-122.

99. Чабаненко, А.В. Совершенствование производственных процессов в наукоемком производстве корпусов РЭА / А. В. Чабаненко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. СПб., 2017. С. 130-133.

100. Чабаненко, А.В. Совершенствование процессов управления

наукоемким производством и оценки его потенциала / А.В. Чабаненко // Радиопромышленность. 2016.№4. С. 45-48.

101. Чабаненко, А.В. Способ производства корпусов РЭА на основе комбинированной FDM технологии / А. В. Чабаненко // Научные исследования – 2017. М., 2017 С. 616.

102. Чабаненко, А.В. Стандартизация наукоемкой продукции / А.В. Чабаненко // // РИА: Журнал.: «Стандарты и качество». 2015.. №1. С. 169-176.

103. Чабаненко, А.В. Стандартизация наукоёмкой продукции / Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем / СПбГУАП. СПб., 2015. С. 48-56.

104. Чабаненко, А.В. Технология аддитивного производства, моделирование и управление качеством процесса послойного синтеза (учебное пособие) / А.В. Чабаненко, С.А. Назаревич, А.Ю. Гулевитский, Я.А. Щенников // СПб.: Изд-во: ГУАП, 2018. С. 206.

105. Чабаненко, А.В. Управление качеством корпусных элементов РЭА / А. В. Чабаненко // РИА: Журнал.: «Стандарты и качество». 2018. №2. С. 90-94.

106. Чабаненко, А.В. Управление качеством процесса послойного синтеза корпусных элементов РЭА // Чабаненко А.В., Семенова Е.Г., Смирнова В.О. // Избранные научные труды Шестнадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» М.,2018 №1 (444) С. 332-337.

107. Чумаков, Д. М., Перспективы использования аддитивных технологий при создании авиационной и ракетно-космической техники/ Д. М. Чумаков // Труды МАИ. 2014. №78. 22 с.

108. Юдина, М. А. Индустрия 4. 0: перспективы и вызовы для общества / Юдина, М. А. // Государственное управление. Электронный вестник. 2017. №60. С. 197-215.

109. Brussee, W. Statistics for Six Sigma Made Easy! / W. Brussee // McGraw-Hill Education. –2012. –P. 304.

110. Chabanenko, A.V. Electrodynamic analysis of materials for the antenna elements / Chabanenko, A.V., Frolova, E.A., Balashov, V.M., Smirnova, M.S. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. №450.

111. Chabanenko, A.V. Quality Assurance of Hull Elements of Radio-Electronic Equipment by Means of Control System / Chabanenko, A.V., Anatoly P.Y. IEEE International Conference. 2018.

**Листинг подпрограммы Matlab расчёт температурного воздействия**

```

clear all;
clc;
Eurocode_reduction_factors=[20,1,1,1;100,1,1,1;200,0.9,0.807,0.89;300,0.8,0.613,0.78;400,0.7,0.42,0.65;500,0
.6,0.36,0.53;600,0.31,0.18,0.3;700,0.13,0.075,0.13;800,0.09,0.05,0.07;900,0.0675,0.0375,0.05;1000,0.045,0.02
5,0.03;1100,0.0225,0.0125,0.02];
M=Eurocode_reduction_factors;
%M matrix has been defined to have all reduction factors for calculating material at elevated
%M=[temperature,reduction factor for elastic modulus(page 22),reduction factor for
%proportional limit(page 22), reduction factor for yield stress(page 78)]
fyb=550;%N/mm2 The basic yield strength from eurocode 3 part 1.2 (fyb is depend on steel).
E=205000;%N/mm2 ELastic modulus from eurocode.
Aa1=0.02;
[a b]=size(M);
i=1:a;
ii=2;
iii=3:b;
New_Elastic_Modulus=E*M(i,ii);
MM=New_Elastic_Modulus;
New_Proportional_Yield=fyb*M(i,iii);
MMM=New_Proportional_Yield;
%calculating ey0.2p;
eproof=0.002+(MMM(i,2)./MM);
epr=eproof;
eproportional=MMM(i,1)./MM;
ep=eproportional;
Calculated_Material=[M(i,1) MM eproportional MMM(i,1) eproof MMM(i,2)];
MMMM=Calculated_Material;
%*****

```

**Листинг подпрограммы Matlab нейросеть прогнозирования**

Neural Network

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_name">name</a>: 'Custom Neural Network'

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_userdata">userdata</a>: (your custom info)

dimensions:

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numInputs">numInputs</a>: 1

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numLayers">numLayers</a>: 2

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numOutputs">numOutputs</a>: 1

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numInputDelays">numInputDelays</a>: 0

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numLayerDelays">numLayerDelays</a>: 0

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numFeedbackDelays">numFeedbackDelays</a>: 0

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_numWeightElements">numWeightElements</a>: 118

<a href="matlab:doc nnproperty.net\_sampleTime">sampleTime</a>: 1



## Исследование полимеров, применяемых в аддитивном производстве по способу МПН

Таблица 1 – Выявленные показатели полимеров типа ABS

№	Наименование полимера	Механические свойства						Термические свойства		Физические свойства						
		Прочность при растяжении Мпа	Прочность при изгибе Мпа	Модуль упругости Мпа	Ударная вязкость по Изоду 1/4" (надрезом) Дж/ м <sup>2</sup>	Ударная вязкость по Изоду 1/8" (надрезом) Дж/ м <sup>2</sup>	Твердость по Роквеллу R-шкала	Температура начала деформации при 1,82 Мпа в С	Температура размягчения по Вика при 5 кг/ м <sup>2</sup> в С	Плотность при 23 С в г/см <sup>3</sup>	Показатель текучести расплава при 220 С в 10 мин в г.	Усадка при 23 С в %	Степень стойкости к горению в НВ	Массовая доля воды, не более	Блеск в %	Массовая доля летучих веществ менее
1	ABS	45	64	2200	97	215	105	85	95	1,05	30	0,4	1	0,1	10	0,1
2	ASA-пластик WR-9100	47	66	2300	98	226	107	89	97	1,08	35	0,4	1	0,1	10	0,1
3	ASA-пластик WR-9120	44	61	2000	98	314	102	87	96	1,07	23	0,4	1	0,1	10	0,1
4	ASA-пластик WR-9160	37	53	1600	98	588	90	80	91	1,08	4	0,4	1	0,1	10	0,1
5	ASA-пластик WR-9730	44	61	1900	98	539	100	86	97	1,08	5	0,4	1	0,1	10	0,1
6	АБС-пластик EG-0763	40	58	2000	343	490	100	85	96	1,04	12,8	0,4	1	0,1	10	0,1
7	АБС-пластик ES-0163	40	58	2100	333	471	99	90	100	1,04	6	0,4	1	0,1	10	0,1
8	АБС-пластик HF-0660I	43	61	2200	196	472	106	85	97	1,04	38,4	0,4	1	0,1	10	0,1
9	АБС-пластик HF-0680	41	62	2300	216	275	106	85	97	1,04	52,8	0,4	1	0,1	10	0,1
10	АБС-пластик HG-0760	44	65	2300	216	265	106	86	98	1,04	25	0,4	1	0,1	10	0,1

1 1	АБС-пластик HG-0760GP	41	60	2100	235	294	106	85	96	1,04	43	0,4	1	0,1	10	0,1
1 2	АБС-пластик HG-0760AT	43	62	2200	196	314	106	84	95	1,08	50	0,4	1	0,1	10	0,1
1 3	АБС-пластик MP-0160	44	61	2400	280	370	105	85	97	1,05	18	0,4	1	0,1	10	0,1
1 4	АБС-пластик MP-0160R	39	55	2200	280	382	100	86	98	1,05	24	0,4	1	0,1	10	0,1
1 5	АБС-пластик MP-0660I	44	65	2400	280	360	105	84	98	1,05	24	0,4	1	0,1	10	0,1
1 6	АБС-пластик PT-0170M	44	61	2200	255	300	106	85	87	1,04	16	0,4	1	0,1	10	0,1
1 7	АБС-пластик PT-0175	35	53	1800	255	420	96	82	94	1,03	20	0,4	1	0,1	10	0,1
1 8	АБС-пластик QHF-0140	43	115	9900	23	38	108	85	97	1,04	31,5	0	1	0,1	10	0,1
1 9	АБС-пластик QSD-0150	40	115	9800	28	36	105	84	98	1,04	19,5	0	1	0,1	10	0,1
2 0	АБС-пластик QSD-0170	35	95	7900	42	46	92	84	94	1,02	0,9	0,4	1	0,1	10	0,1
2 1	АБС-пластик QSD-0180	30	80	6500	44	55	82	82	89	1,01	0,7	0,4	1	0,1	10	0,1
2 2	АБС-пластик SD-0150	47	69	2200	235	294	107	88	100	1,04	20	0,4	1	0,1	10	0,1
2 3	АБС-пластик SD-0160	37	55	2000	333	441	99	86	97	1,04	13	0,4	1	0,1	10	0,1
2 4	АБС-пластик SD-0170	34	49	1800	353	461	92	84	95	1,03	10,5	0,4	1	0,1	10	0,1
2 5	АБС-пластик SV-0167	39	56	2000	333	402	100	89	99	1,03	3,7	0,4	1	0,1	10	0,1

Таблица 2 – Выявленные показатели полимеров типа ABS специальный

№	Наименование полимера	Механические свойства			Термические свойства			Физические свойства											
		Прочность при растяжении Мпа	Температура размягчения по Вика при 5 кг/см <sup>2</sup> в С	Плотность при 23 С в г/см <sup>3</sup>	Показатель текучести расплава при 220 С в 10 мин в г.	Усадка при 23 С в %	Степень стойкости к горению в НВ	Массовая доля воды, не более	Блеск в %	Массовая доля летучих веществ менее	Относительное удлинение при разрыве не менее %	Ударная вязкость по Шарпи образца типа 2 с надрезом типа В при 23 С	Ударная вязкость по Шарпи образца типа 2 с надрезом типа В при -30 С	Температура изгиба под нагрузкой не менее С.	Ударная вязкость по Изоду	Массовая доля остаточных мономеров стирола /акрилонитрила	Ударная вязкость по Шарпи на образцах с надрезом		
26	АБС-ОМ-2020-30	не менее 38 МПа.	108 С.		в пределах 5-25 г/10мин.	0				0,2			не менее 32 кДж/м <sup>2</sup>	не менее 12 кДж/м <sup>2</sup>					
27	АБС-пластик 0809-30	не менее 41,6 Мпа	106 С.		в пределах 2,5-5,5 г/10мин.	0		0,3							104	не менее 8,8 кДж/ м <sup>2</sup> (9,0 кгс·см/см2).	не более 0,05/0,001 %.		
28	АБС-пластик 0809М	не менее 40 МПа.	110		не менее 5,0 г/10мин.	0		0,3			20				109	не менее 16,0 кДж/ м <sup>2</sup>		не менее 14 кДж/ м <sup>2</sup> .	
29	АБС-пластик 2020-30 высшего сорта	38,2	97		7			0,28		0,1	22				100	не менее 24,5 кДж/ м <sup>2</sup> (25,0 кгс·см/см2).			
30	АБС-пластик 2020-31 высшего сорта	49	109		14			0,28		0,1	22				100	не менее 24,5 кДж/ м <sup>2</sup> (25,0 кгс·см/см2).			
31	Композиционный материал АБС/ПК Дискари-Л	не менее 50 МПа.	не ниже 120 С.		в пределах 12,0-20,0 г/10мин.	0		не более 0,20 %			50				105	не менее 45,0 кДж/ м <sup>2</sup>	не менее 25 кДж/ м <sup>2</sup>		



3 2	Композиционный материал АБС/ПК Дискар-СЛ	не менее 50 МПа.	не ниже 120 С.		в пределах 20,0-53,0 г/10мин.	0		не более 0,20 %.		50		105	не менее 45,0 кДж/ м <sup>2</sup>	не менее 25 кДж/ м <sup>2</sup>
3 3	Композиционный материал АБС/ПК Дискар-Э	не менее 50 МПа.	не ниже 115 С.		в пределах 7,0-12,0 г/10мин.	0		не более 0,20 %.		50		100	не менее 45,0 кДж/ м <sup>2</sup>	не менее 25 кДж/ м <sup>2</sup>
3 4	АБС-пластик 1030-30	не менее 35,3 МПа (360 кгс/см <sup>2</sup> )	не ниже 90 С.		в пределах 20-30 г/10мин.	0		не более 0,30 %.	80 %.	20			не менее 12,0 кДж/ м <sup>2</sup> (12,2 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.
3 5	АБС-пластик 1030-31	не менее 35,3 МПа (360 кгс/см <sup>2</sup> )	не ниже 88 С.		не менее 30,0 г/10мин.	0		не более 0,30 %.	80 %.	17			не менее 10,0 кДж/ м <sup>2</sup> (10,2 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.
3 6	АБС-пластик 1106М-30	не менее 38,2 МПа (390 кгс/см <sup>2</sup> ).	не ниже 95 С.		в пределах 1,0-3,5 г/10мин.	0		не более 0,30 %.	50 %.	25			не менее 19,6 кДж/ м <sup>2</sup> (20,0 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.
3 7	АБС-пластик 1106М-31	не менее 38,2 МПа (390 кгс/см <sup>2</sup> ).	не ниже 95 С.		в пределах 3,5-6,2 г/10мин.	0		не более 0,30 %.	50 %.	25			не менее 19,6 кДж/ м <sup>2</sup> (20,0 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.
3 8	АБС-пластик 1106-30 высшего сорта	не менее 38,2 МПа (390 кгс/см <sup>2</sup> ).	не ниже 96 С.		в пределах 1,0-3,0 г/10мин.	0		не более 0,25 %.		25			не менее 19,6 кДж/ м <sup>2</sup> (20,0 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.
3 9	АБС-пластик 1530-30	не менее 34,3 МПа (350 кгс/	не ниже 90 С		в пределах 10-17 г/10мин.	0				13			не менее 19,6 кДж/ м <sup>2</sup> (20,0 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	

		см <sup>2</sup> ).														
4 0	АБС- пластик 2020-32	не менее 38,2 МПа (390 кгс/ см <sup>2</sup> ).	не ниже 97 С.		в пределах 12- 17 г/10мин.	0		0,3			22			96	не менее 24,0 кДж/ м <sup>2</sup> (24,5 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.
4 1	АБС- пластик 2020-60	29,4	80	1,03	6	0	1	0,3	10	0,1	15				не менее 10,8 кДж/ м <sup>2</sup> (11,0 кгс·см/см2).	
4 2	АБС- пластик 2802-30 высшего сорта	не менее 36,3 МПа (370 кгс/ см <sup>2</sup> ).	не ниже 95 С.		в пределах 1,3-2,5 г/10мин.	0		0,3			30				не менее 34,0 кДж/м <sup>2</sup> (35,0 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	
4 3	АБС- пластик АБС-С	не менее 30,0 МПа (306 кгс/ см <sup>2</sup> ).	не ниже 95 С.		не менее 7,0 г/10мин.	0	ПВ-0	0,3			8				не менее 5,0 кДж/ м <sup>2</sup> (5,1 кгс·см/ см <sup>2</sup> ).	не более 0,05/0,001 %.

**Схема организации производства по аддитивной технологии**

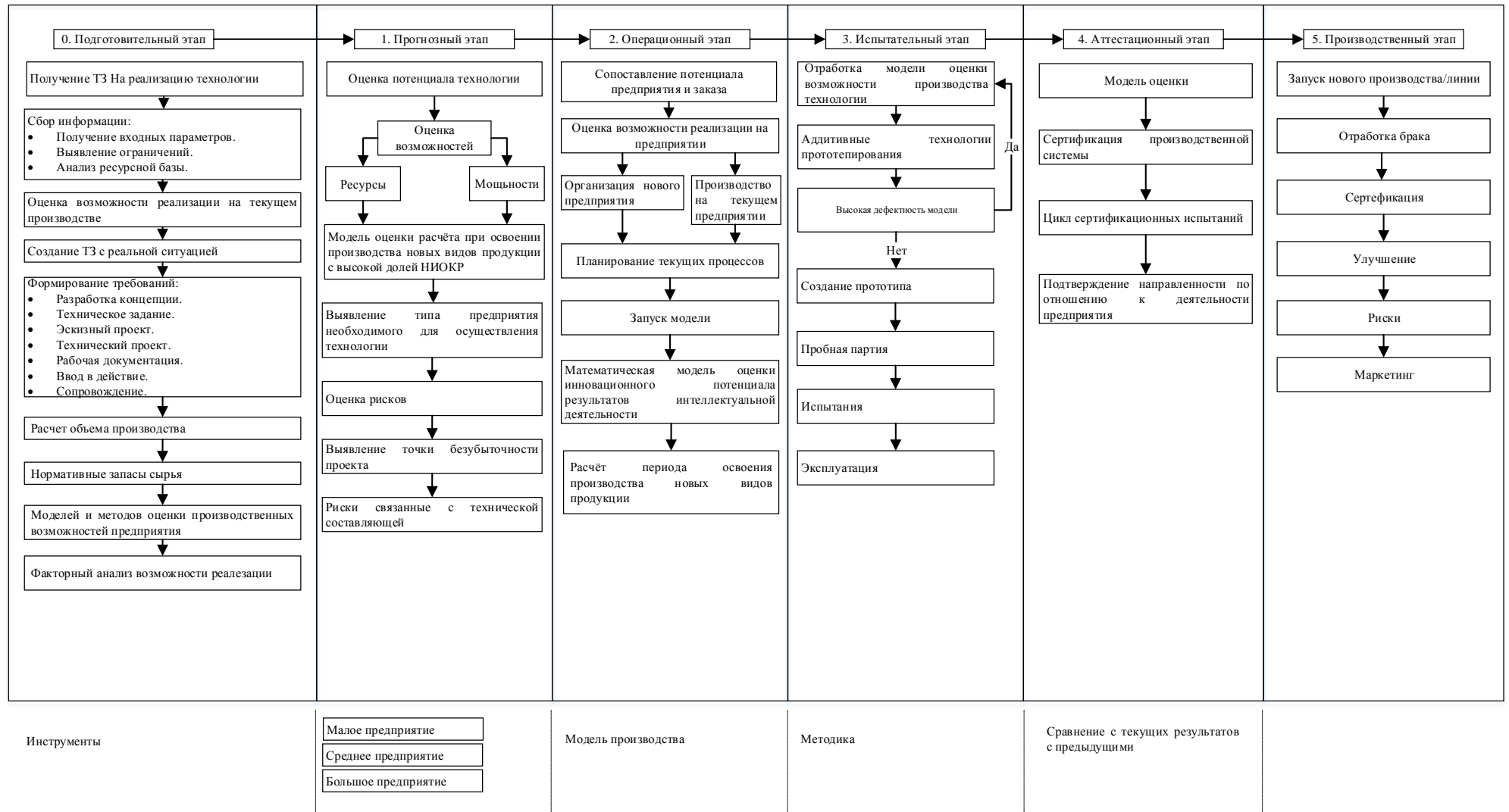


Рисунок 1.9 – Схема организации производства с использованием наукоёмких технологий

Таблица 1 – Оценка производственного потенциала

Производственный потенциал предприятия	Критерий 1 уровня	Критерий 2 уровня	Выявление критерия	
	<b>Показатели технологичности, характеризующие конструкцию</b>	Коэффициент унификации конструкции изделия	$K_y = (E_y - D_y) / (E - D),$	
		Коэффициент унификации сборочных единиц	$K_{y.e} = K_y / E$	
		Коэффициент унификации деталей	$K_{y.d} = D_y / D$	
		Коэффициент стандартизации изделия	$K_{cm} = (E_{cm} - D_{cm}) / (E - D),$	
		Коэффициент стандартизации сборочных единиц	$K_{cm.e} = E_{cm} / E$	
		Коэффициент стандартизации деталей	$K_{cm.d} = D_{cm} / D,$	
		Коэффициент контролепригодности изделия	$K_k = (H_{k.n} - H_{m.k} - 1) / H_{k.n} - H_{т.к},$	
		Коэффициент повторяемости марок монтажного провода в изделии	$K_{n.m} = 1 / M_{m.np},$	
		Коэффициент повторяемости электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в изделии	$K_{k.э} = (1 - H_{тэрэ}) / H_{эрэ},$	
		Коэффициент применяемости интегральных схем (ИС) в изделии	$K_{ис} = H_{элис} / (H_{элис} + H_{эл}),$	
		Коэффициент применяемости полупроводниковых приборов в изделии	$K_{пи} = H_{пи} / (H_{пи} + H_{рл}),$	
		Коэффициент регулируемости схемы изделия на элементной базе	$K_{p.c} = H_{кр.эл} / (H_{нр.эл} + H_{p.эл}),$	
		<b>Показатели технологичности технологии, характеризующие технологию изготовления изделий.</b>	Трудоемкость изготовления изделия	$T = \sum_i T_i,$
			Технологическая себестоимость изделия:	$C_m = C_m + C_з + C_{ин} + C_o,$
Коэффициент применения типовых технологических процессов:	$K_{mn} = T_{mn} / T,$			
Коэффициент автоматизации и	$K_{a.m} = T_{a.m} / T,$			

	механизации технологических процессов:	
	Коэффициент автоматизации установки радиоэлементов на печатные платы:	$K_{a.y} = H_{a.y} / H_{p.y}$ ,
	Коэффициент автоматизации механизации технологических процессов контроля:	$K_{m.a.k} = T_{m.a.k} / T_k$ ,
	Коэффициент применения печатного монтажа:	$K_{np.n.m} = H_{к.п.з} / H_{п.с}$ ,
	Относительная трудоемкость сборочно-монтажных работ при изготовлении изделия:	$T_{o.c.m.u} = T_{c.m.u} / T_u$ ,
	Относительная трудоемкость настроечно-регулирующих работ:	$T_{o.np.u} = T_{np.u} / T_u$ ,
	Коэффициент использования материала:	$K_{u.m.o} = M_o / M_{з.д}$ ,
	Трудоемкость изготовления изделия	$T = \sum_i T_i$ ,
<b>Базовые показатели и уровень технологичности конструкции</b>	Трудоемкость изготовления блока:	$T_{\text{бб}} = T_a K_{cl} K_m$ ,
	Коэффициент снижения трудоемкости изготовления изделия:	$K_m = \left( \frac{100}{100 + K_{n.m}} \right)^t$
	Основной показатель оценки технологичности конструкции:	$K = \frac{\sum_{i=1}^s r_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^s \varphi_i} = \frac{r_1 \varphi_1 + r_2 \varphi_2 + \dots + r_s \varphi_s}{r_1 + \varphi_1 + \dots + \varphi_s}$
	Расчет нормативного комплекса:	$K_n = K_a K_{c.l} K_{m.y} K_{o.n} K_{o.m} K_n$
	Трудоемкость изготовления блока:	$T_{\text{бб}} = T_a K_{cl} K_m$ ,
<b>Показатели технологичности конструкций узлов и блоков</b>	Коэффициент применяемости деталей:	$K_{n.o} = 1 - D_{m.op} / D_m$
	Коэффициенты применяемости и повторяемости электрорадиоэлементов:	$K_{n.э} = 1 - H_{m.op.э} / H_{m.э} = 1 - H_{m.э} / H_э$
	Коэффициент использования микросхем	$K_{к.мс} = H_{мс} / (H_{мс} + H_э)$

		и микросборок		
		Коэффициент автоматизации и механизации монтажа блока	$K_{a.m} = H_{a.m} / H_m$	
		Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{m.n.э} = H_{m.n.э} / H_э$	
		Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки электрических параметров	$K_{m.k.n} = H_{m.k.n} / H_{k.n}$	
		Коэффициент прогрессивности формообразования деталей:	$K_{\phi} = D_{np} / D$	
		Коэффициент применяемости деталей:	$K_{n.d} = 1 - D_{m.op} / D_m$	
	<b>Оценка продукции</b>	Оценка наукоёмкости производимой продукции	$(V_{ниокp} / V_{вп}) 100\%$	Т В С С Н

### **Формула способа производства корпусов радиоэлектронной аппаратуры на основе комбинированной технологии послойного наложения расплавленной полимерной нити**

Способ производства корпусов радиоэлектронной аппаратуры заключающийся в формировании задания для печати при помощи трёхмерной модели, задании параметров послойной печати, создание корпуса по цифровой 3D модели .

Отличающийся тем, что после задания параметров послойной печати с учётом размещения радиоэлектронных компонентов загружают термопластик с разной фактурой поверхности и температурно-прочностными характеристиками, нагревают, печатают корпус РЭА путём послойного наложения расплавленной полимерной нити, после чего изделие выдерживают не менее трёх часов для усадки с помощью сушки, после чего производят постпечатную обработку проводят растворителями, например растворителями пластмасс.

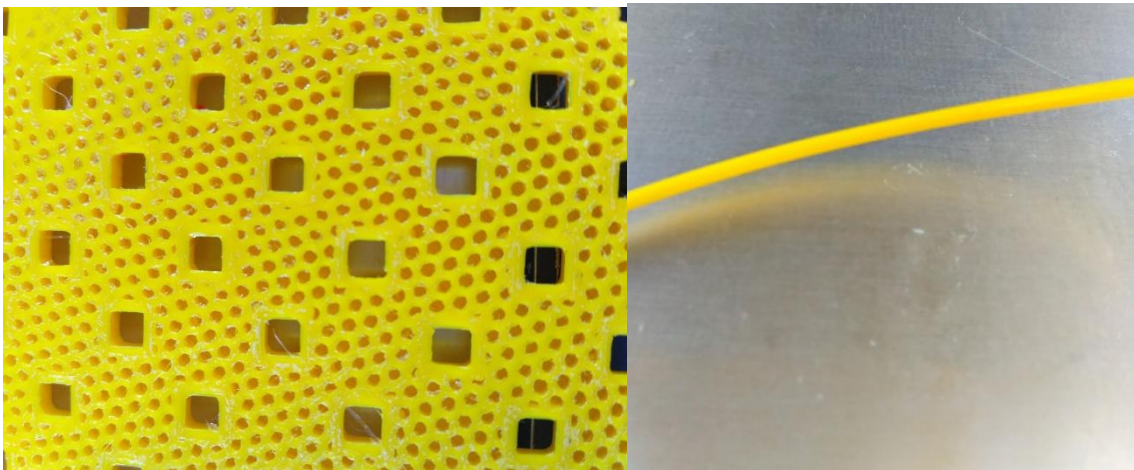


Рисунок 1 – Процесс производства

**Приложение Д****Формализованная процедура «Контроль процесса печати с использованием аддитивной установки»**

Ввиду сложности технологического процесса печати на аддитивной установке стало необходимым разработать документированную процедуру.

Основными задачами поставленными в документированной процедуре являются: установление и нормирование требований к выполнению работ в системе качества; обеспечение воспроизводимости процессов административного управления качеством; регулярная регистрация фактических данных о качестве продукции и состоянии системы качества в ходе ее функционирования и совершенствования; обеспечение идентификации и прослеживаемости продукции и измерительного оборудования; закрепление лучших традиций и накопленного опыта по организации и проведению работ в системе качества; разрешение и предупреждение спорных вопросов в процессе деятельности в системе качества; обеспечение оценки соответствия продукции и системы менеджмента качества.

На титульном листе документированной процедуры (рис. 1) указаны следующие сведения: наименование организации, наименование процесса СМК, сведения о разработчике, идентификация документа, идентификация количества страниц в документе.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
ООО «ПАНТЕС групп»

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
ООО «ПАНТЕС групп»

---

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

Контроль процесса печати с использованием аддитивной установки

Технологическая инструкция

Разработчик: А.В. Чабаненко

Количество стр. документа 12

Санкт-Петербург 2015

## Документированная процедура

В разделе «Область применения» (рисунок 2) отражено распространение данного документа. Для этого была составлена классификация корпусов по каталогу.

### Область применения

Данная документированная процедура относится к приёмо-сдаточному контролю корпусов РЭА, изготовленных с использованием аддитивных технологий. Владельцем процесса является контролер ОТК.

## 1. Общие положения

### 1.1. Информация о владельце процесса и вышестоящего процесса

Владелец процесса «Контроль геометрических параметров корпусов РЭА»	Контролер ОТК
Владелец вышестоящего процесса «Контроль производимой продукции»	Начальник ОТК

### 1.2. Модель взаимодействия процессов СМК

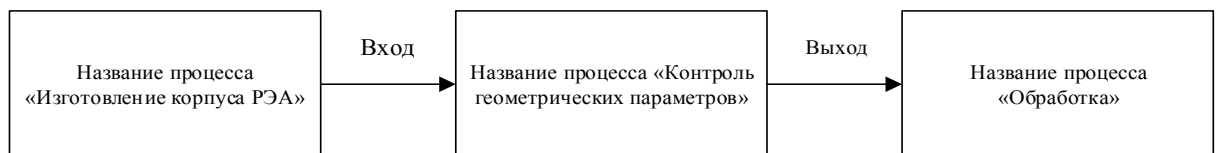


Рисунок 1 – Модель взаимодействия процессов СМК

### 1.3. Требования ко входу

Таблица 2 – Разделы «Область применения» и пункты 1.1–1.3 «Общих положений»

Вход	Процесс поставщик (подразделение)	Владелец процесса поставщика	Требования к входу
Экструдер	Цех. с аддитивными установками	Мастер участка готовой продукции	Соответствие размеров конструкторско-технологической документации

На основании маршрутного листа, в «Общих положениях» (рисунок 2, 3, 4) определены владелец описанного и вышестоящего процесса, модель взаимодействия процессов. Требования к выходу, входу и сама модель процесса разработана ориентируясь на опыт работы с данным процессом. Требования к ресурсам разработаны на основании имеющихся аттестатов поверки, рабочей инструкции контролера ОТК и положении об отделе технического контроля. Требования к управляющим воздействиям разработаны на основании технологического процесса, чертежа и разрабатываемой ДП.

#### 1.4. Требования к выходу

Выход	Процесс потребитель (подразделение)	Владелец процесса потребителя (руководитель подразделения)
Экструдер, Запись в журнале отклонений	Участок обработка	Мастер участка готовой продукции

#### 1.5. Модель процесса

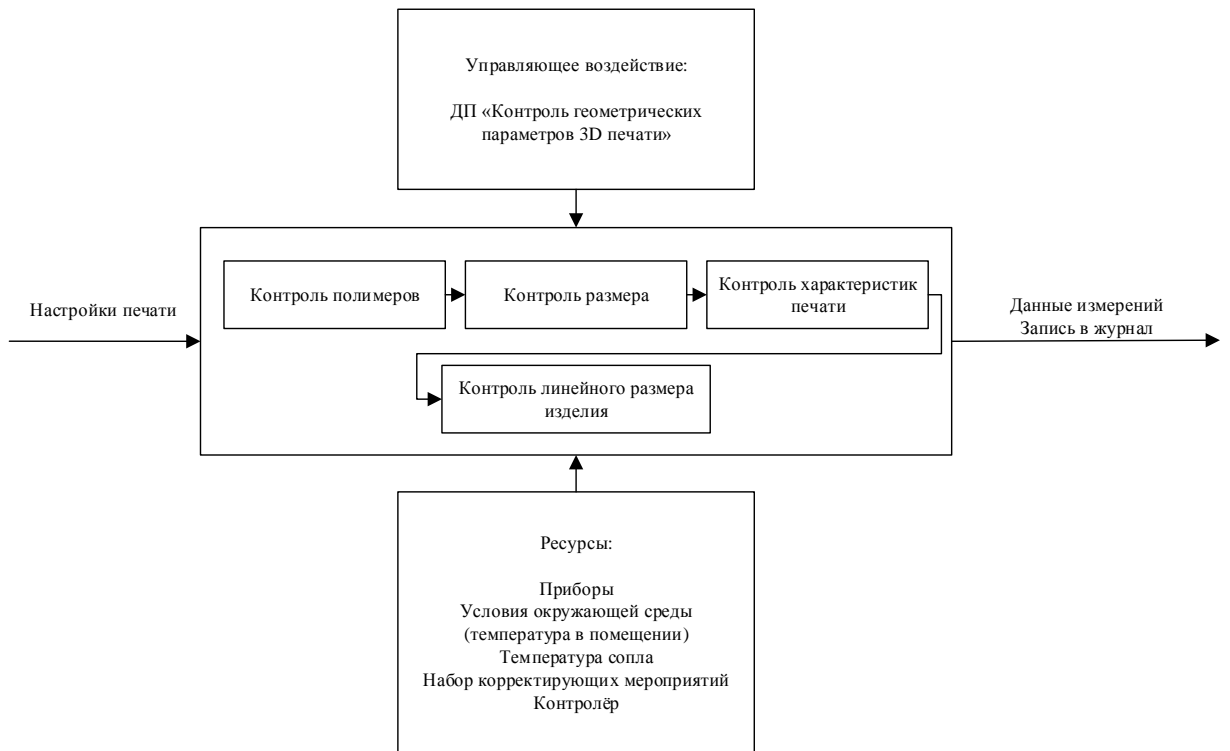


Рисунок 2 – «Общие положения»

## 1.6 Требованиям ресурсам

Ресурс	Процесс-поставщик (подразделение)	Владелец процесса поставщика ресурса (руководитель подразделения)	Требования к Р«УР<7
Приборы	Отдел технического контроля	Начальник ОТК	Аттестат поверки
Условия окружающей среды	ОТК	Начальник ОТК	Н у. окружающей среды
Особенности задания	ОТК	Начальник ОТК	Аттестат поверки
Набор габаритов корпуса РЭА	ОТК	Начальник ОТК	Аттестат поверки
Контролер	ОТК	Начальник ОТК	Среднее техническое образование

## 1.7 Требованиям управляющим воздействиям

Таблица 3 – Пункты 1.6–1.7 раздела «Общие положения»

Управляют не воздействия	Процесс управления (подразделения)	Владелец процесса управления
ДП «Контроль геометрических параметров корпуса РЭА»	ОТК	Начальник ОТК
Технологический процесс	Техно логический ОТДЕЛ	Технолог
Чертеж	Конструкторский отдел	Конструктор

В «Терминах и определениях» указаны термины, используемые в данной документированной процедуре и их определения с указанием источника.

В «Обозначениях и сокращениях» указаны обозначения и сокращения, которые встречаются в тексте документированной процедуры с пояснениями.

В «Нормативных ссылках» указаны все документы, на которые в тексте даны ссылки, с указанием идентификационного номера и названия.

## 2. Термины и определения

В настоящей процедуре применяются термины с соответствующими определениями согласно ГОСТ Р ИСО 9000-2015.

### 2.1. Обозначения и сокращения

В настоящей процедуре применяются следующие обозначения и сокращения:

ДП – документированная процедура

ОТК – отдел технического контроля;

СМК – система менеджмента качества.

## 3. Нормативные ссылки

В настоящей процедуре ССЫЛКИ на следующие нормативные документы: ГОСТ Р ИСО 9000-2015, чертежи технологическая документация на корпуса РЭА.

В «Описании процесса» подробно рассмотрен процесс СМК в текстовом виде, а также рассмотрен кратко в графической форме, с применением процессного подхода. Графическая форма описания процесса представляет собой алгоритм процесса в виде элементов блок-схемы (рисунок 6, таблица 1). Составлено на основании опыта работы с процессом.

Описание алгоритма процесса:

1. После того как Экструдер и соответствующий им чертеж с технологической документацией доставлены в ОТК и предъявлены в журнал распределителем работ, контролер ОТК начинает работу.

2. Сначала контролер устанавливает соответствие конструкции и маркировки изделия чертежу.

3. Если обнаружены несоответствия: либо распределитель работ ищет нужный чертеж, либо маркировщик вносит изменения в наименование изделия согласно чертежу. Контроль повторяется сначала после устранения несоответствий.

4. Затем контролер (предварительно подготовив (т.е. очистив) его поверхность) проверяет диаметр изделия по допуску на чертеже.

5. Для проверки размера от оси до вершины используется сравнение с заданием печати.

6. Контролер настраивает на допуски согласно технологической документации.

7. Далее к каждому изделию контролер прикрепляет пластину и проверяет прилегание по технологической документации.

8. В случае если прилегания нет, контроль этого изделия прекращается с соответствующей записью в журнал.

9. Далее контролер проверяет размер, указанный в чертеже и цифровом прототипе.

10. Все обнаруженные отклонения заносятся контролером в журнал, а количество проверенных деталей, дату и подпись в маршрутный лист. Если отклонений нет, распределитель работ перемещает Экструдер на участок сборки. В случае наличия отклонений Экструдер остаются в ОТК до принятия решения технологом.

11. Технолог принимает решение о годности/не годности, необходимости доработки. В том случае если резец признается бракованным, начальник ОТК выписывает на деталь Акт о несоответствующей продукции и назначает ответственного за расследование. Если необходима доработка, мастер участка

отдает корпус РЭА в цех на соответствующую доработку, после чего предъявляет контролеру вновь. Контролером под соответствующим отклонением пишется либо слово «Доработано», либо новое обнаруженное несоответствие, по которому вновь принимает решение технолог.

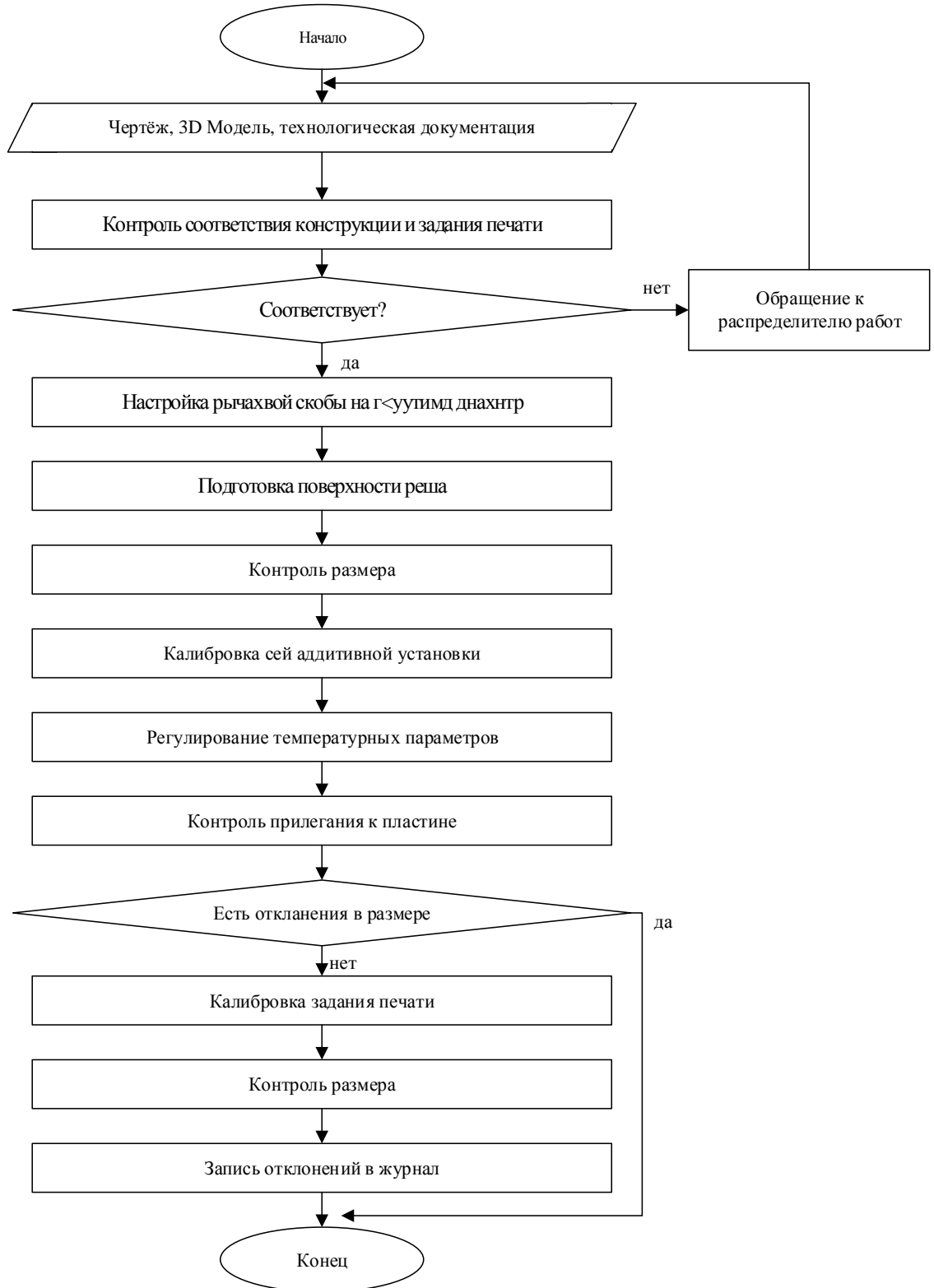


Рисунок 3 – Блок схема процесса

Таблица 4 – Алгоритм процесса

Название этапов процесса СМК	Участники	Необходимые записи/документы
Контроль соответствия конструкции и маркировки изделия	Контролер ОТК, Распределитель работ	Чертеж
Принятие решения		
Настройка рычажной скобы на заданный диаметр		Чертеж
Подготовка поверхности изделия		Технологическая документация
Контроль диаметра		Чертеж
Притирка заданного набора плиток для контроля размера от оси до пластины изделия		Технологическая документация
Настройка оборудования		Технологическая документация
Контроль прилегания к площадке		Технологическая документация
Принятие решения		
Выставление изделия		Технологическая документация
Контроль заданного размера по пластине		Чертеж
Запись отклонений в журнал и количества проверенных деталей в маршрутный лист		
Принятие решение технологом	Технолог, Распределитель работ Начальник ОТК Мастер участка готовой продукции	Записи в журнале (Приложение А), Акт о несоответствующей продукции (Приложение Б)

В «Оценке результативности процесса СМК» (рисунок 7) указаны критерии оценки результативности процесса СМК и описывается методика данной оценки. Данный раздел необходим для оценки результативности не только процесса, но и в дальнейшем для оценки результативности СМК в целом.

#### 6. Оценка результативности процесса СМК



Таблица 5 – Раздел «Оценка результативности»

Показатель результативности процесса	Оценка показателя результативности	Периодичность оценка	Форма записи
Доля годных корпусов	Количество корпусов за исключением тех, что признаны бракованными к общему количеству	Ежемесячно	журнал
Доля доработок	Доля корпусов, подвергшихся какой-либо доработки к общему количеству корпусов	Ежемесячно	Журнал

В разделе «Ответственность и полномочия» (рисунок 8) прописываются обязанности всех участников процесса в виде матрицы распределения ответственности на основании рабочих инструкций. Матрица распределения ответственности представляет собой таблицу, в которой столбцы – участники процесса СМК, а строки – этапы процесса СМК. На пересечении столбцов и строк буквенно обозначается уровень ответственности участников: О – ответственный за этап, С – соисполнитель этапа, И – исполнитель этапа; У – утверждающий документ.

## 7. Ответственность и полномочия

### 7.1 Матрица распределения ответственности

Название этапов процесса СМК	Участники процесса		
	Контролер отк	Начальник отк	Технолог
Контроль соответствия корпуса и тип размера	О, И		
Настроим аддитивной установки	О, И		
Подготовка задания печати	О, И		
Контроль размеров	О, И		
Корректировка параметров печати	О, И		
Настройка температурного режима	О, И		
Контроль прилегания к заготовки к платформе	О, И		
Контроль давления в экструдере	О, И		
Контроль заданного размера	О, И		
Запись отклонений в журнал и количества проверенных деталей в маршрутный лист	И	О	У

## Приложение А (обязательное)

## Форма журнала контроля

Наименование корпуса	Исполнитель	Предъявлено (шт.)	Годные (шт.)	Доработка (шт.)	Брак (шт.)	Выявленные отклонения	Число	Подпись
Решение технолога								

## Приложение Б (обязательное)

## Акт о несоответствующей продукции

Наименование детали \_\_\_\_\_, номер заказа \_\_\_\_\_.

Количество несоответствующих \_ шт. Всего \_\_\_\_\_ шт. в партии

Несоответствие вывалено на операции № \_\_\_\_\_.

Характер несоответствия \_\_\_\_\_

Причина несоответствия \_\_\_\_\_

Виновный в несоответствии \_\_\_\_\_

Затраты на несоответствующую продукцию \_\_\_\_\_

Возможные исправления \_\_\_\_\_

Начальник ОТК \_\_\_\_\_ *ФИО Подпись*

Технолог \_\_\_\_\_ *ФИО Подпись*

Экономист \_\_\_\_\_ *ФИО Подпись*

Ответственный за расследование \_\_\_\_\_ Должность, ФИО, Подпись

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИИ

№ ввод. в ДП изменений	№ извещ. об изм.	Номера листов (страниц)				ФИО, подпись ответ. лица дата	ФИО, подпись ответ. лица дата	Дата внесения изменения	Примечание
		измененных	заменённых	новых	аннулированных				

Начальник ОТК

*ФИО Подпись*

Технолог

ФИО Подпись

Экономист

ФИО Подпись

Ответственный за расследование Должность, ФИО, Подпись

**Приложение Е****Патент на базу данных: «Компоненты обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям»**

База данных содержит основные технологические операции производственного процесса изготовления, монтажа (наладки), испытаний и контроля качества изделий цифрового производства.

Свидетельство о государственной регистрации Чабаненко, А.В. «База данных компонентов обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям» // Чабаненко А.В., Семенова Е.Г. рег. № 20186221531 от 27.09.2018 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2018621531

**«Компоненты обеспечения качества корпусных элементов,  
выполненных по аддитивным технологиям»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения» (RU)*

Авторы: *Чабаненко Александр Валерьевич (RU),  
Семенова Елена Георгиевна (RU)*

Заявка № 2018620965  
Дата поступления 09 июля 2018 г.  
Дата государственной регистрации  
в Реестре баз данных 27 сентября 2018 г.

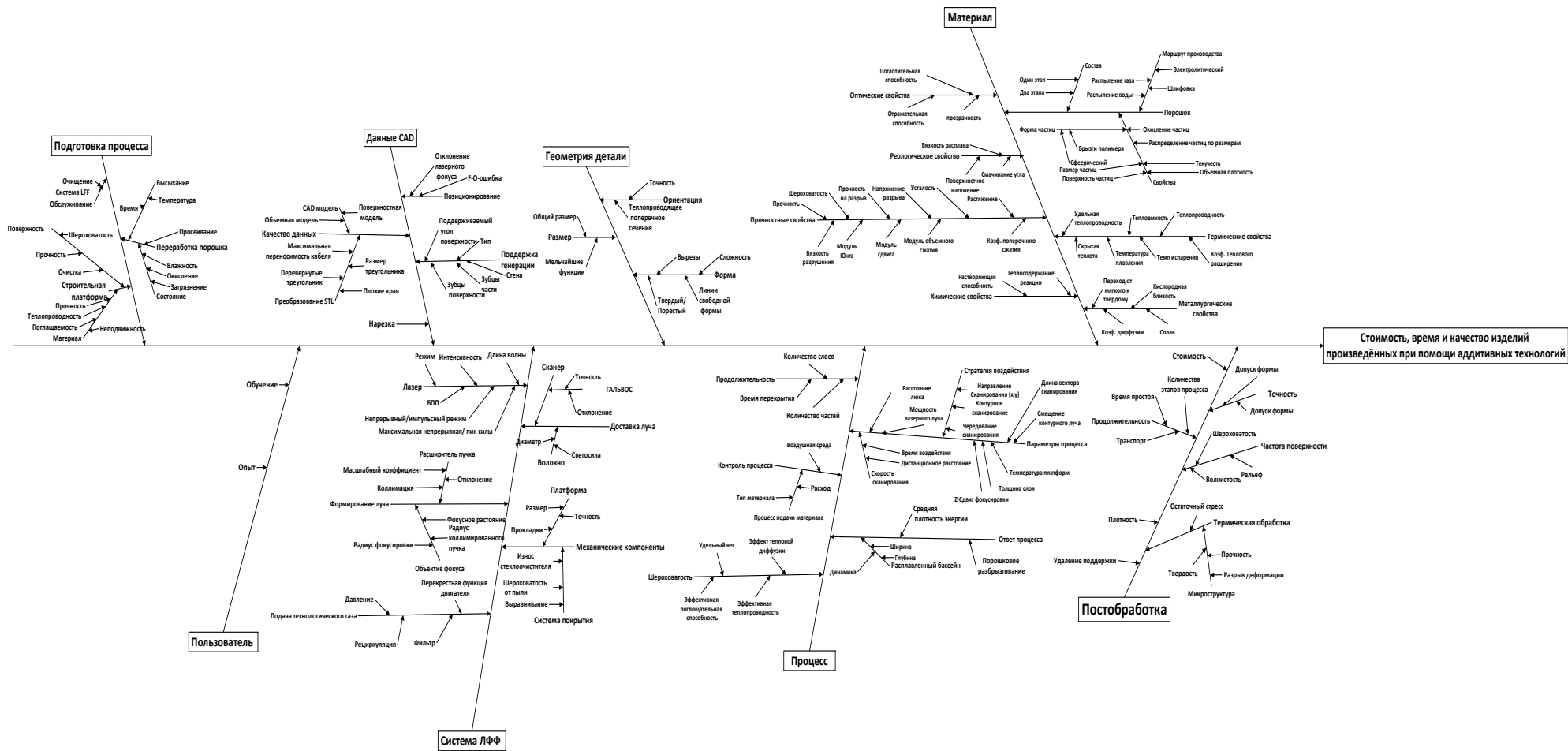
Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Рисунок 1 – Патент на базу данных

## Диаграмма причинно-следственных связей управления качеством корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям





**КОНТРАКТНОЕ  
ПРОИЗВОДСТВО И  
РАЗРАБОТКА  
ЭЛЕКТРОНИКИ**



Тел./Ф.: +7 (812) 740-7199, 740-7198  
Тел./Ф.: +7 (495) 229-31-43  
E-mail: pantес@pantes.ru  
www.pantes.ru; www.pantes-group.ru  
СПб, Ириновский пр., 2, офис 309

ИНН 5406562761 КПП 780601001

Юридический адрес: 195248, Санкт-Петербург г, Ириновский пр-кт, дом № 2 литер А

Почтовый адрес для финансовых документов: 195248, Санкт-Петербург, а/я 57



УТВЕРЖДАЮ  
Главный конструктор  
ООО «ПАНТЕС групп»  
кандидат технических наук

И. Г. Коршунов  
« 15 » Июль 2018

## АКТ

### о внедрении результатов диссертационной работы **ЧАБАНЕНКО Александра Валерьевича, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 - Стандартизация и управление качеством продукции**

Комиссия в составе:

Председатель - Коршунов Игорь Геннадьевич, к.т.н., главный конструктор;

Члены комиссии:

1. Брусенцов Кирилл Аркадьевич, к.т.н., начальник производственного отдела;

2. Пестова Анна Александровна, инженер по качеству, назначенная приказом Генерального директора от 27 мая 2016 года №94, настоящим актом подтверждает, что в рамках системы менеджмента качества ООО «ПАНТЕС групп» внедрена документированная процедура ДП-1-14 «Контроль процесса печати с использованием аддитивной установки», реализующая следующие результаты диссертационной работы Чабаненко А.В. «Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям»:

1. Модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для анализа влияния внешних и внутренних воздействующих факторов в процессе моделирования эксплуатации радиоэлектронного устройства;

2. Дополненная номенклатура показателей качества корпусных элементов РЭА, регламентированная разработанным стандартом организации, учитывающая современные требования национальных, международных стандартов и требования технических регламентов к полимерам.



**КОНТРАКТНОЕ  
ПРОИЗВОДСТВО И  
РАЗРАБОТКА  
ЭЛЕКТРОНИКИ**



Тел./Ф.: +7 (812) 740-7199, 740-7198  
Тел./Ф.: +7 (495) 229-31-43  
E-mail: pantes@pantes.ru  
www.pantes.ru; www.pantes-group.ru  
СПб, Ириновский пр., 2, офис 309

ИНН 5406562761 КПП 780601001

Юридический адрес: 195248, Санкт-Петербург г, Ириновский пр-кт, дом № 2 литер А

Почтовый адрес для финансовых документов: 195248, Санкт-Петербург, а/я 57

Внедрение указанного стандарта ДП-1-14 позволило:

- сократить количество несоответствий, допущенных на этапе разработки цифровых прототипов и расхождений цифрового прототипа с физическим изделием, на 10-12%;
- сократить затраты временных ресурсов, связанных с разработкой, тестированием и вводом в эксплуатацию корпусных элементов на основе полимеров, в среднем на 15-20%;
- сократить среднее время разработки и отладки корпусов для радиоэлектронной аппаратуры на 10-12%.
- сократить среднее время разработки и производства корпуса РЭА на 15-20%.

Члены комиссии:

Председатель - Коршунов Игорь Геннадьевич

Члены комиссии:

- Брусенцов Кирилл Аркадьевич

- Пестова Анна Александровна



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
 «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»  
 (ГУАП)

Большая Морская ул., д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Тел. (812) 710-6510, факс (812) 494-7057,  
 E-mail: common@aanet.ru; http://www.guap.ru; ОКПО 02068462; ОГРН 1027810232680; ИНН/КПП 7812003110/783801001

№ \_\_\_\_\_  
 На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



УТВЕРЖДАЮ  
 И.о. ректора ГУАП  
 В.А. Матьяш

МП  
 «16» 01 2019 г.

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Чабаненко Александра Валерьевича

«Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям»

Комиссия в составе:

Председатель -- заместитель директора института ФПТИ А.Ю. Гулевитский

Члены комиссии:

заместитель заведующего кафедрой инноватики и интегрированных систем качества  
 М.С. Смирнова

доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества В.М. Милова

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

- параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, отличающаяся наличием моделей прототипированных элементов компонентной базы РЭА, учитываемых при структурном проектировании радиоэлектронного устройства;
- дополненная номенклатура показателей качества, учитывающая нормированные температурные режимы, технологические допуски, и обновленные требования, содержащиеся в национальных стандартах и технических регламентах;
- методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики

выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов;  
использованы в деятельности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Материалы диссертационной работы Чабаненко Александра Валерьевича были использованы в учебном процессе в дисциплинах «Инструменты управления качеством», «Компонентное обеспечение на этапах жизненного цикла продукции», «Проектно-ориентированные методы разработки продукции», читаемых на кафедре №5 Инноватики и интегрированных систем качества для студентов направлений «Управление качеством», «Инноватика», «Стандартизация и метрология» уровня бакалавриата.

Председатель комиссии  
заместитель директора института ФПТИ  
канд. тех. наук, доцент



А.Ю. Гулевитский

Члены комиссии:  
зам. заведующего кафедрой  
инноватики и интегрированных систем качества  
канд. техн. наук, доцент



М.С. Смирнова

доцент кафедры  
инноватики и интегрированных систем качества  
канд. техн. наук, доцент



В.М. Милова



Акционерное общество  
«Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

197375, Россия, Санкт-Петербург  
ул. Новосельковская, д. 37, лит. А  
тел.: +7 (812) 777-50-51  
факс: +7 (812) 600-04-49  
e-mail: radar@radar-mms.com  
www.radar-mms.com

**УТВЕРЖДАЮ**  
ВрИО Исполнительного  
директора  
АО «НПП «Радар ммс»

С.М. Нефедов  
«13» \_\_\_\_\_ 2019 г.

### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы ЧАБАНЕНКО Александра Валерьевича «Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.23 - Стандартизация и управление качеством продукции

Комиссия в составе:

Председатель: начальник Центра 092, канд.техн.наук, доцент Карпова И.Р.

Члены комиссии:

- ведущий научный сотрудник, докт.техн.наук,  
Заслуженный деятель науки РФ Бундин Г.Г.;
- старший научный сотрудник, д.т.н., профессор Титков Б.В.
- руководитель группы Полтарак А.А.

составила настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Чабаненко Александра Валерьевича «Модели и методики обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям»:

1. модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для анализа влияния внешних и внутренних



воздействующих факторов в процессе моделирования эксплуатации радиоэлектронного устройства;

2. параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, включающую прототипирование проектной компонентной базы РЭА;

3. методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов

использованы в АО «НПП «Радар ммс» при создании цифровых прототипов изделий, выполняемых на основе аддитивных технологий 3D печати объёмных объектов.

Использование указанных результатов позволило:

- повысить выход годных корпусных элементов на 10-12 %;
- снизить количество ошибок, допущенных на этапе разработки корпусов РЭА, на 10-12%, тем самым сократить расход полимеров при печати изделия на 20-25 %;
- сократить время производства компонентной базы и сложно-профильных корпусных элементов РЭА при применении аддитивной технологии на 40-50 %.

Председатель комиссии:

И.Р. Карпова

Члены комиссии:

Г.Г. Бундин

Б.В. Титков

А.А. Полтарак