

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С.П. Королева»
(Самарский университет)

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра технологий производства двигателей

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

**«Повышение эффективности оперативного планирования с
использованием имитационной модели»**

по направлению подготовки 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов»
(уровень магистратуры)
направленность (профиль) «Управление и бизнес в высокотехнологичном
инновационном машиностроительном производстве»

Обучающийся _____ П.С. Петрова

Руководитель ВКР,

к.т.н., доцент _____ В.Г. Смелов

Консультант _____ В.В. Кокарева

Нормоконтролер _____ В.В. Кокарева

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
Кафедра технологий производства двигателей

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____/А.И. Хаймович/
(подпись) И.О.Фамилия
« ____ » _____ 20__ г.

Задание на выпускную квалификационную работу (ВКР)

Обучающемуся Петровой Полине Сергеевне
группы 2226-240405D

1.Тема ВКР: Повышение эффективности оперативного планирования с использованием имитационной модели

утверждена приказом по университету от «20» января 2020 г. № 24-Т

2.Перечень вопросов, подлежащих разработке в ВКР: повышение эффективности управления производственными процессами за счет оптимизации загрузки оборудования, уменьшения незавершенного производства, создания и анализа имитационной модели производства. Провести обзор тематической литературы. Провести обзор и анализ существующей системы производства. Предложить и математически обосновать возможность расчета вариантов формирования производства посредством Байесовского подхода. Предложить и сформировать алгоритм распределения принятых заказов по точкам производства на основании величин вероятностей, полученных на основании Байесовского подхода. Провести анализ существующих методов и средств имитационного моделирования производственных систем технологического процесса. Разработать и апробировать имитационную модель в среде AnyLogic.

3.Консультанты по разделам ВКР

раздел ВКР: описание математической задачи

разрабатываемые вопросы: разработка алгоритма распределения заказов, создание математической модели производства, разработка системы оценивания параметров вероятности, подсчет вероятностей успешного изготовления деталей заказа на определенном оборудовании

Ст. преподаватель _____ /В.В. Кокарева/
должность, степень подпись И.О.Фамилия

4.Дата выдачи задания: « ____ » _____ 20__ г.

Руководитель ВКР _____ /В.Г. Смелов/
должность, степень И.О.Фамилия

Задание принял к исполнению / _____ /П.С. Петрова

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация)

Пояснительная записка: 100 страниц, 11 таблиц, 31 рисунок, 63 источника.

АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ЗАГРУЗКА ОБОРУДОВАНИЯ, АЛГОРИТМ, ANYLOGIC, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СЕТИ БАЙЕСА, ТЕОРЕМА БАЙЕСА.

Объект исследования.

Бизнес система предприятия по производству деталей (в экономическом кластере лабораторий аддитивных технологий).

Предмет исследования.

Предметом исследования являются организационные процессы при аддитивном производстве, в частности планирование и загрузка оборудования исходя из параметров вероятности успешного изготовления партий деталей на различном оборудовании.

Цель работы: повышение эффективности управления производственными процессами на предприятиях мелкосерийного производства на примере кооперации лабораторий аддитивных технологий за счет оптимизации загрузки оборудования и распределения заказов.

В ходе работы был проведен анализ работы лаборатории аддитивного производства, определена логистика процесса, уточнена номенклатура и возможности оборудования, исходя из налаженных производственных контактов была предложена модель кооперации для повышения качества и скорости производства продукции, а также для расширения клиентской базы и территориального охвата. Построена функциональная модель, изучены методы построения математических моделей, описывающих организацию производства, на основе сетей Байеса получены значения вероятности успешного выполнения заказов, на основании которых разработан алгоритм

распределения поступающих заказов. В среде AnyLogic 8.4.0 реализована имитационная модель загрузки аддитивного производства, проведен анализ полученных результатов, даны рекомендации по повышению эффективности управления производственными процессами центров аддитивных технологий.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. Аналитический обзор по теме исследования	9
1.1 Характеристика объекта исследования	9
1.2 Идея кооперации аддитивных лабораторий	13
1.3 Актуальность, возможности, цели и методы моделирования производственных процессов и систем	19
1.4 Особенности аддитивного производства	22
1.5 Описание структурной модели планирования аддитивного производства	26
1.6 Теорема Байеса	30
1.6.1 Актуальность теоремы Байеса для планирования аддитивного производства	31
2. Описание математической задачи	33
2.1 Алгоритм выбора.....	36
2.2 Коэффициент срочности	39
2.3 Получение вероятностей успешного изготовления заказа	42
2.3.1 Расчет условных вероятностей успешного изготовления заказов....	46
2.3.2 Расчет вероятностей успешного изготовления заказов по теореме Байеса.....	54
2.4 Описание работы алгоритма распределения	58
3 Обзор методов имитационного моделирования	64
3.1 Обзор существующих инструментов имитационного моделирования ..	66
3.1.1 Пакет имитационного моделирования Rockwell Arena.....	68
3.1.2 Пакет имитационного моделирования AnyLogic	69

3.1.3 Пакет Tecnomatix Plant Simulation.....	70
3.2 Создание модели	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ В	98

ВВЕДЕНИЕ

Целью любого производства является достижение наибольшей прибыли, социальных, экологических или других улучшений. Зачастую этого можно добиться, нанимая рабочих высокой квалификации и используя оборудование с большей эффективностью и точностью. Сегодня многофункциональные обрабатывающие центры с числовым программным управлением стали наиболее востребованным оборудованием, сократив потребность в количестве оборудования и рабочих единиц, переведя количество в плоскость качества. Однако, для того чтобы сегодня иметь конкурентное преимущество, производство должно владеть не только современными технологиями изготовления деталей, высокотехнологичным оборудованием и квалифицированными кадрами, но и постоянно осуществлять анализ себестоимости продукции, отдельных затрат на производство и реализацию товара, принимать меры по снижению затрат на предприятии. Для этого необходима система мероприятий, направленных на оптимальное сочетание производственных процессов между собой, повышение эффективности производства, комплексный анализ затрат и прочие методы организации производства.

Особенно это актуально для высокотехнологичных предприятий с индивидуальной и мелкосерийной номенклатурой выпуска, производств специализированной техники и военно-промышленного комплекса. Перед производящей промышленностью Российской Федерации стоит задача преодолеть разрыв с мировыми конкурентами по качеству, надежности и технологическому уровню производства. Решение этой задачи планируется за счет реорганизации производств, освоения выпуска новой продукции и внедрения новых технологий [1, 2, 3, 4].

Целью исследования является повышение эффективности управления производственными процессами на предприятиях мелкосерийного производства на примере лабораторий аддитивных

технологий за счет оптимизации загрузки оборудования, уменьшения незавершенного производства и средств имитационного моделирования.

Для выполнения цели исследования поставлены **следующие задачи:**

1. Провести обзор тематической литературы.
2. Провести обзор и анализ существующей системы производства.
3. Предложить и математически описать метод формирования производственных заказов посредством Байесовских сетей.
4. Предложить и сформировать алгоритм распределения принятых заказов по точкам производства на основании величин вероятностей, полученных на основании Байесовского подхода.
5. Провести анализ существующих методов и средств имитационного моделирования производственных систем технологического процесса.
6. Разработать и апробировать имитационную модель в среде AnyLogic.

1. Аналитический обзор по теме исследования

1.1 Характеристика объекта исследования

Аддитивное производство используется во многих сферах для производства изделий для военных, промышленных, медицинских и потребительских целей. Перечень производимых наименований обширен и включает в себя детали и узлы самолетов, медицинские имплантаты, детали двигателей и многие другие сложные в производстве объекты. Аддитивное производство упрощает и ускоряет процесс разработки продукции. Данный вид производства позволяет сократить время производства, сократить затраты на производство и материал, повысить качество изготавливаемой продукции. Разрабатываются методы, процессы и системы для изготовления оснастки. Первые попытки были направлены на быстрое создание оснастки, например, форм для литья под давлением, но они не были успешными [5]. В последнее время 3D-печать стали использовать для повышения качества оснастки для литья под давлением. Одним из достоинств аддитивного производства является возможность применения в некоторых областях для получения результатов, недостижимых при использовании обычных станков. В других производствах аддитивные технологии используются для создания таких инструментов для изготовления и сборки, как зажимные устройства, крепления, шаблоны и направляющие для сверления и резки. 3D-печать оказывает большое влияние на производство многих продуктов. Предприятия — крупные и малые — успешно применяют технологии для производства готовых изделий. Расширяется география и сфера промышленного применения аддитивного производства. Возникают новые методы, прикладные задачи разрабатываются новые бизнес-модели, технологии и материалы, отрасль продолжает развиваться. Аддитивные технологии уже оказали огромное влияние на развитие проектирования и производства и с каждым годом роль аддитивных технологий будет становиться все значимей.

Для эффективной работы производственного процесса необходима грамотная постановка задач, оценка рисков, понимание поэтапного процесса работы каждого из аспектов производственной цепи, для этого необходим процесс планирования. Оперативное планирование подразумевает под собой планирование загрузки оборудования, выявление узких мест, управление заказами, затем производится оптимизация расписания заказов на основе данных полученных по итогам действия алгоритма распределения. Но необходимо понимать, что алгоритм и данные полученные на основе работы алгоритма – это инструмент для диспетчера и исходя из результатов алгоритма диспетчер принимает решение о распределении заказов. В случае если по результатам работы алгоритма не выполняется какое-либо требование, диспетчер вводит дополнительный параметр при расчете и работе алгоритма. Основу деятельности каждого предприятия составляет производственный процесс, он представляет собой совокупность действий, в результате которых исходные материалы превращаются в готовую продукцию. И в зависимости от того насколько слажено, четко, качественно и быстро происходит этот процесс и все этапы, которые он в себя включает будет зависеть успех всего предприятия. В таблицах 1.1 и 1.2 представлены номенклатура производственных моделей и оборудования, использующихся для производства продукции [6, 7, 8].

Таблица 1.1 – Номенклатура производственных деталей

№ п/п	Наименование ДСЕ	Материал	Количество, шт	Вес, кг
1	Сопловые секции 1 ступени турбины	металлический порошок сплава In.738	26	1
2	Импелер	металлический порошок сплава In.738	20	0,7
3	Сопловые секции 2 ступени турбины	металлический порошок сплава In.738	26	1
4	Губа	металлический порошок	26	0,4

№ п/п	Наименование ДСЕ	Материал	Количество, шт	Вес, кг
		сплава In.738		
5	Корпус	металлический порошок сплава In.738	20	2
6	Кронштейн	металлический порошок сплава In.738	30	2,5
7	Форсунка	металлический порошок сплава In.738	45	0,3
8	Картер	металлический порошок сплава In.738	10	5
9	Горелка	металлический порошок сплава In.738	100	0,2

Таблица 1.2 – Номенклатура оборудования

№ п/п	Наименование	Назначение
1	Установка селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 280HL	Промышленный 3D принтер для аддитивного производства с использованием технологии печати SLM (метода лазерной плавки). Устройство имеет повышенную емкость и позволяет изготавливать объекты 280 x 280 x 350 мм, при минимальной толщине слоя в 20 мкм, скорость печати достигает 55 см ³ /час, минимальная толщина изготавливаемого элемента – 0,15 мм.
2	Установка селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 125	Промышленный 3D принтер для аддитивного производства с использованием технологии печати SLM (метода лазерной плавки), скорость построения достигает 25 см ³ /час. Габариты рабочей области – 125x125x125 мм, толщина слоя – 20 мкм.

№ п/п	Наименование	Назначение
3	3D принтер EDEN 350	Принцип основан на технологии PolyJet — послойного нанесения светочувствительного материала и его последующего отверждения с помощью освещения ультрафиолетовой лампой, габариты рабочей области 340 x 340 x 200 мм, толщина слоя 16 мкм, скорость печати 12 мм ³ /час
4	Лазерная установка HTS-300	Основные технические характеристики: Макс. энергия импульса излучения: 80Дж; Макс. импульсная мощность излучения: 10 кВт; Частота повторения импульсов излучения: 0,5 ...100 Гц; Средняя мощность излучения (макс.): 300 Вт; Диаметр сфокусированного луча: 0,3..2,0 мм; Микроскоп: увеличение: 16х; диаметр поля зрения: 10 мм;
5	Система для вакуумного литья полимеров МТТ 4/05	Основные технические характеристики: Максимальные размеры формы: 5,0 кг; Длина/Ширина/Высота: 900x750x750мм; Габариты: 1400 кг; Масса: 1510x900x1930 мм; Энергопотребление: 3ф, 380 в, 3,5 кВт
6	Система для вакуумного литья нержавеющей и конструкционных сталей SGA 3500	Основные технические характеристики: Объем тигля: 400V3АС, 50/60 Гц; Электропитание, мощность: 32 А; Плавкий предохранитель: 3500 смЗ; Макс. высота опоки: 500 мм; Макс. температура заливки металла: 1750°С; Давление поддавливания: 6 бар; Газ для поддавливания металла после заливки: Аргон; Производительность системы водяного охлаждения: 10 л/мин; Вес: прим. 2200 кг.

№ п/п	Наименование	Назначение
4	Concept Laser M2 cusing Multilaser	Промышленный 3D принтер, использующий аддитивную технологию LaserCUSING® (DMLM) лазерного селективного плавления реактивных и не реактивных металлических порошков двумя асинхронными лазерами. Габариты рабочей области – 250x250x350 мм, толщина слоя – 20 мкм, скорость печати – 20 см ³ /ч.
5	Concept Laser X LINE 2000R	Система 3D печати Concept Laser X LINE 2000R отличается высокой производительностью и имеет самый большой объем области построения среди аналогов других производителей. Габариты рабочей области – 800x400x500 мм, минимальная толщина слоя – 30 мкм, скорость печати – достигает 120 см ³ /ч.
6	3D принтер EOS M 400	Предназначен для прямого промышленного изготовления высококачественных металлических изделий большого размера, точность печати 100 мкм, скорость печати – достигает 100 см ³ /ч., габариты рабочей области 400 x 400 x 400 мм.
7	3D принтер EOS M 100	Принтер EOS M 100 оптимизирован для сокращения времени последующей обработки и очистки полученных деталей. Размер рабочей камеры D100 x 95 мм, скорость сканирования: до 7.0 м/с, толщина слоя от 40 мкм.
8	3D Systems Sinterstation HiQ+HS	Технология печати: Селективное лазерное спекание (SLS) Область построения, мм: 381x330x457, мощность лазера 100 Вт

1.2 Идея кооперации аддитивных лабораторий

В данной работе предлагается идея создания производственной структуры,

представленная несколькими разными, но специализирующимися на одной проблематике, производственными участками. Данные участки имеют различный набор оборудования, сотрудников, компетенций и средств производства, относятся к разным предприятиям, находящимся в различных городах. В дальнейшем это может послужить расширению клиентской базы для каждого из участков путем выбора производственного оборудования, наиболее подходящего им по требованиям (спецификации) заказов, не теряя потенциальных клиентов благодаря увеличению вариантов распределения заказанных деталей на различные участки, наиболее значимым фактором где является возможность увеличения качества продукции. Это возможно за счет разработки метода и алгоритма распределения заказов на производственные участки с наибольшей вероятностью успешного изготовления каждого из них [9]. В работе приведены параметры производственных участков, на базе которых разработан алгоритм распределения заказов.

Лаборатория аддитивных технологий Самарского университета была открыта в 2013 году, представлена установкой селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 280HL и 3D принтером EDEN 350, Лазерная установка HTS-300, Система для вакуумного литья полимеров МТТ 4/05, Система для вакуумного литья нержавеющей и конструкционных сталей SGA 3500. Состав сотрудников лаборатории позволяет обеспечить одновременную работу по разработке программы работы аддитивного оборудования, непосредственную печать заказа, обработку и проверку, напечатанных единиц и выполнение процедур по оформлению отчетной документации. Со дня открытия лаборатории сотрудники ежегодно проходят переобучение и повышают квалификацию, имеют опыт работы на аддитивном оборудовании и в программных компонентах, необходимых для подготовки работы на аддитивном оборудовании.

Научно-технологический комплекс «Машиностроительные технологии» (НТК «МашТех») на базе Санкт-Петербургского политехнического университета был открыт в 2013 году,

представлен 3D принтером EDEN 350, 3D Systems Sinterstation HiQ+HS, 3D принтер EOS M 400 и 3D принтер EOS M 100. Состав сотрудников лаборатории позволяет обеспечить одновременную работу на нескольких видах оборудования, параллельная работа оборудования взаимно не отражается на производстве остальных объектов, имеется возможность разрабатывать программы для дальнейшей работы аддитивного оборудования, обеспечивать обработку и проверку, напечатанных единиц и выполнение процедур по оформлению отчетной документации. Со дня открытия лаборатории сотрудники ежегодно проходят переобучение и повышают квалификацию.

Пермский завод «Авиадвигатель» открыл отдел, специализирующийся на выполнении заказов методом аддитивного производства в 2017 году. Для этого используется Concept Laser XLINE 2000R и Concept LaserM2 cusing Multilaser. Состав сотрудников лаборатории позволяет обеспечить одновременную работу на нескольких видах оборудования, параллельная работа оборудования взаимно не отражается на производстве остальных объектов, имеется возможность разрабатывать программы для дальнейшей работы аддитивного оборудования, обеспечивать обработку и проверку, напечатанных единиц и выполнение процедур по оформлению отчетной документации. Со дня открытия лаборатории сотрудники ежегодно проходят переобучение и повышают квалификацию.

Производственная компания Metal-Sprint открыла российский филиал в 2018 году, для своего производства использует установку селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 125 и установку селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 280HL. Состав сотрудников лаборатории позволяет обеспечить одновременную работу на нескольких видах оборудования, параллельная работа оборудования взаимно не отражается на производстве остальных объектов, имеется возможность разрабатывать программы для дальнейшей работы аддитивного оборудования, обеспечивать обработку и проверку,

напечатанных единиц и выполнение процедур по оформлению отчетной документации. Со дня открытия лаборатории сотрудники ежегодно проходят переобучение и повышают квалификацию.

На рисунке 1.1 (а, б, в, г) представлены диаграммы, которые отражают распределение завершенных этапов производства на протяжении полугода в рассматриваемых точках производства. На гистограммах видно, что нагрузка оборудования распределена неравномерно и чередуется с днями, в которых отсутствуют производственные процессы. При расчете средних значений производительности получены результаты 0.6, 0.8, 0.75, 0.65 производственных единиц для каждого наименования.

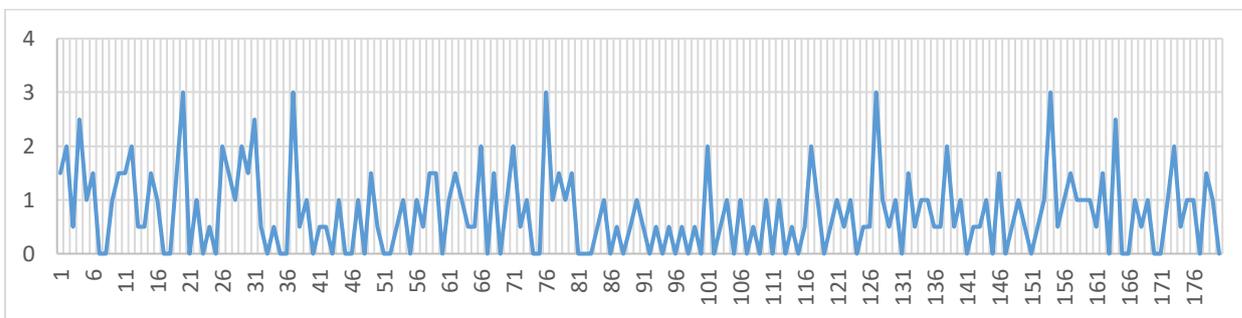


Рисунок 1.1 а – Завершенное производство в лаборатории аддитивного производства Самарского университета

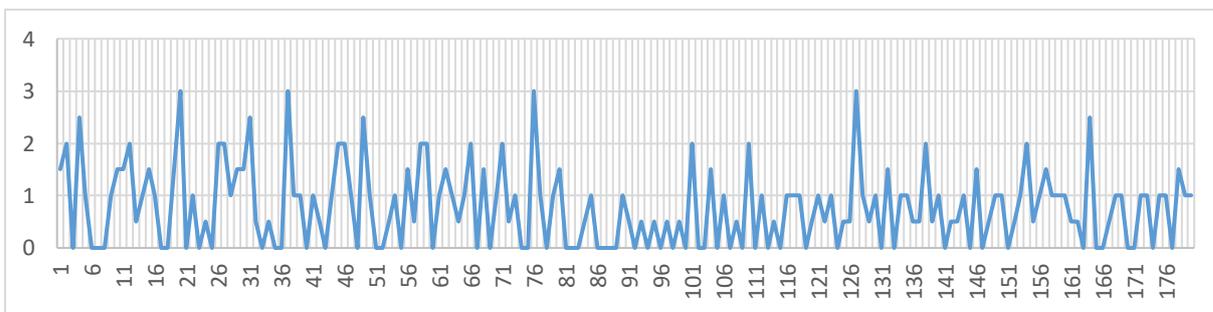


Рисунок 1.1 б – Завершенное производство Научно-технологический комплекс «Машиностроительные технологии» (НТК «МашТех»)

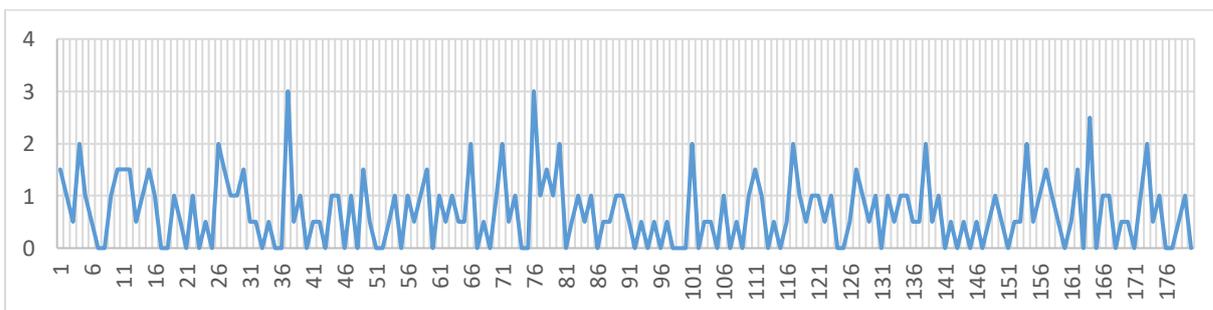


Рисунок 1.1 в – Завершенное производство отдела аддитивного производства пермского завода «Авиадвигатель»

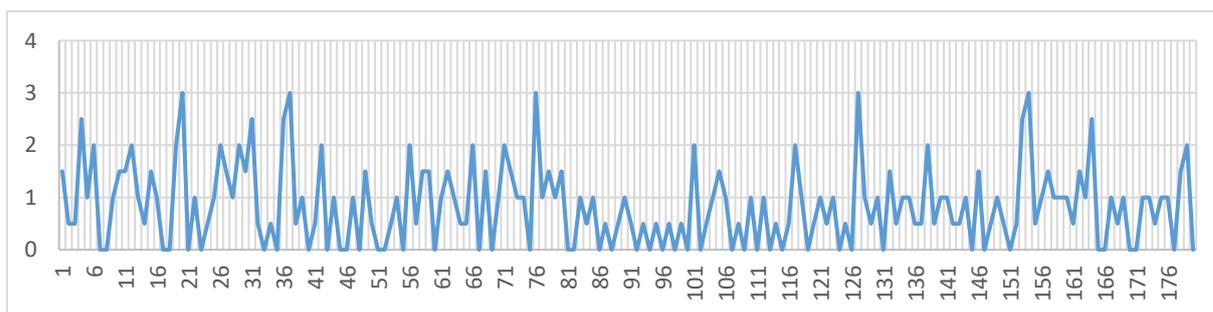


Рисунок 1.1 г – Завершенное производство компании Metal-Sprint

Одним из важных преимуществ технологии 3D-печати металлами – возможность создать изделие из практически любого материала. Помимо стандартных металлов существует широкая номенклатура специальных сплавов – уникальных высокотехнологичных материалов, которые производятся под определенные задачи заказчика. В перечисленных выше производствах используются следующие металлические порошки при изготовлении деталей [10]: AlSi10Mg, IN625, IN718, IN939, TiAl6V4(Gd23), CoCr28M06CuSNn0. Инструментальные нержавеющие сплавы, используемые на 3D принтерах: 17-4PH, (1.4542), 316L (1.4404), 15-5PH (1.4545), Invar36 (Ni35-37%), H13 (1.2344). Все центры используют порошки от одного производителя для соблюдения качественных стандартов и большей гибкости производства.

В данной работе рассматриваются заказы деталей из порошка сплава Inconel 738, состав которого приведен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Химический состав порошка сплава Inconel 738

Элемент	Содержание, масс %	Элемент	Содержание, масс %
Ni	основа	Ti	3,06
Cr	15,60	Fe	0,07
Co	8,57	Nb	0,82
W	2,15	Ta	1,64
Mo	1,92	Zr	0,38
Al	4,06	Mn	0,05
Si	0,91		

По результатам анализа аддитивного производства (лаборатории аддитивных технологий) выделены следующие факторы, влияющие на эффективность процесса:

- 1) долгий период ожидания перед выполнением операции из-за последовательной загрузки на обработку;
- 2) неэффективное использование доступного оборудования;
- 3) сжатые сроки выполнения заказов;
- 4) плавающий график работы;
- 5) несовершенная организация системы обеспечения контрольно-измерительным инструментом.
- 6) организация обеспечения запасов расходных материалов;
- 7) квалификация сотрудников.

Анализ причин и источников проблем процесса изготовления деталей представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Определение источников возникновения проблем

Проблема	Причина	Источник
1. Низкая эффективность процесса производства	- Отсутствие гибкого плана производимой продукции - Отсутствие технологических возможностей	1. Узкая специализация лаборатории (материал, габариты); 2. Не определён размер оптимальной партии и нет опыта дробления партии; 3. Человеческий фактор (квалификация); 4. Неритмичность поставок комплектующих; 5. Не налажена кооперация с партнерами по производству
2. Низкая пропускная способность	Долгие и трудоемкие операции;	1. Технологические процесс и требования к производству; 2. Распределение иных приоритетов при работе алгоритма распределения.
3. Непостоянное качество продукции	Низкий приоритет учета вероятностей успешного производства	Не учитываются все необходимые технические параметры производства

Таким образом, основными факторами, влияющими на эффективность производственного процесса являются: сложность изделия; высокая загрузка оборудования; несовершенное планирование запуска; сменность персонала имеющего разную квалификацию и навыки; отсутствие технического оснащения для испытаний на динамику в месте изготовления и испытания, отсюда снижение оперативности производственного процесса в силу проведения испытаний на динамику в механосборочном цехе.

1.3 Актуальность, возможности, цели и методы моделирования производственных процессов и систем

Работа предприятия включает в себя множество сложных связей между различными элементами бизнес-подсистем с большим количеством переменных, условий и ограничений. Оценка потенциальной прибыли или убытка от реализации проекта – является одной из основных задач планирования. И если ранее принятие решения могло основываться лишь на прошлом опыте и интуиции руководителя, то в настоящий момент одним из наиболее востребованных является метод имитационного моделирования. Под имитационным моделированием понимают создание модели, которая позволяет отвлеченно наблюдать за рабочим процессом, исследовать производственно-хозяйственные ситуации предприятия путём проведения виртуальных экспериментов для принятия наиболее выгодного решения по организации дальнейшего производства [11, 12, 13, 14]. Имитационная модель позволит:

- определить возможность выполнения производственной программы на заданном оборудовании в заданных помещениях;
- определить возможность выявления закономерностей, динамических тенденций развития заданной модели;
- определить возможность функционирования сложной системы в условиях неполной и неточной информации;

- выявить узкие места и предложить решения по их устранению;
- определить период времени, необходимый для выполнения производственной программы на заданных (имеющихся) мощностях;
- определить оптимальную схему расстановки оборудования, подтвердить необходимость использования предполагаемого оборудования в плане возможности выполнения программы;
- определить или оптимизировать размер партий запуска производства;
- выявить закономерности, динамические тенденции развития и функционирования сложной системы в условиях неполной и неточной информации;
- составить график поставки комплектующих (материала);
- оптимизировать материальные потоки и снизить величину запасов, определить оптимальные размеры буферных запасов;

Метод имитационного моделирования при решении задач планирования применяется для того чтобы выявить узкие и проблемные места производства, проанализировать материальные запасы и составить график своевременного пополнения, спрогнозировать время выполнения поставленной задачи и избежать возможных остановок производственного процесса, составить актуальные графики производства, исходя из поставленных задач и времени их выполнения. При помощи имитационной модели появляется возможность проводить эксперименты с процессами предприятия при ограниченности его ресурсов, что дает возможность избежать возможных трат финансовых ресурсов и времени в случае неудачного эксперимента [15]. При применении имитационных моделей при планировании производства появляется множество преимуществ по сравнению с выполнением экспериментов над реальной системой и использованием других методов. Среди таких преимуществ можно особо выделить стоимость, время, повторяемость, точность, наглядность и универсальность [16].

В работе Бабиной О.И. [17] систематизированы и обобщены методы и

программные средства с помощью которых имитационные модели могут быть реализованы (таблица 1.5.), представлен перечень основных задач планирования.

Таблица 1.5 - Применение метода имитационного моделирования для решения задач планирования

Направление планирования	Задача планирования	Метод моделирования	Инструментарий (программный пакет)
Оперативное планирование	<ul style="list-style-type: none"> – Прогноз возникновения «узких мест» производства в случае увеличения объёмов выпуска продукции – Планирование производственной программы – Разработка сменно-суточного задания для персонала 	В основном дискретно-событийный подход	GPSS World, Anylogic
Краткосрочное планирование	<ul style="list-style-type: none"> – Планирование запасов на предприятии – Формирование оптимальных технологических маршрутов движения техники на производстве – Построение графика производства на несколько дней 	В основном дискретно-событийный подход	GPSS World, Anylogic
Среднесрочное планирование	<ul style="list-style-type: none"> – Оптимизация производственных процессов – Оценка текущего состояния предприятия и его эффективности 	Дискретно-событийный подход, Системная динамика по Форрестору	GPSS World, Anylogic, iThink
Долгосрочное планирование	<ul style="list-style-type: none"> – Прогнозирование различных вариантов развития предприятия на больших временных интервалах – Создание нового производства– Модернизация производственного процесса 	Дискретно-событийный подход, Системная динамика по Форрестору	GPSS World, Anylogic, iThink

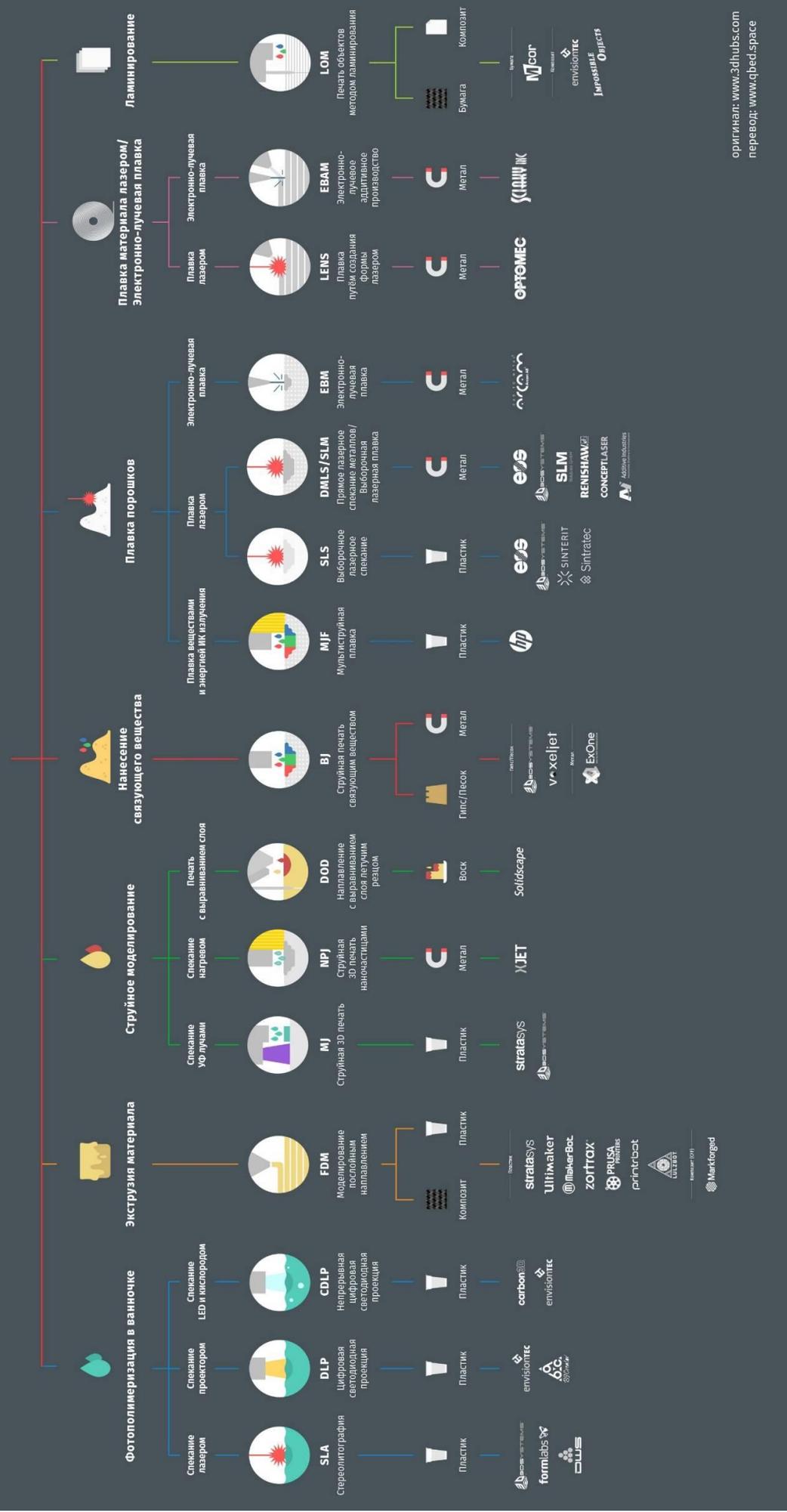
1.4 Особенности аддитивного производства

Аддитивное производство (Additive Manufacturing) – это создание изделий, основанное на поэтапном добавлении материала на основу в виде плоской платформы или осевой заготовки. Термин «аддитивность» (от лат. *additivus* – прибавляемый) и объясняет суть данного метода. Этот способ изготовления также называют «выращиванием» это объясняется видом изготовления изделий данным методом. Применение аддитивных технологии стало революцией в области производства материальных изделий. Процесс изготовления заключается в получении изделия послойным наращиванием, этот процесс осуществляет 3D-принтер, перед процессом «печати» создается информационная моделью этого изделия при помощи специализированного программного обеспечения [18]. Традиционные технологии основывали свою работу по принципу «вычитания», то есть на процессах, основанных на последовательном съеме стружки, это разнофункциональных операции, например, протяжная, сверлильная, токарная, фрезерная, тем самым из черновой заготовки получая необходимую деталь. При использовании аддитивных технологий отпадает необходимость применения различного оборудования и изменения мест обработки так как изделие полностью изготавливается на одном рабочем месте, значительно снижается использование материала (например, в авиапромышленности, при работе традиционными методами, до 90 % материалов уходит в отходы), это позитивно влияет и на вес готового изделия, что играет большую роль для авиапромышленности, и так как нет необходимости в использовании множества единиц различного оборудования снижается подготовительно-заключительное время на переналадку оборудования и время конструкторско-технологической подготовки нового изделия, сокращается потребляемая энергия, появляется возможность изготавливать изделия с повышенной конструктивной сложностью [19,20].

Аддитивные технологии заменяют и технологии обработки давлением, например, литье под давлением изделий из пластмассы, штамповку металлических изделий, не требуя при этом специальной оснастки – литьевых пресс-форм, штампов. Одним из важнейших достоинств аддитивных технологий является то, что компьютерные модели деталей можно мгновенно передавать по сети на любое производство, что в значительной мере повышает скорость производственного процесса и увеличивает мобильность при решении непредвиденных ситуаций. Существуют различные методы аддитивного производства, которые отличаются друг от друга разрешением создаваемых «распечатков», требованиям к их постобработке, используемыми материалами, стоимостью печати и прочими тонкостями [21].

Способы 3D печати со схожими технологиями сгруппированы, распределены в 6 категорий и представлены на рисунке 1.2.

ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА



оригинал: www.3dhubs.com
перевод: www.qbed.space

Рисунок 1.2 – Распределение способов 3D печати

1.4.1 Выборочная лазерная плавка

Селективное лазерное сплавление (SLM) - метод аддитивного производства предназначенный для 3D-печати металлическим порошком. С помощью SLM создают как точные металлические детали для работы в составе узлов и агрегатов, так и неразборные конструкции, меняющие геометрию в процессе эксплуатации. Суть метода — в плавлении лазером послойно наносимого металлического порошка. Данный процесс успешно заменяет традиционные методы производства, так как физико-механические свойства изделий, построенных по технологии SLM, зачастую превосходят свойства изделий, изготовленных по традиционным технологиям. Первым подготовительным этапом является разделение цифровой 3D-модели изделия на слои для создания 2D-изображения каждого слоя изделия. Далее файл с изображением слоев поступает в специальное машинное ПО. На основе полученных данных запускается производственный цикл построения [22]. Рабочая камера заполняется инертным газом, для предотвращения химической реакции материала с воздухом и образования оксидов. Этапы процесса SLM такие же, как и у других аддитивных технологий на основе лазера: подается слой металлического порошка на рабочую плиту, лазер расплавляет слой порошка в соответствии с 3D-файлом, и рабочая плита опускается перед нанесением нового слоя порошка. Процесс будет повторяться до тех пор, пока не будет создана заданная деталь [23, 24]. После завершения металлическая деталь должна остыть перед извлечением. Плавление позволяет металлу сформировать прочную однородную структуру.

При селективном лазерном сплавлении используется материал поддержки (поддерживающие структуры) для того чтобы избежать деформаций в областях небольших углов и размеров детали, а также для фиксации детали к рабочей плите. После охлаждения этот материал удаляется вручную. Обычно после печати используются различные технологии финишной

обработки, такие как фрезерование, термическая обработка или чистовая обработка, для достижения функциональных характеристик детали [25].

В SLM лазер расплавляет каждый слой металлического порошка, и перепады температур могут приводить к возникновению внутренних напряжений в детали, что потенциально может сказаться на ее качестве, хоть и в меньшей степени чем, например, при литье. В этом вопросе преимущество SLM перед традиционными технологиями меньше, чем преимущество DMLS. С другой стороны, спеченные по технологии DMLS детали уступают в монолитности и запасе прочности деталям, напечатанным по методу SLM.

1.5 Описание структурной модели планирования аддитивного производства

Сокращение затрат труда и финансов при аддитивном производстве для изготовления деталей возможно благодаря планированию производства. Структурная модель планирования и подготовки аддитивного производства построена на примере планирования технологии селективного лазерного сплавления [26]. На основе контекстной диаграммы рисунок 1.3 [27-29] определяются входные и выходные параметры бизнес-процессов аддитивного производства. На основе связей между процессом планирования и производством выделены наборы параметров процесса для установления связей. Модель была разработана на основании диаграммы подготовки аддитивного производства [30]. Также были определены ресурсы процессов, данные и связи между ними.

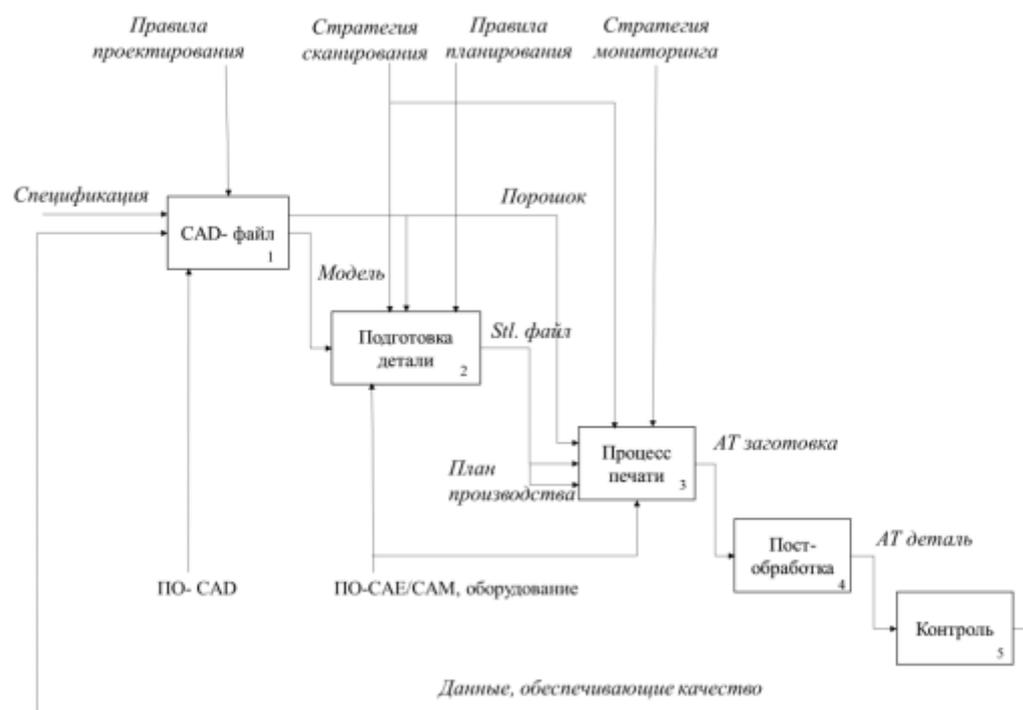


Рисунок 1.3 – Контекстная диаграмма планирования аддитивного производства

Спецификация служит входным параметром блока «CAD-файл» и определяет требования к качеству и точности изделия. Основными ограничениями являются правила проектирования. В результате формируется 3D-модель изделия с оптимизированной под возможности и ограничения оборудования и технологии аддитивного производства конструкцией. Основным блоком при планировании аддитивного производства является блок «Подготовка детали». При его реализации формируется модель сплавления частиц порошка, стратегии нанесения слоев, для установки аддитивного производства параметры, формируется stl. файл. Стратегии сканирования, планирования, свойства материала и мониторинга выступают в качестве управляющего воздействия. Стратегия сканирования задает направление движения лазерного луча, а стратегия планирования определяет правила выбора управляющих параметров технологического процесса. Стратегия мониторинга следит за обеспечением правил и методов наблюдения и управления параметрами процесса. Подблок «Создание stl. файла», результатом которого служит готовый stl. файл «Модель сплавления

порошка» и «План мониторинга» изображенные на рисунке 1.4 содержатся в блоке «Подготовка детали».



Рисунок 1.4 – Декомпозиция процесса «Подготовка детали»

Сам процесс создания stl. файла состоит из следующих действий: определение ориентации детали на платформе построения, которая по правилам проектирования и ориентации, далее определяется расположение детали на платформе построения, при этом учитываются как геометрия самой детали, так и геометрия платформы, определение поддерживающих элементов, определение расстояния между деталями на платформе построения, происходит «расслаивание» модели, это задает количество треков лазерного луча. Этот stl. файл представляет из себя входные данные для процесса «Модель сплавления порошка», на физическом уровне данный процесс представляет из себя нагрев, плавление, охлаждение, кристаллизацию. Правила планирования аддитивного производства и стратегия сканирования определяют управление процессом. Требования к порошковой композиции определяют исходя из химических и физических свойств материала. При моделировании процесса лазерного сплавления

порошка по заданной геометрии детали учитывается спецификации оборудования (защитный газ внутри камеры построения и температура).

Основными действиями процесса «Модель сплавления порошка» являются: определение параметров процесса, которые, включают параметры лазерного излучения (мощность, скорость, диаметр пятна) и сканирования (шаг, тип штриховки); определение параметров ванны расплава, к которым относятся температура расплава, микроструктура, пористость; определение требуемых параметров качества, которые включают качество лазерных треков и формируемых слоев (химические, физические, металлургические свойства); определение параметров нанесения и разравнивания слоев порошка, влияющих на сплошность нанесения и толщину слоя. Таким образом, на вход процесса «План мониторинга» поступают данные для процесса сплавления, определяющего механизм учета и контроля параметров процесса. В данном процессе определяются тип датчиков и средства 37 измерения параметров (размеров, температуры, пористости, напряжений, химического состава): термодатчики для оценки температуры, устройства спектрального анализа для определения химического состава, деформации слоя и детали, видеокамера для выявления неравномерности трека, ультразвуковые датчики для выявления трещин и пор. На выходе процесса получаем список необходимых датчиков и систем контроля параметров процесса для обеспечения требуемых параметров качества. Из анализа процесса подготовки аддитивного производства ясно, что на качество детали влияют множественные параметры технологического процесса, технической и организационной подготовки 3D-печати. Целью технологической подготовки аддитивного производства является достижение в процессе изготовления продукции оптимального соотношения между затратами и временем изготовления. Увеличение доли мелкосерийного и индивидуального производства требует создания методов и средств планирования технологической подготовки, так как именно при данном характере производства преимущества использования системы планирования и

подготовки аддитивного производства проявляются в наибольшей степени [31].

1.6 Теорема Байеса

На этапе планирования зачастую интуитивно ожидаемый результат может очень сильно отличаться от правильного «по Байесу». Современный эконометрический анализ использует байесовский подход из-за относительно малых выборок, необходимых для построения достаточно точных моделей [32].

Теорема Байеса — одна из основных теорем элементарной теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность какого-либо события при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие. Другими словами, по формуле Байеса можно более точно пересчитать вероятность, взяв в расчёт как ранее известную информацию, так и данные новых наблюдений.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)} \quad (1.1)$$

Байес не просто предложил формулу, позволяющую вычислять вероятность одного события на основании знания вероятностей других событий. Он изменил парадигму планирования событий. Из опыта можно сделать вывод, что значение конкретного наблюдения зачастую преувеличивается, тем самым преуменьшая априорное знание (то есть, знание, имевшееся у нас до наблюдения). Чтобы дать верный ответ или предложить наиболее выгодное решение необходимо обладать разносторонней информацией, понимать процент успеха в той или иной ситуации и учитывать влияние иных аспектах. Но крайне важным является понимание, что результаты каждого последующего опыта или каждые

последующие накопленные данные не отменяют полученных ранее данных или опыта. Последующие эксперименты и наблюдения могут вносить коррективы в априорное знание, могут подтверждать или колебать его, но не могут стирать это значение. Исходная доля известна в качестве априорной вероятности. Это вероятность что, например, партия деталей выполнена без погрешности, у женщины есть рак груди или что ученики выполняют домашнее задание - априорна по отношению к каким-либо новым свидетельствам, которые мы получаем. Условной вероятностью называется то, что является дополнительным условием, оказывающим влияние на конечный результат, например, количество деталей в которых при измерении будет не найдена погрешность при ее наличии или найдена при ее отсутствии, доля женщин с раком груди и положительным результатом теста, и долей женщин без рака груди, и положительным результатом, объем выполненных заданий при проверочном тест у тех, кто посещал все занятия и у тех, кто пропускал занятия. Вместе, априорная и условные вероятности и есть та информация об исследуемом событии, которую нужно знать для вычисления результата, который называется апостериорной вероятностью. Чтобы узнать какова априорная и условные вероятности, необходимо проводить опыты и исследования в изучаемой области [33]. Чтобы создать алгоритм, который даст информацию, которую можно будет использовать для дополнения точности получаемой вероятности, тест должен коррелировать с начальными данными каким-либо способом. А также тест должен выдавать разные результаты, в зависимости от того, выгодным или нет будет являться то или иное решение.

1.6.1 Актуальность теоремы Байеса для планирования аддитивного производства

Сети доверия Байеса используются в тех областях, которые характеризуются неопределенностью, то есть для тех областей в которых

имеется несколько переменных и где есть необходимость учитывать риски. Теорема позволяет получать новые, более точные выходные значения на основе информации, полученной в ходе наблюдений, опытов или производства, то есть каждый новый результат «наслаивается» на прошлые и при получении новой информации формируется более точная оценка предметной области.

Аддитивное производство сопряжено с рисками и для успешного производства необходимо учитывать многие параметры, которые влияют на конечный результат. При расчетах и планировании при помощи теоремы Байеса есть возможность совмещения многих параметров, в том числе и, если эти параметры имеют различные модели оценки величин. Алгоритм прогнозирования заданных событий при аддитивном производстве позволяет соотносить различные технические параметры оборудования и заказов, учитывать время, квалификацию и прочие необходимые условия [34].

2. Описание математической задачи

Создана кооперация аддитивных лабораторий, целью которой является получение максимальной прибыли от поступающих заказов, для этого заказы распределяются по лабораториям, которые имеют различное оборудование с отличными характеристиками, с целью сокращения времени производства и выполнения заказов надлежащего качества.

Для того чтобы создать автоматический алгоритм распределения заказов, берущий свою основу у «жадного» алгоритма и алгоритма best fit нужно заполнить таблицу (в качестве примера представлена таблица 2.1) данными заказов и возможностями оборудования из лабораторий [35]. На основании этих данных алгоритм сможет распределять заказы по лабораториям по критериям качественного и быстрого выполнения заказа.

Таблица 2.1 – Данные для расчетного алгоритма

Заказы	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4
Коэф. приоритета	K1	K2	K3	K4
Оборудование 1	P11	P21	P31	P41
Оборудование 2	P12	P22	P32	P42
Оборудование 3	P13	P23	P33	P43
Оборудование 4	P14	P24	P34	P44
Оборудование 5	P15	P25	P35	P45

В качестве основного оборудования будет использоваться установка селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 280HL, установка селективного лазерного сплавления металлического порошка SLM 125, установка Concept Laser M2 cusing Multilaser, установка Concept Laser X LINE 2000R, установка EOS M 400, установка EOS M 100.

В данной таблице P_{nk} (где n – номер детали, k – номер оборудования) – это вероятность успешного выполнения выбранной партии деталей (заказа) n на определенном оборудовании k , которая определяется по теореме Байеса

и учитывает требования к изготовлению заказа по времени, к качеству детали исходя из анализа технологических возможностей и ограничений оборудования.

Коэффициент приоритетности для каждой детали рассчитывается с учетом параметров влияния изготовления данной детали на другие, это актуально, при выполнении одной из сборочных единиц исходного заказа, возможны стимулирующие выплаты для ускорения производства со стороны заказчика, но при ситуациях, когда деталь может быть выполнена только на ограниченном перечне из представленного оборудования, нужно учесть это и предоставить приоритетную возможность изготовления с наибольшей вероятностью успешного изготовления, еще одним параметром, который будет учитываться будет это размер штрафа при невыполнении условий договора с заказчиком, поэтому также необходимо учесть срок выполнения партии деталей.

Задача планирования выполнения заказов – производства представлена следующим образом:

n – количество деталей, требуемых изготовить

$X_{ij} = (q_{ij}, t_{ij})$ – технологический маршрут - платформа построения установки аддитивного производства, в котором i – текущий вариант изготовления j детали $i = \overline{1, m}$, m – число установок аддитивного производства, $j = \overline{1, n}$,

q_{ij} – номер установки аддитивного производства, на котором изготавливается деталь, $i = \overline{1, m}$,

t_{ij} – номинальная продолжительность выполнения заказа при L_{ij}

t_{ij}^0 – момент начала выполнения заказа

t_{ij}^k – момент окончания выполнения заказа

Совокупность $\{t_{ij}^0\}$ называется календарным планом.

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если деталь } j \text{ располагается на платформе } i \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

$$Y_{mi} = \begin{cases} 1 & \text{если платформа } i \text{ печатается на машине } m \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Ограничения:

На каждом оборудовании в каждый момент времени выполняется только одна операция X_{ij}

$$\sum_{i=1}^{i_m} X_{ij} = 1; \quad \forall i \in I, \forall j \in J.$$

Каждая платформа построения располагается только на одной установке, и в том случае, если на него распределяется хотя бы одна деталь. Другими словами, если деталь j назначена на i платформу построения, то эта платформа располагается на установке m :

$$\sum_{m=1}^{m_n} Y_{mi} - Z_i = 0; \quad \forall i \in I, \forall j \in J,$$

где Z_i - фиктивная переменная $Z_i = \begin{cases} 1 & \text{если } \sum_{j \in J} X_{ij} \geq 1 \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$

Директивные сроки выполнения заказа (изготовления детали j) θ_j :

$$t_{ij}^k \leq \theta_j$$

Задача оптимального планирования заключается в нахождении такой $\{t_{ij}^0\}$, такого плана, которой максимизирует эффективность производственной системы с учетом ограничений.

В качестве критерия эффективности используют минимизацию времени выполнения заказа:

$$T = \max |T_{ij} + T_{ij\text{пер}} + T_{ij\text{пр}}| \rightarrow \min$$

2.1)

T_{ij} – время выполнения операции (заказа) на j оборудовании

$T_{ij\text{пер}}$ - время переналадок

$T_{ij\text{пр}}$ - время простоя

2.1 Алгоритм выбора

Для успешной работы данной производственной системы составлен алгоритм распределения заказов по аддитивным лабораториям. Планируется, что данный алгоритм будет использоваться при изменяющихся факторах заказываемой продукции. В процесс эксплуатации условия функционирования могут существенно или незначительно изменяться, что влечет за собой необходимость трансформировать алгоритм под необходимые условия. При формировании адаптивного алгоритма адаптируемая часть отвечает за требуемую функциональность в процессе эксплуатации. Виды алгоритмов как логико-математических средств отражают указанные компоненты человеческой деятельности и тенденции, а сами алгоритмы в зависимости от цели, начальных условий задачи, путей её решения. Следует подчеркнуть принципиальную разницу между алгоритмами вычислительного характера, преобразующими некоторые входные данные в выходные (именно их формализацией являются машины Тьюринга, Поста, РАМ, нормальные алгоритмы Маркова и рекурсивные функции), и интерактивными алгоритмами (уже у Тьюринга встречается С-машина, от англ. choice — выбор, ожидающая внешнего воздействия, в отличие от классической А-машины, где все начальные данные заданы до начала вычисления и выходные данные недоступны до окончания вычисления). Последние предназначены для взаимодействия с некоторым объектом управления и призваны обеспечить корректную выдачу управляющих воздействий в зависимости от складывающейся ситуации, отражаемой поступающими от объекта управления сигналами [36, 37]. В

некоторых случаях алгоритм управления вообще не предусматривает окончания работы (например, поддерживает бесконечный цикл ожидания событий, на которые выдается соответствующая реакция), несмотря на это, являясь полностью правильным. Итак, жадный алгоритм (greedy algorithm) — это алгоритм, который на каждом шагу делает локально наилучший выбор в надежде, что итоговое решение будет оптимальным. При использовании жадного алгоритма не задается расчет на будущее, а интересуется только лучшее решение в данный момент, однако в некоторых задачах это приведет к неоптимальному решению из-за того, что при использовании этого алгоритма не перебираются все решения, а лишь одно. Поэтому рассмотрим алгоритм для решения задач двухмерной упаковки (2-Dimensional Bin Packing), что нам подходит, так как нам как раз нужно распределить заказы по определенным объемам. В данных задачах есть два варианта входных данных: когда набор объектов известен заранее (offline-проблема) и когда данные поступают порциями (online-проблема). Примем, что перечень заказов известен нам заранее. Воспользуемся алгоритмом Best Fit Decreasing High. При использовании этого алгоритма первым выбирается самый объемный (в данном случае сложный) заказ, далее заказы выбираются не по тому же параметру. Выбирается не первый или наибольший, а лучший. Под лучшим уровнем подразумевается тот, на котором останется минимум места для последующей загрузки. Проще говоря, выбирается минимальный заказ, что способствует лучшему заполнению уровней.

Виды представления графических алгоритмов представлены на рисунке 2.1.

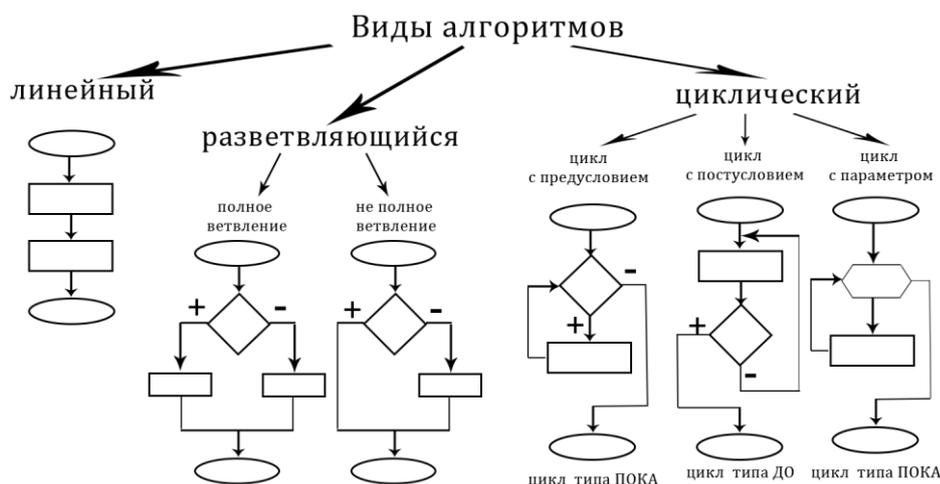


Рисунок 2.1 – Виды алгоритмов

На основании таблицы 2.1 составлена таблица, в которой представлена информация об оборудовании, коэффициент сложности партии деталей и вероятности успешного изготовления при пересечении этих параметров. Коэффициент сложности присваивается каждой детали. Среди всех заказов в первую очередь выбирается заказ с наибольшим коэффициентом сложности, потому что основным приоритетом является требуемое качество выполнения заказа, а чем больше данный коэффициент, тем выше сложность выполнения детали и, следовательно, более ограниченный выбор оборудования для изготовления партии деталей. Следующий шаг заключается в выборе оборудования из перечисленных наименований с наибольшей вероятностью успешного изготовления заказа. Затем для выбранного оборудования подбирается партия деталей уже с наименьшим коэффициентом сложности для того, чтобы ускорить процесс выполнения заказа и обеспечить возможность частичной загрузки на печать деталей из разных партий с целью ухода от линейного производства в сторону гибкого, подвижного и подстраивающегося под конкретные нужды производства. После этого алгоритм повторяется и выбирается наибольший коэффициент сложности из оставшихся. На основании этих описаний выполнен графический вид циклического алгоритма (рисунок 2.2).

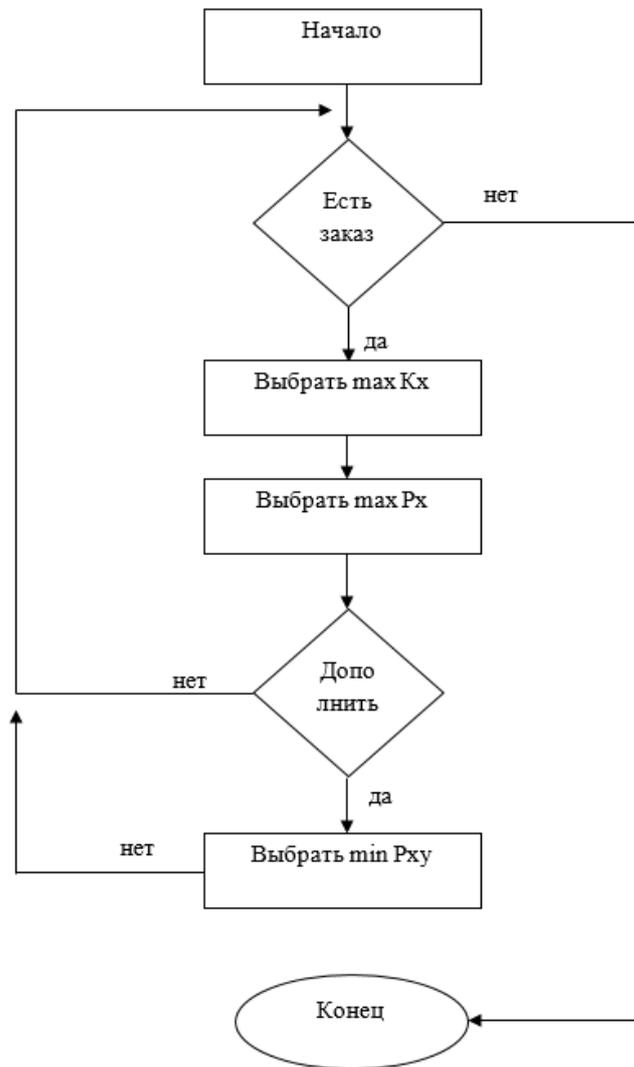


Рисунок 2.2 – Блок-схема, предложенного алгоритма

2.2 Коэффициент срочности

Одна из основных задач планирования заключается в составлении и следовании плану производства в соответствии с предъявляемыми требованиями заказчиков и выполнением технологии изготовления деталей. Для определения порядка постановки заказа на производство, для партий деталей введен коэффициент срочности (приоритета) K_C – показатель, характеризующий срочность, с которой необходимо приступить к выполнению определенного заказа. Данный коэффициент является основным определяющим параметром выбора последовательности производства при

использовании будущего алгоритма. При расчете коэффициента срочности для каждой партии деталей необходимо учитывать параметр влияния изготовления данной детали на другие, это актуально, при выполнении одной из сборочных единиц исходного заказа, возможны стимулирующие выплаты для ускорения производства со стороны заказчика, но при ситуациях, когда деталь может быть выполнена только на ограниченном перечне из представленного оборудования, нужно учесть это и предоставить приоритетную возможность изготовления с наибольшей вероятностью успешного изготовления, еще одним параметром, который будет учитываться будет это размер штрафа при невыполнении условий договора с заказчиком, поэтому также необходимо учесть срок выполнения партии деталей. Коэффициент срочности вычисляется следующим образом:

$$K_c = \frac{1}{e^{\left(\frac{N \cdot U}{F+L+S}\right)}}, \quad (2.2)$$

где

U – параметр срочности заказа, $U \in [0;1)$ и вычисляется следующим образом:

$$U = \frac{A-R}{A}, \quad (2.3)$$

где

A – обозначает время оговоренное в договоре для выполнения заказа,

R – обозначает время фактически необходимое для выполнения заказа.

Отдельно обозначим, что к исполнению не берутся заказы срок выполнения, которых, превышает срок выполнения, предусмотренный договором.

N – параметр, учитывающий ограничения перечня оборудования, $N \in (0;1]$;

$$N = \frac{D}{C}, \quad (2.4)$$

где

D – количество единиц оборудования на котором возможно изготовление конкретной детали,

C – количество единиц работающего оборудования.

Отдельно обозначим, что к исполнению не берутся заказы выполнение, которых не возможна на представленном оборудовании.

F – параметр, учитывающий размер неустойки, $F \in (0 ; 1]$;

$F = 0,1$ при $0 \leq T < 100000$;

$F = 0,2$ при $100000 < T < 500000$;

$F = 0,3$ при $500000 < T < 1000000$;

$F = 0,4$ при $1000000 < T < 5000000$;

$F = 0,5$ при $1000000 \leq T$,

где T является величиной неустойки.

L – параметр, описывающий влияние выбранной детали на изготовление других заказов, принимает значение 0.5, если данная деталь является составной частью исходного заказа, и 0 если это самостоятельная деталь из отдельного заказа;

S – параметр, учитывающий доплаты за ускоренное изготовление заказа, принимает значение 0.5, если заказчиком было отмечено желание ускоренного производства, и 0 если деталь будет выполняться в соответствии с очередью;

Коэффициент срочности рассчитывается для каждой детали и принимает следующие значения $K_c \in (0;1]$

Рассмотрим расчет коэффициента срочности для первой партии деталей

$$Kc1 = \frac{1}{e^{\left(\frac{\left(\frac{A1-R1}{A1}\right) \cdot \frac{D1}{C}}{F1+L1+S1}\right)}}$$

При подстановке значений для детали 1 получается следующее выражение

$$Kc1 = \frac{1}{e^{\left(\frac{\left(\frac{30-20}{30}\right) \cdot \frac{5}{7}}{0,2+0+0,5}\right)}} = 0,71$$

Для остальных партий деталей коэффициент рассчитан аналогичным способом, результаты расчетов представлены в таблице 2.2. Таблица 2.2 – Результаты расчетов коэффициента срочности.

	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4	Деталь 5	Деталь 6	Деталь 7	Деталь 8	Деталь 9
Kc	0,71	0,77	0,65	0,86	0,79	0,56	0,49	0,74	0,63

2.3 Получение вероятностей успешного изготовления заказа

Чтобы пояснить использование теоремы Байеса для рассматриваемого случая, рассмотрим рисунок 2.3, на нем представлена схема работы сетей Байеса для вычисления вероятности успешного изготовления деталей на конкретном оборудовании. Детали или заказы представлены Q1, Q2, Q3, параметры каждой из деталей представлены в виде $a_1b_1c_1$. Оборудование представлено как А, Б, В. Рассмотрим вероятности успешного изготовления деталей из заказа Q1 на оборудовании А, их связь представлена на рисунке. $P(A|Q1)$ – есть вероятность успешного изготовления детали Q1 на оборудовании А, вероятности для других деталей и оборудования

представлены на рисунке ниже. Для получения достоверных значений вероятности необходимо учесть влияние технических особенностей установки - $P(A|a_1b_1c_1)$. Таким образом, $P(A|Q_1Q_2Q_3)$ – является искомым набором значений вероятностей успешного изготовления заданных деталей на заданном оборудовании.

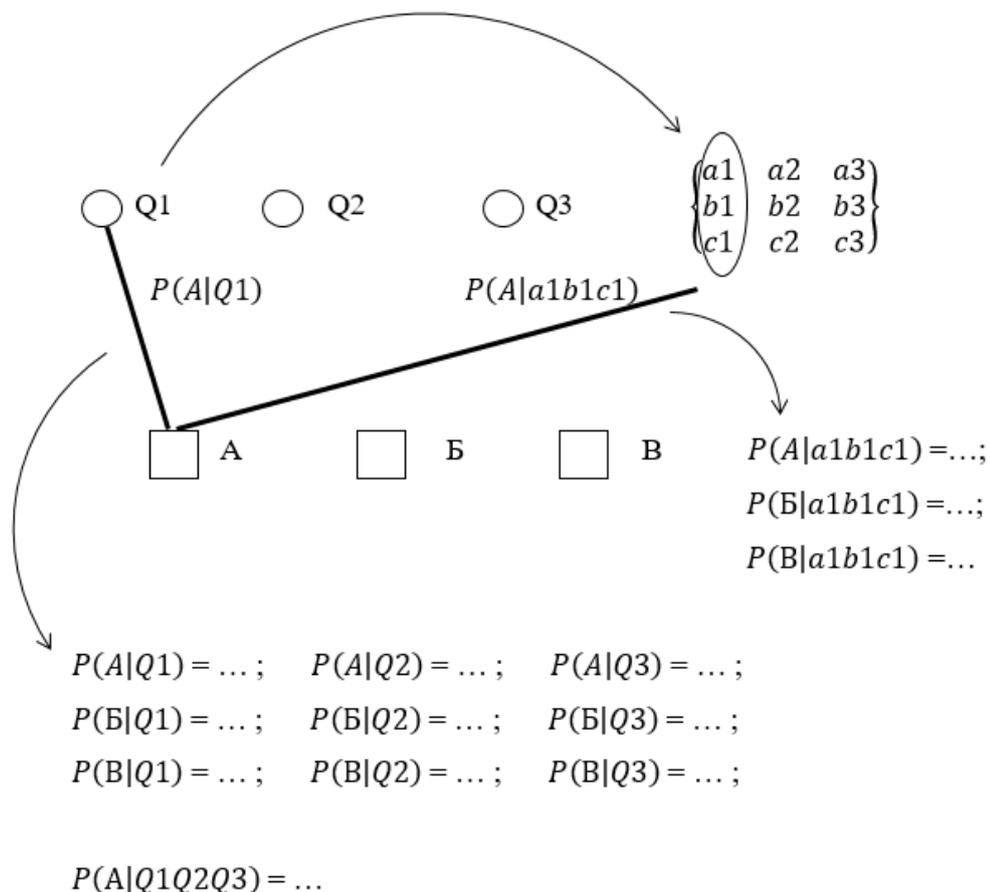
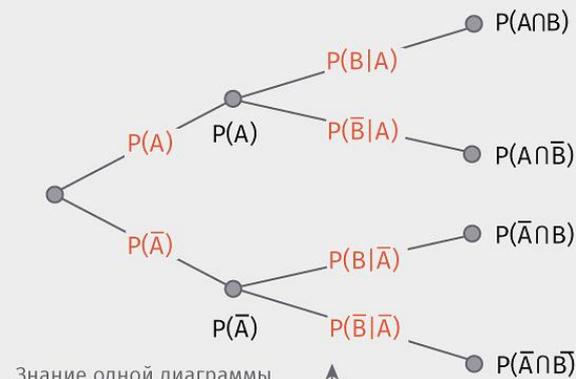


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема работы сети Байеса

Схема является наглядным представлением работы сетей Байеса для рассматриваемого процесса, однако при расчетах будет использоваться большая номенклатура деталей и оборудования. Поэтому расчет вероятностей по теореме Байеса будет производиться в калькуляционной электронной среде и визуально представлено в виде древовидной диаграммы, пример которой изображен на рисунке 2.4.

Древоподобные диаграммы и теорема Байеса

Как теорема Байеса связывает вероятности, связанные с двумя переменными A и B



Знание одной диаграммы достаточно, чтобы из нее вывести другую

Использование Байесовой теоремы, чтобы конвертировать одну диаграмму в другую

$$P(\alpha|\beta) P(\beta) = P(\alpha \cap \beta) = P(\beta|\alpha) P(\alpha)$$

Знания любых трех значений достаточно, чтобы вывести остальные 24 значения

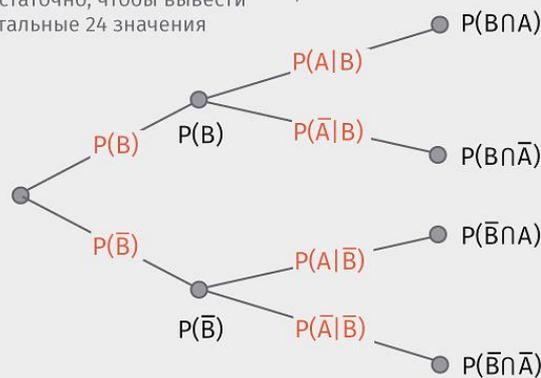


Схема: Gnathan87 / Wikimedia commons / CC0 1.0

Chrdk.

Рисунок 2.4 – Древоподобные диаграммы и теорема Байеса

Для заполнения таблицы 2.1 необходимо получить данные о вероятности изготовления заказных партий на определенном оборудовании без брака. Для того чтобы осуществить расчет с помощью теоремы Байеса нужно получить неизвестные значения вероятности. В качестве априорных вероятностей будут использоваться средние значения завершеного производства, которые упоминались в 1 главе при описании лабораторий. Для выяснения условных вероятностей в excel внесены, упорядочены и

соотнесены данные о возможностях оборудования, требования к изготовлению деталей, учтены время затраты и требования о квалификации сотрудников. В качестве примера на рисунках 2.5, 2.6 представлены условия и решение классической задачи при помощи сайта онлайн расчетов [38].

Таблица вероятностей + ↕ ✎ 🗑

<input type="checkbox"/>	Идентификатор	Идентификатор родителя	Название	Значение вероятности	
<input type="checkbox"/>	B1		Коробка 1	0.4	✎
<input type="checkbox"/>	G	B1	Зеленый шар	0.5	✎
<input type="checkbox"/>	Y	B1	Желтый шар	0.5	✎
<input type="checkbox"/>	B2		Коробка 2	0.6	✎
<input type="checkbox"/>	G	B2	Зеленый шар	0.2	✎
<input type="checkbox"/>	Y	B2	Желтый шар	0.8	✎

Рисунок 2.5 – Условия задачи

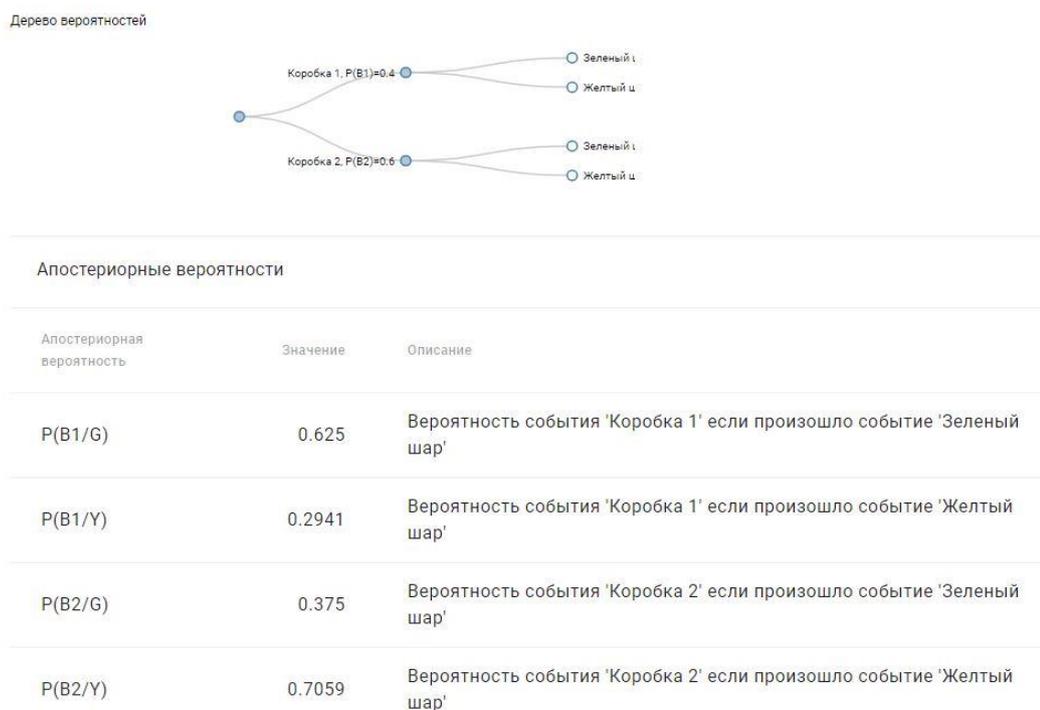


Рисунок 2.6 – Решение задачи

В этой таблице вероятности В1 и В2 – априорные, остальные вероятности – условные. На древе вероятностей в графическом виде показаны исходные данные и их вероятности. Ниже, под древом вероятностей представлены результаты расчета с описанием. Расчет осуществляется по следующей формуле.

$$P(A|X) = \frac{P(X|A)P(A)}{P(X|A)P(A) + P(X|notA)P(notA)}, \quad (2.5)$$

где

- $P(A|X)$ = вероятность события (А) при выполнении события (Х). Это как раз то, что мы хотим знать: какова вероятность события в случае использования определенного оборудования.
- $P(X|A)$ = вероятность результата (Х) в случае, когда выполняется (А).
- $P(A)$ = вероятность успешного изготовления по статистике
- $P(not A)$ = вероятность не успешного изготовления по статистике
- $P(X|not A)$ = вероятность не успешного изготовления при событии (Х)

Другими словами, чтобы получить вероятность события, нужно вероятность истинного положительного исхода разделить на вероятность всех положительных исходов.

2.3.1 Расчет условных вероятностей успешного изготовления заказов

Для того чтобы определить условные вероятности успешного изготовления заказов на определенном оборудовании при расчете апостериорных вероятностей по теореме Байеса в программе Excel создана автоматическая система подсчета вероятностей успешного выполнения заказа. Создается таблица с параметрами заказа. На рисунке 2.7 представлена таблица с параметрами заказа на печать сопловых секций 1 ступени турбины. Данные о других деталях представлены в приложении А.

N	O	P	Q	R	S
Параметры детали 1					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pг	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
26	24200	да	30	0,3	3

Рисунок 2.7 - Параметрами заказа на печать сопловых секций 1 ступени турбины

В таблице с параметрами заказа отмечаются требования к выполнению деталей, которые служат одним из ориентиров при оценке возможностей исполнения заказов для обозреваемого оборудования.

Под необходимостью постобработки может подразумеваться удаление поддерживающего материала, улучшение свойств с помощью тепловых методов, подготовка к использованию в качестве модели, улучшение текстуры материала, повышение точности или улучшение эстетического восприятия.

На рисунке 2.8 показаны характеристики оборудования которое расположено в разных лабораториях, исходя из соответствия характеристик требованиям заказа оценивается вероятность качественного выполнения партии деталей.

Обозначение		
Параметр важности, А	Важность	А
SLM 280	Размеры платформы	280*280*350
	Площадь рабочей поверхности	78400
	Минимальная толщина слоя, мкм	20
	Скорость печати, см3/час	55
	Минимальная толщина стенки, мм	0,25
	Опыт работы сотрудника	2
SLM 125	Размеры платформы	125*125*125
	Площадь поверхности	15625
	Минимальная толщина слоя, мкм	20
	Скорость печати, см3/час	25
	Минимальная толщина стенки, мм	0,15
	Опыт работы сотрудника	2
Concept Laser M2	Размеры платформы	250*250*280
	Площадь поверхности	62500
	Минимальная толщина слоя, мкм	20
	Скорость печати, см3/час	20
	Минимальная толщина стенки, мм	0,25
	Опыт работы сотрудника	3
Concept Laser X LINE 200R	Размеры платформы	800*400*500
	Площадь поверхности	320000
	Минимальная толщина слоя, мкм	30
	Скорость печати, см3/час	120
	Минимальная толщина стенки, мм	0,3
	Опыт работы сотрудника	3
EOS M 400	Размеры платформы	400*400*400
	Площадь поверхности	160000
	Минимальная толщина слоя, мкм	40
	Скорость печати, см3/час	100
	Минимальная толщина стенки, мм	0,25
	Опыт работы сотрудника	7
EOS M 100	Размеры платформы	D100*95
	Площадь поверхности	7850
	Минимальная толщина слоя, мкм	40
	Скорость печати, см3/час	35
	Минимальная толщина стенки, мм	0,15
	Опыт работы сотрудника	7
SLM 280 (SU)	Размеры платформы	280*280*350
	Площадь рабочей поверхности	78400
	Минимальная толщина слоя, мкм	20
	Скорость печати, см3/час	55
	Минимальная толщина стенки, мм	0,25
	Опыт работы сотрудника	4

Рисунок 2.8 - Характеристики оборудования

На рисунке 2.8 дважды обозначена установка SLM 280, это сделано, так как эта установка используется в разных лабораториях и показатель отличается, а также это сделано для удобства переноса информации.

На рисунке 2.9 показана таблица промежуточных данных для расчетов

Вспомогательная таблица		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	T
3	44	15,9
0	87	#ДЕЛ/0!
2	56	30,4
13	23	2
6	23	4,2
0	69	#ДЕЛ/0!
3	44	15,9

Рисунок 2.9 - Вспомогательная таблица для расчетов

Если поверхность платформы разделить на площадь детали и округлить в меньшую сторону, то получим примерное или возможное количество деталей на платформе. Без подробного анализа касательно расположения деталей нельзя понять какое количество будет выполняться за один цикл печати, поэтому в данном расчете используется приблизительный расчет, чтобы иметь возможность оценить время необходимое для изготовления всей партии. Время печати в этой таблице является постоянной величиной, которая известна из программной модели работы установки, которая разрабатывается в специализированном программном обеспечении, и в дальнейшем загружается в аддитивную установку в качестве программы производства. При результате равном 0 в столбце о количестве деталей на платформе, вероятность выполнения деталей на оборудовании, которому соответствует строка, рассчитываться не будет, и в некоторых ячейках будет отображаться «#ДЕЛ/0!», что будет обозначать, что деталь не может поместиться на платформу. Таблицы с промежуточными данными для расчетов остальных деталей представлены в приложении Б.

На рисунке 2.10 показано формирование значений условная вероятность успешного выполнения заказа. На пересечении каждого столбца и строки формируется значение оценки вероятности качественного производства заданной детали на заданном оборудовании, исходя из соответствия значений параметра, указанного в столбце. Величины показателей оценки вероятности от 0 до 5. Где, на основании экспертного опроса 0 соответствует оценке - практический невозможное событие, 1 соответствует оценке - крайне маловероятное событие, 2 соответствует оценке - маловероятное событие, 3 соответствует оценке - событие с вероятностью, которой нельзя пренебречь, 4 соответствует оценке - достаточно вероятное событие, 5 соответствует оценке - событие с заметной вероятностью. Параметр оценки вероятности обозначен как X . Исходя из значений оценки вероятности высчитывается условная вероятность успешного выполнения заказа P_{ij} .

Значение вероятности успешного выполнения рассчитывается следующим образом:

$$P_{ij} = \sum_1^n A \cdot X_{ij}, \quad (2.6)$$

где i обозначает установку, j обозначает заказ или деталь,

A – параметр важности заданного критерия.

Среди 5 выбранных критериев (обозначим их B) распределяются 10 баллов в зависимости от величины влияния критерия на производство. Таким образом минимальная толщина слоя и минимальная толщина стенки оцениваются по 3 балла, влияние опыта сотрудников оценивается в 2 балла, продолжительность производства и возможность постобработки оцениваются в 1 балл.

$$A = \frac{B}{50} \quad (2.7)$$

Критерий успешного выполнения варьируется в следующем интервале значений $0 \leq P_{ij} \leq 1$.

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	P _{ij}
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	4	4	4	4	2	0,72
SLM 125	4	5	#ДЕЛ/0!	4	2	#ДЕЛ/0!
Concept Laser M2	4	4	2	4	3	0,72
Concept Laser X LINE 2000R	3	3	5	4	3	0,66
EOS M 400	1	4	5	4	5	0,68
EOS M 100	1	5	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!
SLM 280 (SU)	4	4	4	4	4	0,8

Рисунок 2.10 – Получение условных вероятностей в Excel для сопловых секций 1 ступени турбины

Оценка вероятности удачного изготовления детали от параметра «Минимальная толщина слоя» вычисляется по следующему алгоритму: если $Min_{\text{толщ. сл. об.}} > Min_{\text{толщ. сл. дет.}} + 10$, то показатель соответствует значению 0; если $Min_{\text{толщ. сл. дет.}} + 10 > Min_{\text{толщ. сл. об.}} > Min_{\text{толщ. сл. дет.}}$, то показатель соответствует значению 1; при выполнении условия $Min_{\text{толщ. сл. об.}} = Min_{\text{толщ. сл. дет.}}$ показатель соответствует значению 3; при условиях $Min_{\text{толщ. сл. об.}} + 10 > Min_{\text{толщ. сл. дет.}}$ или

$\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} + 10 = \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$ показатель соответствует значению 4; при $\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} + 10 < \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$ показатель соответствует значению 5.

Оценка вероятности удачного изготовления детали от параметра «Минимальная толщина стенки» вычисляется по следующему алгоритму:

если $\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} > \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}} + 0.1$, то показатель соответствует значению 0; если $\text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}} + 0.1 > \text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} > \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$, то показатель соответствует значению 1; при выполнении условия $\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} = \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$ показатель соответствует значению 3; при условиях $\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} + 0.1 > \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$ или $\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} + 0.1 = \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$ показатель соответствует значению 4; при $\text{Min}_{\text{толщ. сл. об.}} + 0.1 < \text{Min}_{\text{толщ. сл. дет.}}$ показатель соответствует значению 5.

Оценка вероятности удачного изготовления детали от параметра «Продолжительность производства» вычисляется по следующему алгоритму: при значении $n > 50$ и $t > 50$, показатель соответствует значению 0; если $T > 30$, показатель соответствует значению 2; при условии $T = 30$ показатель соответствует значению 3; при условии $10 < T < 30$ показатель соответствует значению 4; при $T < 10$ показатель соответствует значению 5.

Оценка вероятности удачного изготовления детали от параметра «Возможность постобработки после печати» вычисляется по следующему образом: если данная лаборатория имеет техническую возможность постобработки ($\text{Pr}_{\text{об}}$) изготавливаемых деталей, если это обозначено ($\text{Pr}_{\text{дет}}$) в заданных параметрах. Примем, что в принятых условиях все лаборатории обладают необходимым оборудованием для всех необходимых операций исходя из этого в каждой ячейке, отобразится показатель со значением 4.

Оценка вероятности удачного изготовления детали от параметра «Опыт сотрудника» вычисляется по следующему алгоритму: при $Q_{\text{об}} = 0$ показатель соответствует значению 1; если $Q_{\text{об}} < Q_{\text{дет}}$, то показатель соответствует значению 2; при условии $Q_{\text{об}} = Q_{\text{дет}}$ показатель соответствует значению 3; при

$Q_{дет+1} > Q_{об} > Q_{дет}$ отобразится показатель 4; при $Q_{об} \geq Q_{дет+1}$ отобразится показатель 5.

Всегда остается возможность добавить или изменить оборудование и параметры, относительно которых ведется сравнение, и которых необходимо достичь. Так же остается возможность изменить систему формирования искомой условной вероятности, изменять важность параметров и алгоритм формирования оценок вероятности. Данные с расчетами значений оценок вероятностей качественного изготовления других деталей представлены в приложении Б. В таблице 2.3 представлены условные вероятности успешного выполнения деталей на различном оборудовании

Таблица 2.3 – Сводная таблица условных вероятностей

	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4	Деталь 5	Деталь 6	Деталь 7	Деталь 8	Деталь 9
SLM 280	0,72	0,72	0,66	0,72	0,86	0,78	0,6	-	0,56
SLM 125	-	-	-	-	0,86	0,82	0,74	-	0,7
CL M2	0,72	0,72	0,7	0,76	0,9	0,82	0,64	-	0,6
CL X LINE 2000R	0,66	0,78	0,6	0,62	0,78	0,7	0,46	0,58	0,42
EOS M 400	0,68	0,68	0,62	0,62	0,8	0,68	0,5	0,6	0,5
EOS M 100	-	-	-	-	-	0,72	0,64	-	0,6
SLM 280 (SU)	0,8	0,78	0,72	0,7	0,92	0,82	0,56	-	0,64

2.3.2 Расчет вероятностей успешного изготовления заказов по теореме Байеса

Далее приведен расчет апостериорной вероятности по теореме Байеса. В качестве априорной вероятности взяты статистические значения успешного выполнения заказов в рассматриваемых лабораториях.

$P(B1) = 0,6$ - значение для лаборатории Самарского университета;

$P(S1) = 0,75$ - значение для лаборатории пермского завода «Авиадвигатель»;

$P(O1) = 0,75$ - значение для лаборатории пермского завода «Авиадвигатель»

$P(T1) = 0,8$ - значение для научно-технического комплекса Санкт-Петербургского политехнического университета;

$P(R1) = 0,8$ значение для научно-технического комплекса Санкт-Петербургского политехнического университета;

$P(E1) = 0,65$ - значение для организации Metal Sprint. SLM;

$P(Z1) = 0,65$ - значение для организации Metal Sprint. SLM.

Для принятия решения, на каком оборудовании изготавливать детали поставлена задача: найти вероятности успешного выполнения определенных партий деталей на определенном оборудовании разных лабораторий. Для начала данные вероятности будут найдены для лаборатории Самарского университета, которая оборудована 3D-принтером по металлу SLM Solutions SLM 280 2.0 и каждой партии деталей. На рисунке 2.11 представлены таблицы вероятности с данными априорной и условной вероятностей успешного изготовления деталей на оборудовании Самарского университета.

На рисунке 2.12 представлены данные априорной и условной вероятностей не успешного изготовления деталей на оборудовании Самарского университета.

Таблица вероятностей				
<input type="checkbox"/>	Идентификатор	Идентификатор родителя	Название	Значение вероятности
<input type="checkbox"/>	B1		Качественно, $P(B1)=0.6$	0.6
<input type="checkbox"/>	G	B1	Деталь1, $P(G)=0.8$	0.8
<input type="checkbox"/>	Y	B1	Деталь2, $P(Y)=0.78$	0.78
<input type="checkbox"/>	K	B1	Деталь3, $P(K)=0.72$	0.72
<input type="checkbox"/>	L	B1	Деталь4, $P(L)=0.7$	0.7
<input type="checkbox"/>	M	B1	Деталь5, $P(M)=0.92$	0.92
<input type="checkbox"/>	C	B1	Деталь6, $P(C)=0.82$	0.82
<input type="checkbox"/>	X	B1	Деталь7, $P(X)=0.56$	0.56
<input type="checkbox"/>	W	B1	Деталь8, $P(W)=0$	0
<input type="checkbox"/>	V	B1	Деталь9, $P(V)=0.64$	0.64

Рисунок 2.11 – Данные для решения задачи

Таблица вероятностей				
<input type="checkbox"/>	Идентификатор	Идентификатор родителя	Название	Значение вероятности
<input type="checkbox"/>	B2		Не качественно, $P(B2)=0.4$	0.4
<input type="checkbox"/>	G	B2	Деталь1, $P(G)=0.2$	0.2
<input type="checkbox"/>	Y	B2	Деталь2, $P(Y)=0.22$	0.22
<input type="checkbox"/>	K	B2	Деталь3, $P(K)=0.28$	0.28
<input type="checkbox"/>	L	B2	Деталь4, $P(L)=0.3$	0.3
<input type="checkbox"/>	M	B2	Деталь5, $P(M)=0.08$	0.08
<input type="checkbox"/>	C	B2	Деталь6, $P(C)=0.18$	0.18
<input type="checkbox"/>	X	B2	Деталь7, $P(X)=0.34$	0.34
<input type="checkbox"/>	W	B2	Деталь8, $P(W)=1$	1
<input type="checkbox"/>	V	B2	Деталь9, $P(V)=0.36$	0.36

Рисунок 2.12 – Данные для решения задачи

На рисунке 2.13 в графическом виде представлены данные вероятностей относительно деталей и заданных условий.

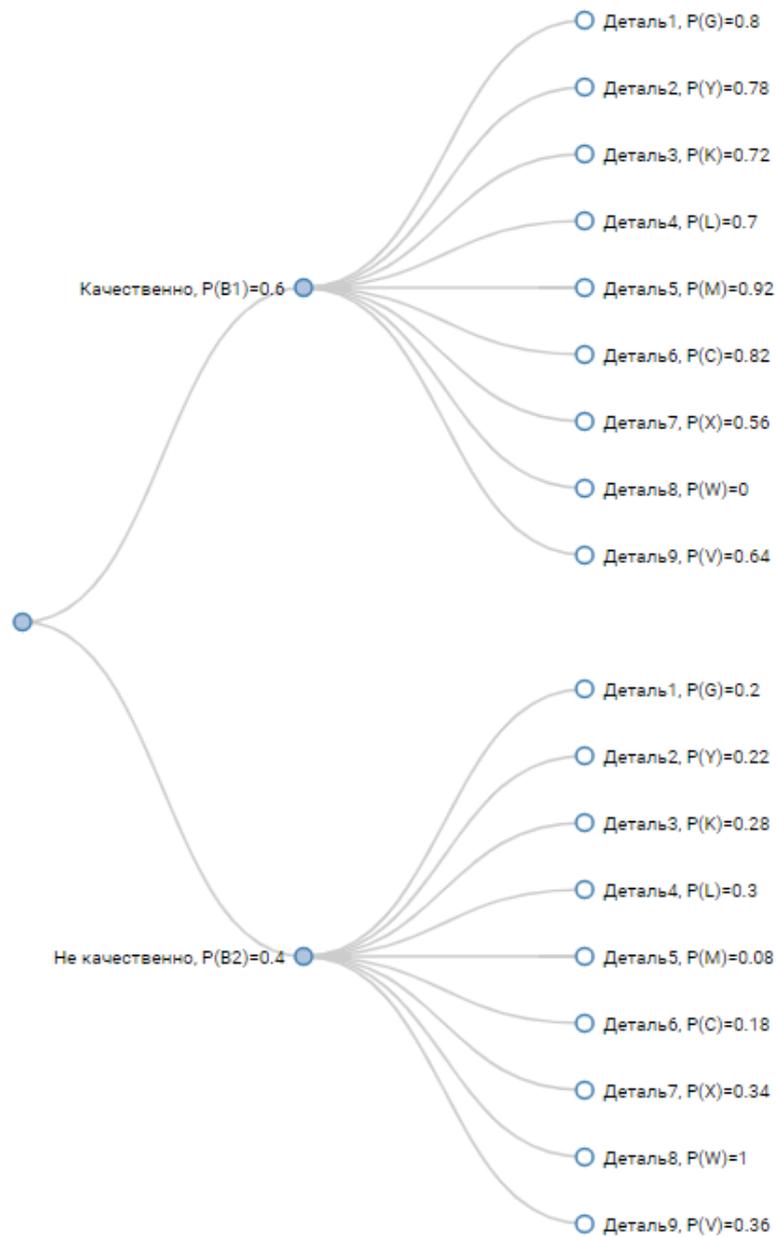


Рисунок 2.13 – Дерево вероятностей

На рисунке 2.14 показаны результаты расчета в качестве апостериорных вероятностей успешного выполнения партий деталей при выполнении их на заданном оборудовании и вероятности не успешного выполнения на рисунке 2.15.

Апостериорные вероятности

Апостериорная вероятность	Значение	Описание
P(B1/G)	0.86	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/Y)	0.84	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/K)	0.79	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/L)	0.78	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/M)	0.95	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/C)	0.87	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/X)	0.71	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/W)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/V)	0.73	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/G)	0.14	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'

Рисунок 2.14 – Результаты расчета

Апостериорные вероятности

Апостериорная вероятность	Значение	Описание
P(B2/Y)	0.16	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/K)	0.21	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/L)	0.22	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/M)	0.05	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/C)	0.13	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/X)	0.29	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/W)	1	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/V)	0.27	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'

Рисунок 2.15 – Результаты расчета

Аналогичным образом рассчитаны апостериорные вероятности успешного выполнения деталей в других лабораториях. Данные расчётов для остальных образцов оборудования представлены в приложении В.

Результаты расчетов для всего оборудования и всей номенклатуры заказов сведены в таблицу 2.4

Таблица 2.4 – Данные для распределения заказов по лабораториям

	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4	Деталь 5	Деталь 6	Деталь 7	Деталь 8	Деталь 9
Ксрочн	0,71	0,77	0,65	0,86	0,79	0,56	0,49	0,74	0,63
SLM 280	0,83	0,83	0,78	0,83	0,92	0,87	0,87	-	0,7
SLM 125	-	-	-	-	0,892	0,89	0,84	-	0,81
CL M2	0,89	0,89	0,88	0,9	0,96	0,93	0,84	-	0,82
CL X LINE 2000R	0,85	0,91	0,82	0,83	0,91	0,88	0,72	0,81	0,68
EOS M 400	0,89	0,89	0,87	0,87	0,94	0,89	0,8	0,86	0,8
EOS M 100	-	-	-	-	-	0,91	0,88	-	0,86
SLM 280 (SU)	0,86	0,84	0,79	0,78	0,95	0,87	0,71	-	0,73

2.4 Описание работы алгоритма распределения

- Шаг 1 – Выбрать max значение вероятности в каждом столбце (выделено зеленым) и значения в диапазоне 5% уменьшения от max для столбца (желтый цвет);
- Шаг 2 – Выбрать max значение в строке Кприор (если несколько значений удовлетворяют требованию, то выбрать значение, в столбце которого меньше значений удовлетворяют требованиям шага 1);
- Шаг 3 – Из столбца со значением, выбранным в шаге 2, выбрать max значение вероятности (если несколько значений удовлетворяют требованию, то выбрать значение, в строке которого меньше значений удовлетворяют требованиям шага 1);

- Шаг 4 – В отдельное поле (Вывод) вынести название строки и столбца, в отдельное поле (Загрузка) добавить значение из таблицы 2 соответствующее выбранной ячейке;
- Если значение в поле загрузка при выборе данной детали больше 25, выбрать оборудование со следующей в сторону уменьшения вероятностью;
- Шаг 5 – Удалить значения вероятностей для выбранной детали;
- Повторить порядок действий

На рисунке 2.16 представлена оптимизированная и принятая для дальнейших расчетов блок-схема.

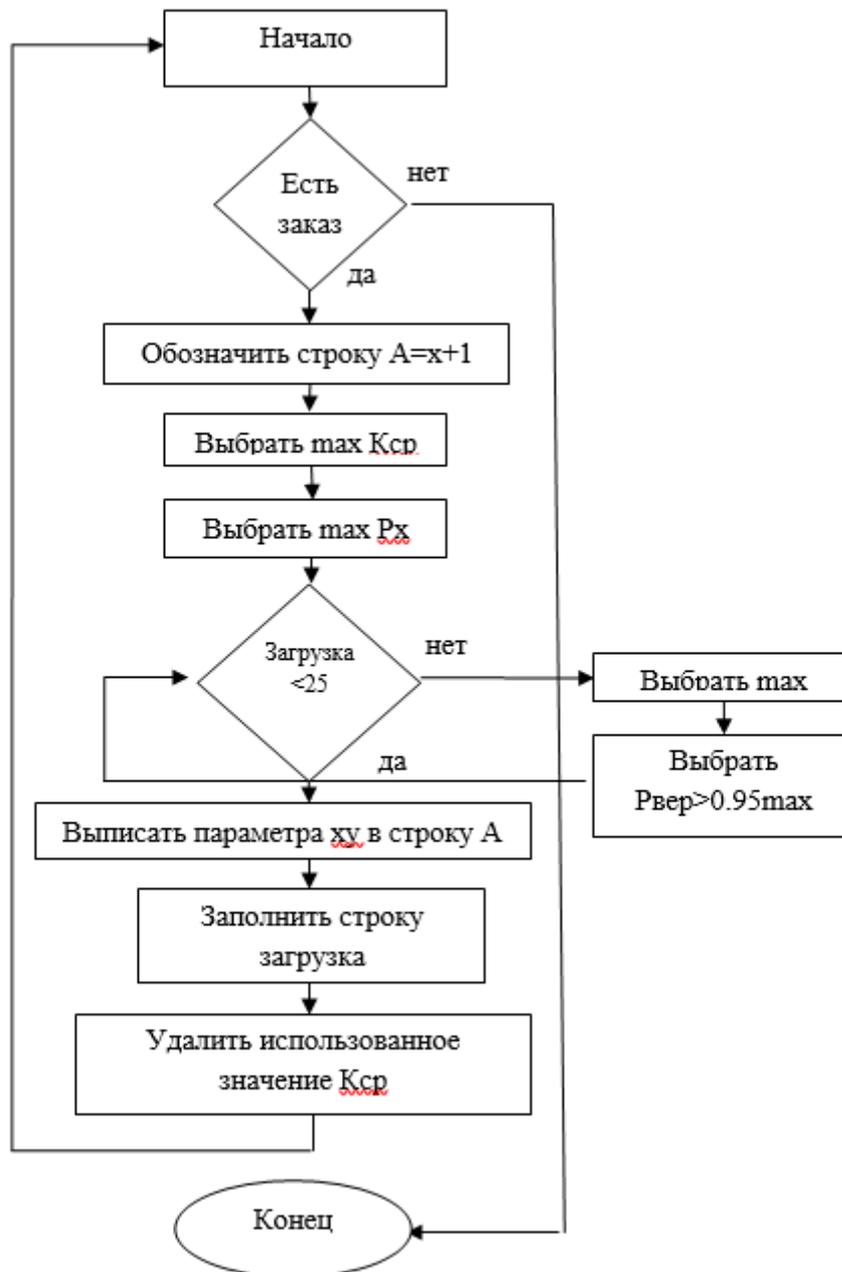


Рисунок 2.16 – Блок-схема алгоритма распределения

Важным элементом работы алгоритма является то, что изначально определяются не только наибольшие полученные значения, а также учитываются значения в диапазоне 5 % от максимума, что выгодно отличает этот алгоритм от «жадного» алгоритма и позволяет учитывать сопутствующие параметры. Данный алгоритм учитывает приоритетность выполнения определенных заказов и в соответствии с ней направляет их на производство, но уже на этапе распределения заказов из условия

приоритетности учитывается и количество «одобренных» вероятностей и исходя из этого значения выбирается оборудование с меньшим количеством вариантов. Также после распределения определенного заказа на единицу оборудования, для этого оборудования вводится параметр загруженности, он отражает сколько будет длиться процесс производства распределенной детали и при последующих этапах распределения этот параметр будет учитываться. Таким образом при распределении детали на оборудование, которое занято производством другого заказа будет автоматически рассматриваться другое оборудование с вероятностью успешного изготовления в диапазоне 5 % от максимального значения, если подходящего оборудования не обнаруживается, то к загрузке рассматривается оборудование, которое в тот момент уже загружено, но учитывается суммарное время производства и это время не должно превышать время оговоренное в договоре для производства конкретной детали, но пока в алгоритме используется значение 30 дней, как среднее договорное значение продолжительности производства. Таким образом, практически во всех случаях заказы распределяются на оборудование с наивысшей вероятностью успешного изготовления заказа, учитывается время, затрачиваемое на производство и по возможности алгоритм, отказывается от тактики очередей, тем самым используя больше единиц оборудования и затрачивая меньше времени. Из этого сделаем вывод, что алгоритм обладает необходимыми параметрами гибкости и объединяет в себе выполнение нескольких поставленных задач.

На рисунках 2.17 – 2.19 можно наглядно проследить работу представленного алгоритма.

	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4	Деталь 5	Деталь 6	Деталь 7	Деталь 8	Деталь 9
$K_{\text{сложн}}$	0,71	0,77	0,65	0,86	0,79	0,56	0,49	0,74	0,63
SLM 280	0,83	0,83	0,78	0,83	0,92	0,87	0,87	-	0,7
SLM 125	-	-	-	-	0,89	0,89	0,84	-	0,81
CL M2	0,89	0,89	0,88	0,9	0,96	0,93	0,84	-	0,82
CL X LINE 2000R	0,85	0,91	0,82	0,83	0,91	0,88	0,72	0,81	0,68
EOS M 400	0,89	0,89	0,87	0,87	0,94	0,89	0,8	0,86	0,8
EOS M 100	-	-	-	-	-	0,91	0,88	-	0,86
SLM 280 (SU)	0,86	0,84	0,79	0,78	0,95	0,87	0,71	-	0,73

Рисунок 2.17 – Выделение максимальных значений и значений погрешности

На следующем рисунке выбирается наибольшее значение коэффициента срочности и максимальное значение вероятности. Данные для выбранной детали и самого выгодного в использовании оборудования и сроке изготовления вносятся в таблицу 2.5.

	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4	Деталь 5	Деталь 6	Деталь 7	Деталь 8	Деталь 9	
$K_{\text{сложн}}$	0,71	0,77	0,65	0,86	0,79	0,56	0,49	0,74	0,63	
SLM 280	0,83	0,83	0,78	0,83	0,92	0,87	0,87	-	0,7	
SLM 125	-	-	-	-	0,89	0,89	0,84	-	0,81	
CL M2	0,89	0,89	0,88	0,9	0,96	0,93	0,84	-	0,82	29.2
CL X LINE 2000R	0,85	0,91	0,82	0,83	0,91	0,88	0,72	0,81	0,68	
EOS M 400	0,89	0,89	0,87	0,87	0,94	0,89	0,8	0,86	0,8	
EOS M 100	-	-	-	-	-	0,91	0,88	-	0,86	
SLM 280 (SU)	0,86	0,84	0,79	0,78	0,95	0,87	0,71	-	0,73	

Рисунок 2.18 – Выбор коэффициент

	Деталь 1	Деталь 2	Деталь 3	Деталь 4	Деталь 5	Деталь 6	Деталь 7	Деталь 8	Деталь 9	
К _{сложн}	0,71	0,77	0,65	0,86	0,79	0,56	0,49	0,74	0,63	
SLM 280	0,83	0,83	0,78	0,83	0,92	0,87	0,87	-	0,7	0,5
SLM 125	-	-	-	-	0,89	0,89	0,84	-	0,81	15
CL M2	0,89	0,89	0,88	0,9	0,96	0,93	0,84	-	0,82	29,2
CL X LINE 2000R	0,85	0,91	0,82	0,83	0,91	0,88	0,72	0,81	0,68	2,2
EOS M 400	0,89	0,89	0,87	0,87	0,94	0,89	0,8	0,86	0,8	13,3+3
EOS M 100	-	-	-	-	-	0,91	0,88	-	0,86	18,8
SLM 280 (SU)	0,86	0,84	0,79	0,78	0,95	0,87	0,71	-	0,73	1,8+15,9

Рисунок 2.19 – Окончание распределения

В результате работы алгоритма получаем данные о последовательности загрузки и наименованиях оборудования с наибольшей вероятностью качественного выполнения конкретных деталей, в таблице 13 показано распределение деталей на точки производства, а также указано время необходимое на печать изделия.

Таблица 2.5 – Данные о последовательности загрузки и продолжительности печати

№	Наименования заказа	Наименование оборудования	Продолжительность выполнения, дни
1	Деталь 4	CL M2	29,2
2	Деталь 5	SLM 280 (SU)	1,8
3	Деталь 2	CL X LINE 2000R	2,2
4	Деталь 8	EOS M 400	13,3
5	Деталь 1	SLM 280 (SU)	15,5
6	Деталь 3	EOS M 400	3
7	Деталь 9	EOS M 100	18,8
8	Деталь 6	SLM 125	15
9	Деталь 7	SLM 280	0,5

3 Обзор методов имитационного моделирования

Этапы компьютерного имитационного моделирования приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Этапы компьютерного имитационного моделирования

№ п/п	Название этапа	Результат
1	Обзор системы	Понимание того, что происходит в системе, подлежащей анализу, какова ее структура, какие процессы в ней протекают
2	Постановка целей и задач	Список задач, которые предполагается решить с помощью будущей модели. Список входных и выходных параметров модели, список исходных данных, критерии завершенности будущего исследования
3	Разработка концептуальной структуры модели	Структура модели, состав существенных процессов, подлежащих отображению в модели, зафиксированный уровень абстракции для каждой подсистемы модели (список допущений), описание управляющей логики для подсистем
4	Реализация модели в среде моделирования	Реализованные подсистемы, их параметры и переменные, их поведение, реализованная логика и связи подсистем
5	Реализация анимационного представления модели	Анимационное представление модели, интерфейс пользователя
6	Проверка корректности реализации модели	Убеждение в том, что модель корректно отражает те процессы реальной системы, которые требуется анализировать
7	Калибровка модели	Фиксация значений параметров, коэффициентов уравнений и распределений случайных величин, отражающих те ситуации, для анализа которых модель будет использоваться

№ п/п	Название этапа	Результат
8	Планирование и проведение компьютерного эксперимента	Результаты моделирования – графики, таблицы и т. п., дающие ответы на поставленные вопросы

Существует три вида имитационного моделирования: агентное моделирование, системная динамика и дискретно-событийное моделирование. Наиболее подходящим видом имитационного моделирования применительно к вычислительным системам и сетям передачи данных является дискретно-событийное моделирование [28].

Агентное моделирование

Агентная модель представляет реальный мир в виде многих отдельно специфицируемых активных подсистем, называемых агентами. Каждый из агентов взаимодействует с другими агентами, которые образуют для него внешнюю среду, и в процессе функционирования может изменить как внешнюю среду, так и свое поведение. Обычно в таких системах не существует глобального централизованного управления, агенты функционируют по своим законам асинхронно.

Дискретно-событийное моделирование. Суть дискретно-событийного подхода - моделирование системы с помощью описания изменений состояния системы, происходящих в дискретные моменты времени. Момент времени, в который может измениться: состояние системы, называется моментом наступления события, а соответствующая ему логическая процедура обработки "изменений состояния системы называется событием.

В дискретно-событийном моделировании функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий. Событие происходит в определенный момент времени и знаменует собой изменение состояния системы.

Дискретно-событийное моделирование имеет огромную сферу приложений - от логистики и систем массового обслуживания до транспортных и производственных систем.

Системная динамика – направление в изучении сложных систем, исследующее их поведение во времени и в зависимости от структуры элементов системы и взаимодействия между ними.

Любая социально-экономическая система [39, 40] может быть описана множеством системно-динамических моделей. Выбор факторов, подлежащих включению в модель, обусловлен теми вопросами, на которые должен быть дан ответ. Любой фактор может оказывать решающее влияние на поведение системы.

Как правило, наиболее важные модели, отвечающие запросам управления, включают от 30 до 3000 переменных. Нижний предел близок к тому минимуму, который отражает основные типы поведения системы, интересующие тех, кто принимает решения. Верхний предел ограничивается нашими возможностями восприятия системы и всех ее взаимосвязей [41].

Следует уделять особое внимание таким аспектам исследуемой системы, как: временные зависимости, усиление, искажение информации.

Системно-динамические модели состоят из петель обратной связи, которые формируют поведение системы. Данный вид моделирования полезен при выявлении важных переменных и установлении взаимосвязей между ними.

3.1 Обзор существующих инструментов имитационного моделирования

При выборе средств имитационного моделирования учитывались возможности, предоставляемые ими, которые можно объединить в следующие группы: основные характеристики; совместимое программное обеспечение; анимация; статистические возможности; отчеты с выходными данными и графиками; услуги, предоставляемые заказчикам и документация.

В научной литературе существует описание достаточно широкого

выбора имитационных моделей, применяемых для решения практических задач планирования на предприятии [42, 43, 44, 45, 46, 47]. Ниже приведена краткая характеристика основных и их сравнительный анализ.

В условиях повышенного спроса на более высокую степень кастомизации и персонализации продукта моделирование приводит к экономии ресурсов. Моделирование производственных процессов, как промежуточный этап внедрения цифрового производства, требует использования специфических технологий и методов [48].

В то время как системная динамика и дискретно-событийное имитационное моделирование являются традиционными, агентное имитационное моделирование является относительно новым и может быть использовано на всех уровнях абстракции. Агенты могут моделировать объекты очень разнообразной природы и масштаба и позволяют определять поведение агентов, что будет полезно для более сложных исследований. Агентно-ориентированный подход является более общим и мощным [49]; он также легче внедряется и поддерживается.

Борщев и Филиппов [50], предлагают использовать агентно-ориентированное моделирование имитационного моделирования. Этот подход предполагает моделирование поведения отдельных объектов. Агентноориентированное моделирование фокусируется на отдельных активных компонентах системы. Руиз и др. [51, 52] представляют оценку наиболее часто используемых программных средств моделирования для производственных систем, таких как Arena, Extend, Witness, FlexSim и Promodel. Кокарева и др. [53] и Сидерская [54] предлагают в качестве решений для моделирования производственных процессов программное обеспечение Siemens Tecnomatix. Simulink и Anylogic, описаны Гудалом в [55].

Anylogic - это программный комплекс, разработанный компанией AnyLogic для моделирования, моделирования, анализа, визуализации и оптимизации производственных систем и процессов, материальных потоков

и логистических операций. Anylogic предоставляет единую платформу для динамического моделирования. Гудолл описывает различные приложения, использующие агентную модель в программном обеспечении Anylogic. Среда моделирования AnyLogic позволяет работать с агентными, дискретно-событийными и системно-динамическими моделями моделирования для настройки материальных и информационных ресурсов в производственной системе. Имитационное моделирование использует объекты и правила, описывающие динамическое поведение систем [56].

Наиболее популярными системами имитационного моделирования являются пакет Arena компании Rockwell Automation, пакет AnyLogic компании XJ Technologies, пакет TecnomatixPlantSimulation разработанный в Германии как инженерный инструмент для применения в производстве.

3.1.1 Пакет имитационного моделирования Rockwell Arena.

Система Arena компании Rockwell Automation является лидером на рынке программ имитационного моделирования. В Arena используется процессор и язык имитационного моделирования SIMAN. Этот продукт используют крупнейшие компании, включая General Motors, UPS, IBM, Nike, Xerox, Lufthansa, Ford Motor Company и другие. Основные области применения данного пакета: производство (моделирование конвейерного производства, определение узких мест...), логистика и складское хозяйство (оптимизация использования складских площадей), вооружение и безопасность, медицина (моделирование потока пациентов, распределение персонала...), и другие.

Arena обеспечивает вывод на экран двухмерной и трехмерной (Arena 3DPlayer) анимации и позволяет выводить на экран динамическую графику (гистограммы и графики временной зависимости) [57, 58].

Число потоков случайных чисел в пакете Arena не ограничено. Более того, пользователь имеет доступ к 12 стандартным теоретическим распределениям вероятностей, а также к эмпирическим распределениям.

Данный пакет позволяет выполнять функционально-стоимостной анализ при использовании ABC-метода, благодаря чему можно учитывать дополнительные и обычные затраты, а также создавать временные отчеты. Результаты моделирования сохраняются в базе данных и отображаются на экране после прогона модели в виде отчета.

3.1.2 Пакет имитационного моделирования AnyLogic

Программное обеспечение для имитационного моделирования сложных систем и процессов, разработанное российской компанией XJ Technologies. Продукт получил название AnyLogic, потому что он поддерживал все три известных метода моделирования: системная динамика; дискретно-событийное моделирование; агентное моделирование.

Многие крупные компании, такие как Билайн, Газпром, General Motors, Mitsubishi, McDonalds остановили свой выбор на AnyLogic.

Графическая среда AnyLogic построена по тому же принципу, что и в Rockwell Arena. Моделирующие конструкции располагаются в палитрах (аналог шаблонов в Arena). AnyLogic поддерживает иерархическое моделирование, а также создание собственных моделирующих конструкций и объединение их в библиотеки (только для версии Professional).

AnyLogic основан на Java и базируется на платформе Eclipse - современном стандарте для бизнес-приложений. Благодаря Eclipse AnyLogic работает на всех распространённых операционных системах (Windows, Mac, Linux и т.д.).

В редакторе AnyLogic возможно разработать анимацию и интерактивный графический интерфейс модели. Анимация может быть иерархической и поддерживать несколько перспектив.

Для создания отчетов в AnyLogic отведена специальная палитра «Статистика», в которой содержатся конструкции для сбора данные по ходу работы модели. В этой палитре также находятся различные диаграммы, графики и гистограммы.

Как видно из сравнения, оба пакета содержат широкий выбор моделирующих конструкций для построения сложных дискретно-событийных моделей, а также инструменты для двухмерного анимирования процесса прогона модели [59]. Обе системы обладают удобным графическим интерфейсом, что ускоряет построение модели и снижает вероятность ошибки. В пакете Arena просматривается его направленность на моделирование бизнес-процессов с подсчетом стоимости по различным видам деятельности. Пакет AnyLogic, в свою очередь, является более универсальным, что является одним из оснований для использования данного продукта в научной деятельности [60]. Универсальность AnyLogic также обусловлена возможностью создания собственных сборщиков статистики.

3.1.3 Пакет Tecnomatix Plant Simulation

Система разработана в Германии как инженерный инструмент для применения в производстве. В качестве основы использован объектно-ориентированный принцип построения модели [61, 62]. По начальным данным (состояние оборудования, план выпуска продукции, требования по планово-предупредительному ремонту оборудования и пр.) анализируются возможные варианты, и выбирается оптимальный график производства по максимальной производительности или по минимальному отклонению от плана выпуска.

Целью моделирования является вычисление средней производительности, потребности в промежуточных накопителях, их емкости и влияние соотношения на среднегодовую производительность.

Такие параметры, как время работы оборудования, вместимость объекта, алгоритм работы накопителей, размеры партий продукта можно менять в диалоговом интерфейсе.

По результатам моделирования собирается статистика - производительность за промежуток времени, время использования оборудования, заполненность накопителей и другие показатели.

Технологические операции можно создавать как иерархически, так и в виде списка, а также с отображением редактируемого сетевого графика планирования работ.

Объекты, представляющие ресурсы, соединяются между собой стрелками, определяющими направление материалопотоков. Каждый объект в модели автоматически осуществляет сбор статистики своей работы - время работы, количество и типы обслуженных объектов. Для визуализации этих значений применяется инструмент «Анализатор узких мест», позволяющий автоматически собрать статистику и найти наиболее/наименее загруженные участки. Еще одной возможностью является автоматическое построение диаграмм за определенное время по результатам работы. С помощью данного средства имитационного моделирования можно обеспечить производственный участок/цех заданной производительностью, оптимизировать движение материального потока и загрузку рабочих мест производственного участка [63].

Исходя из выше приведенных результатов был выбран программный продукт AnyLogic, так как он удобен в использовании, русифицирован, поддерживает множество разнообразных типов экспериментов с моделями, таких как: простой прогон, сравнение прогонов, варьирование параметров, а также в него включены средства анализа данных и большой набор элементов бизнес-графики, спроектированных для эффективной обработки и презентации результатов моделирования.

3.2 Создание модели

При создании модели в AnyLogic задается схема функционирования, затем параметры каждой детали и оборудования, прикрепляются базы данных, отлаживается работа, подбираются лучшие параметры, по итогу получаем результат и возможность представления результирующих значений в нужном виде.

Для начала задаются параметры деталей и оборудования (рисунок 3.1). В качестве параметров задается количество деталей, время обработки на каждом оборудовании, параметры подачи и хранения [63].

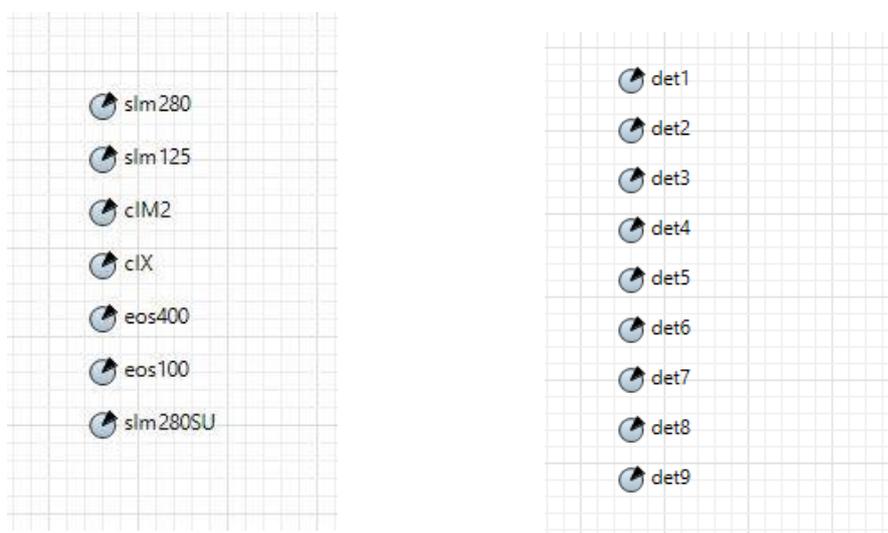


Рисунок 3.1 – Параметры оборудования и деталей

Any Logic имеет возможность загружать и использовать при построении моделей базы данных. В качестве подобной базы загружен файл Excel с данными времени необходимого для производства деталей на различном оборудовании. Сведения базы данных представлены на рисунке 3.2. На примере детали 9 (данная деталь имеет наименьшее время производства) представлено распределение заказа на оборудование.

	db_column	db_9
1	Minimum	0.2
2	SLM 280	0.9
3	SLM 125	10
4	CL M2	2.9
5	CL X LINE 2000R	0.2
6	EOS M 400	0.3
7	EOS M 100	18.8
8	SLM 280 (SU)	0.9
+		

Рисунок 3.2 – Сведения базы данных о времени необходимом для производства 9 детали

Для изготовления детали 9 выбирается установка Concept Laser X Line 2000R с временем изготовления 0,2 дня. Для сравнения рассмотрена загруженная база данных с вероятностями успешного изготовления детали. Исходя из этих данных видно, что с наибольшей вероятностью успеха заказ будет изготовлен на установке EOS M 100. Если обратиться к базе данных времени изготовления, то видно, что на данной установке время имеет значение 0,9 дней. Сведения базы данных вероятности представлены на рисунке 3.3.

	db_column	db_9
1	К приор	0.8
2		
3	SLM 280	0.7
4	SLM 125	0.81
5	CL M2	0.82
6	CL X LINE 2000R	0.68
7	EOS M 400	0.8
8	EOS M 100	0.86
9	SLM 280 (SU)	0.73

Рисунок 3.3 – Сведения базы данных о вероятности успешного производства 9 детали

Значения времени для всех деталей представлено на рисунке 3.4.

	db_column	db_1	db_2	db_3	db_4	db_5	db_6	db_7	db_8	db_9
1	Minimum	2.0	2.2	1.5	2.6	0.3	0.2	0.1	3.8	0.2
2	SLM 280	15,9	19,6	11,4	25,0	1,8	1	0,5	-	0,9
3	SLM 125	-	-	-	-	27,5	15	6,1	-	10
4	CL M2	29,3	46,7	18,8	29,8	6,0	3,2	1,9	-	2,9
5	CL X LINE 2000R	2,0	2,2	1,5	2,6	0,3	0,2	0,1	3,8	0,2
6	EOS M 400	4,2	4,4	3,0	5,2	0,6	0,3	0,2	13,4	0,3
7	EOS M 100	-	-	-	-	-	25	9,4	-	18,8
8	SLM 280 (SU)	15,9	19,6	11,4	25,0	1,8	1	0,5	-	0,9

Рисунок 3.4 - Значения времени

Для принятия решений об эффективности разработанной модели было проведено моделирование двух вариантов работы распределяющего алгоритма.

Рассмотрена классическая модель загрузки оборудования, основанная на принципе наискорейшего выполнения производственного задания (рисунок 3.5).

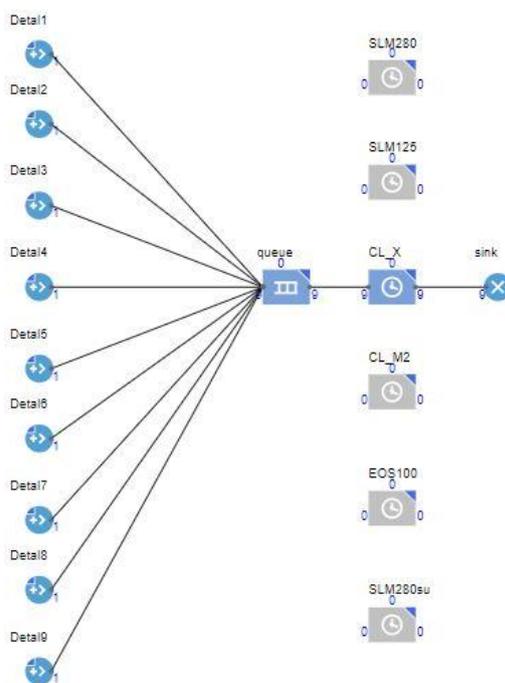


Рисунок 3.5 – Модель загрузки оборудования

Хотя данная модель базируется на легком и актуальном алгоритме выполнения, но не учитывает такие параметры как, качество выполнения, равномерное распределение загрузки, и не учитываются никакие параметры оборудования. Производство выше обозначенных деталей занимает в сумме 13 дней непрерывной работы установки Concept Laser X LINE 2000R и полное отсутствие заказов для выполнения на других установках лабораторий в кооперации.

На рисунке 3.6 изображен график распределения заказов на детали 1-9, выполняемые в порядке приоритетности производства, видно, что производство каждого из заказов, занимает малые по продолжительности отрезки времени, но из-за малой гибкости системы и отсутствия

распределения, учитывающего загрузку оборудования суммарный срок производства, стремится к двум неделям и не отвечает параметрам современного производства.

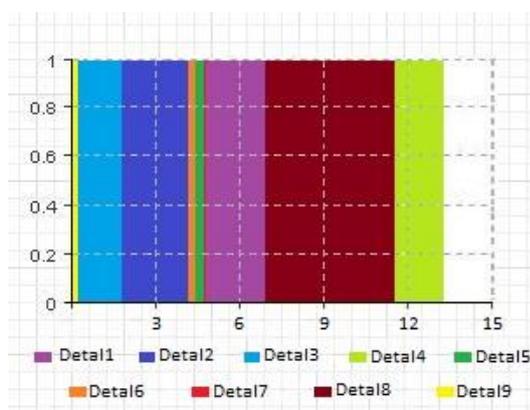


Рисунок 3.6 – График работы Concept Laser X LINE 2000R при загрузке по параметру меньшего времени

На рисунке 3.7 изображена имитационная модель с распределением согласно разработанному алгоритму, который учитывает и ставит в приоритет вероятность успешного изготовления заданных деталей на определенном оборудовании. Исходя из вероятностей, коэффициента приоритета выполнения деталей и с учетом загруженности оборудования производство складывается иным образом.

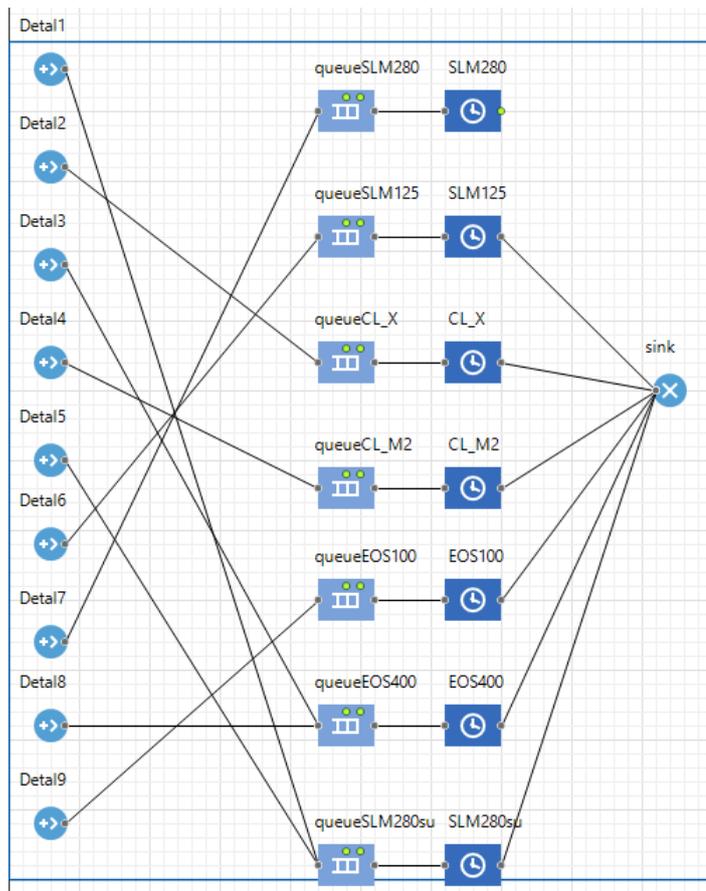


Рисунок 3.7 – Модель загрузки оборудования

На рисунке 3.8 изображена загрузка установки Concept Laser X LINE 2000R при использовании разработанного алгоритма. На данном оборудовании производится деталь 8, имеющая самый долгий срок исполнения, равный четырем дням на данной установке, остальные наименования, так же равномерно распределены по печатным установкам, так что суммарное время печати занимает около пяти дней.

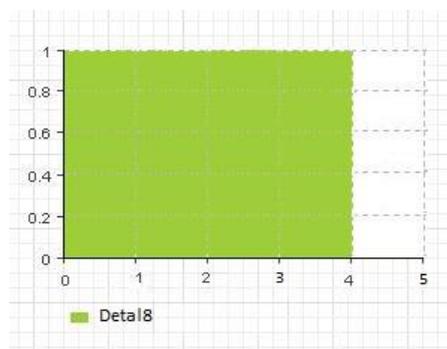


Рисунок 3.8 - График работы Concept Laser X LINE 2000R при загрузке по разработанному алгоритму

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что предложенный алгоритм распределения заказов имеет преимущества перед жадным алгоритмом распределения, так как суммарное время производства сократилось с 13 дней до 4, был учтен коэффициент срочности, при распределении заказов приоритетное значение учитывалось с учетом вероятности успешного изготовления заказа на данном оборудовании. В результате повысилось качество изготавливаемой продукции, заказы распределены по оборудованию более равномерно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня, в условиях технологического перевооружения, большое внимание уделяется аддитивным технологиям и задачам оперативного планирования аддитивного производства, повышающим его эффективность. Методы, основанные на принятии решений, являются основой для создания систем подготовки аддитивного производства, широко внедряющейся на предприятиях различных отраслей: автомобилестроения, авиационной техники, машиностроения и других. Данная работа рассматривает вопросы возможности гибкого планирования аддитивного производства, учитывающее прошлый опыт.

В основной исследовательской части выпускной квалификационной работы предложен способ кооперации производственных лабораторий и центров, расположенных на различных территориях и имеющих возможность выполнять разные задачи аддитивного производства. На основе идеи этой кооперации разработан алгоритм распределения заказов по перечню оборудования с учетом срочности производственной операции и вероятностей успешного изготовления заказа. Рассчитаны значения вероятностей. Для этого разработана система соответствия и оценивания параметров элементов, которые влияют на аддитивное производство. В эту систему в любой момент имеется возможность вносить дополнительные параметры, изменять приоритеты и добавлять производственную номенклатуру.

В заключительной части магистерской работы приведен анализ эффективности разработанного алгоритма, который показал, что затраты по времени сократились в 3 раза, был увеличен средний показатель качества, за счет распределения заказов на основе вероятностей успешного выполнения заказов, наблюдается высокий уровень распределения заказов, благодаря чему «разгружено» наиболее занятое в производстве оборудование.

В ходе работы были получены следующие результаты и сделаны выводы.

1. Предложена схема кооперации лабораторий, благодаря которой возможно расширение рынка заказов и сбыта, за счет большего охвата территории и увеличения качества производимой продукции.
2. Разработан и рассчитан коэффициент срочности, учитывающий продолжительность производства, степень загрузки оборудования, требования заказчиков и сроки сдачи заказа.
3. Разработан алгоритм распределения заказов, формирующий порядок распределение заказов, основываясь на коэффициенте срочности и вероятности успешного изготовления деталей.
4. По теореме Байеса рассчитана вероятность успешного изготовления выбранных деталей на каждой единице оборудования, исходя из соответствия технических параметров оборудования и требований к изготовлению деталей.
5. Благодаря предложенному алгоритму, время производства сократились в 3 раза, увеличен средний показатель качества, повышен уровень распределения заказов, «разгружено» наиболее занятое в производстве оборудование.
6. Построена имитационная модель аддитивного производства деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1 Васильев В.Н. Организация, управление и экономика гибкого интегрированного производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1986.–312с.
- 2 Гибкие производственные комплексы/ Под ред. П.Н. Белянина и В.А. Лещенко. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
- 3 Киселев Г.А. Переналаживаемые технологические процессы в машиностроении. М.: Издательство стандартов, 1980. 272 с.
- 4 Попов В. Имитационное моделирование перевооружения производства / В.Попов, Э.Р. Тимерханова, Е.И. Ярикова. // АВИАГЛОБУС: интернет-журнал. – 2015. URL: <http://aviaglobus.ru/2015/01/26/imitatsyonnoe-modelirovanie-perevooru-zheniya-proizvodstva/>
- 5 Алексенцева О.Н. Разработка моделей и программных средств для оценки рисков промышленных предприятий на основе технологий имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. эконом. наук. – Волгоград, 2007. – 25с.
- 6 <https://www.slm-solutions.com>
- 7 <https://www.eos.info/de>
- 8 <http://www.concept-laser.ru>
- 9 Дмитренко, А.А. Аддитивные технологии как новый этап развития производства деталей машин / А.А. Дмитренко // Современные материалы, техника и технологии. – 2014. – С. 164-167.
- 10 Суфияров, В.Ш. Селективное лазерное плавление жаропрочного никелевого сплава / [В.Ш. Суфияров и др.] // Цветные металлы. – 2015. – №1. – С. 79–84.
- 11 Аристов С.А. Имитационные системы поддержки принятия решений // Экономика и математические методы. – 2007. – Т. 43. – № 3. – С. 74–84.
- 12 Бабина О.И. Обзор имитационных моделей в планировании на предприятии // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-6. – С. 1173-1178; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39751> (дата

обращения: 02.06.2018).

13 Гамидов Г.С., Гераева Н.С. Особенности имитационного моделирования инновационной деятельности предприятий машиностроения // Инновации. Серия: Инновационная экономика. – 2008. – № 7 (117). – С. 74–76.

14 Кууз В.А. Современные системы планирования ресурсов промышленных предприятий как инструмент повышения эффективности их менеджмента // Внешнеэкономический бюллетень. – 2005. – № 5. – С. 39–46.

15 Сорокин А.В. Повышение эффективности управления производственными процессами промышленных предприятий с использованием имитационного моделирования: автореф. дис... канд. эконом. наук. – Барнаул, 2010. – 20 с.

16 Проничев Н.Д. Имитационное моделирование производственной системы механообрабатывающего цеха / Н.Д. Проничев, В.Г. Смелов, В.В. Кокарева, А.Н. Малыхин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - Т. 15. - №6(4). – 2013.

17 Белов А.Г. Методы имитационного моделирования / А.Г. Белов, С.А. Моисеев, А.В. Григорьев // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2014. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-imitatsionnogo-modelirovaniya>

18 Колесникова, О.В. Методика планирования единичного дискретного машиностроительного производства / О.В. Колесникова, В.Е. Лелюхин // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XXXVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2014. – №9(34).

19 Маляренко, И. Планирование и оптимизация / И. Маляренко // Корпоративные системы. – 2006. – № 27. – С. 29-32.

20 Хаймович, И.Н. Рационализация организации производства машиностроительного предприятия на основе реинжиниринга / И.Н. Хаймович, А.И. Хаймович // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2006. – №3. – С.53-58.

21 Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении. Пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ

ФГУП «НАМИ». – 2015. – 220 с.

22 Тарасов, И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития / И.В. Тарасов // Стратегии, бизнес, управление, электронный научно-экономический журнал. – №6 (50). – 2018. – 7 с.

23 Моргунов, Ю.А. Техничко-экономические аспекты аддитивного формообразования / Ю.А. Моргунов, Б.П. Саушкин // Научно-технологические аспекты аддитивного производства. – 2016. – № 7 (61). – С. 28–35.

24 Кузнецов, П.О. Применение аддитивных технологий при реализации инновационного проекта: дисс...магистра инноватики: 27.04.05.01 / Кузнецов П.О. – СПб, 2016. – 74 с.

25 Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад / [И.Г. Дежина и др.]. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 272 с.

26 Амелин, С.В. Организация производства в условиях цифровой экономики / С.В. Амелин, И.В. Щетинина // Организатор производства. – 2018. – №4. – Т. 26. – С. 7–20.

27 Сергеев А. И. Влияние параметров оборудования на показатели эффективности гибких производственных ячеек / А. И. Сергеев // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2006. – № 5-2. –С. 63-65.

28 Фролов М. А. Методы и модели организационной обоснованности гибких производственных систем с учетом вероятностных факторов: дисс. ... канд техн. наук. – Самара, 2018. – 116 с.

29 Трифоненко И.М. Обзор систем сквозного проектирования печатных плат радиоэлектронных средств / И.М. Трифоненко, Н.В. Горячев, И.И. Кочегаров, Н.К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 1. С. 396-399.

30 Сидорович Н.И. Совершенствование оперативно-календарного планирования на промышленных предприятиях / Н.И. Сидорович // наука и инновации. – 2015. – №8 (150). – С. 23-26.

31 Шайхулова А.Ф. Автоматизация и управление инновационными

проектами технического перевооружения авиадвигателестроительного производства на основе каскадного метода оптимизации: дисс. ... канд техн. наук. – Уфа, 2018. - 225 с.

32 Демидова, Л.А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л.А., Демидова, В.В. Кираковский, А.Н. Пылькин. – М.: Горячая линия– Телеком, 2015. – 283 с.

33 Математические модели организаций: учеб. пособие / [А.А. Воронин и др.]. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – С.360.

34 Ефимова, П.Е. Математическая модель распределения заказов в автоматизированной системе технологической подготовки производства на предприятиях авиационной промышленности / П.Е. Ефимова // Научнотехнический журнал ИСиТ. – 2010. – №1/57(584). – С. 82-88.

35 Грачева, К.А. Организация и планирование машиностроительного производства (производственный менеджмент): учебник / [К.А. Грачева и др.]; под ред. Ю.В. Скворцова, Л.А. Некрасова. – М.: Высш. шк., 2003. – 470 с.

36 Антипов Д. В. Особенности организационного развития управления предприятий / Д. В. Антипов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. –2011.- № 3 (17) – С.139-145.

37 Антипов Д. В. Оценка качества проектирования оргструктуры предприятия / Д. В. Антипов, В. В. Щипанов, Айдаров Д. В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. – Вып. 10.– С. 164-171.

38 <https://planetcalc.ru/7683/>

39 Паньшина О.Ю., Селиванов С.Г. Математическое моделирование процесса смены технологических укладов и разработка системы научно-технической подготовки производства // Вестник УГАТУ. 2006. - т.7. №2 (15). – С. 10-20.

40 Формализованное описание работы гибких производственных систем при

создании систем компьютерного моделирования / [А.И. Сердюк и др.] // Научно-технический журнал СТИН. – 2016. – № 7. – С. 12-18.

41 Петрянин Д.Л. Анализ систем защиты информации в базах данных / Д.Л. Петрянин, Н.В. Горячев, Н.К. Юрков // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2013. Т. 1. С. 115-122.

42 Антипов Д. В. Интеграция управления качеством в логистическую деятельность / Д.В. Антипов, Е.Г. Степанова // Вектор науки Тольяттинского гос-ударственного университета. –2012.- № 1 (19) – С. 97-104.

43 Белякова Г.Я., Владимирова О.Н. Формирование инновационной системы как фактор экономической безопасности региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2011. – № 10. – С. 51–56

44 Буйнов А.В. Управление структурой основных фондов на предприятиях строительного комплекса: автореф. дис. канд.эконом. наук.–СПб.,2008.– 16 с.

45 Имитационное моделирование производственных систем/ Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. – 416 с.

46 Клименко А.В. Метод и средства имитационного моделирования вероятностных производственных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Гомель, 2011. – 26 с.

47 Саломатин Н.А., Беляев Г.В., Петроченко В.Ф. Прошлякова Е.В. Имитационное моделирование в оперативном управлении производством. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.

48 Кононюк, А.Е. Основы теории оптимизации. Безусловная оптимизация / А.Е. Кононюк. – Кн. 2. – Ч. 1. – Киев: «Освіта України», 2011. – 544 с.

49 Кузнецова, В.Б. Основные принципы информационного сопровождения изделий машиностроения / В.Б. Кузнецова, А.И. Сергеев, А.И. Сердюк // Вестник машиностроения. – 2016. – № 8. – С. 12-15. 106

50 Медведев В. И. Имитационное моделирование систем и процессов в системе Tecnomatix Plant Simulation //ИММОД-2009. Секция 2. Средства

автоматизации и визуализации имитационного моделирования. – 2009. – С.289-292.

51 Хаймович, И.Н. Разработка принципов построения бизнеспроцессов конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей / И.Н. Хаймович // Фундаментальные исследования. Научный журнал. – 2014. – №9-8. – С. 1709-1714

52 Засканов, В.Г. Система планирования и подготовки аддитивного производства / [В.Г. Засканов и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6. – С. 14-23.

53 Матвеева, Е.А., Макромодель системы управления машиностроительным предприятием с мелкосерийным типом производства / Е.А. Матвеева, Н.В. Дилигенский // Труды VII Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD 13)». – Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, 2013. – С. 309-314.

54 Степанов, П.Л. Метод и эвристический алгоритм оперативнокалендарного планирования производства / П.Л. Степанов, А.М. Ревин, В.З. Ямпольский // Известия Томского ордена трудового Красного Знамени Политехнического института им. С.М. Кирова, 1970. – Т. 211.- С. 75-80.

55 Кокарева, В.В. Имитационное моделирование производственных участков механической обработки виртуального предприятия по производству ГТД в среде Tecnomatix Plant Simulation: учеб. пособие / В.В. Кокарева, К.Т. Саттарова – Изд-во Самарского университета. – 2016. – 50 с.

56 Гордеев, Г.А. Численное моделирование лазерной обработки металлических порошковых материалов методом конечных элементов / Г.А. Гордеев, М.Д. Кривилёв, В.Е. Анкудинов // Вестник Удмуртского университета. – 2014. – Вып. 3. – С. 15–22.

57 Система планирования и подготовки аддитивного производства / В.Г.

Засканов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2018. – Т. 20. – № 6. – С. 14-23.

58 Кузнецова, В.Б. Научное производство: стратегия оптимизации затрат эксплуатанта / [В.Б. Кузнецова и др.] // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 4. – С. 89-93. 98. Эвристические методы календарного планирования / Т.П. Подчасова. – К.: Техника, 1980. – С. 20-25.

59 Кондусов, Д.В. Имитационное моделирование как неотъемлемая часть современного производственного процесса / Д.В. Кондусов, А.И. Сергеев // В сб.: Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2013. – С. 295-300.

60 Бадалова, А.Г. Инновационное развитие промышленного производства: структуризация методологии организации управления / А.Г. Бадалова, Ю.Я. Еленева, А.И. Шебаров // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – Вып. 4(12). – С. 158-163.

61 Ведунов, А.А. Визуальное управление цехом с помощью Technomatrix Plant Simulation / А.А. Ведунов, В.В. Кокарева, В.Д. Фомина // X Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах». – 2016. – С. 121-123.

62 Паньшина О.Ю. Разработка системы научно-технологической подготовки машиностроительного производства в условиях смены технологических укладов/ О.Ю. Паньшина, С.Г. Селиванов // Вестник УГАТУ. -2008.-т. 10, №1(26).-С. 131-142.

- 58 Кузнецова, В.Б. Научное производство: стратегия оптимизации затрат эксплуатанта / [В.Б. Кузнецова и др.] // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2016. – № 4. – С. 89-93. 98. Эвристические методы календарного планирования / Т.П. Подчасова. – К.: Техника, 1980. – С. 20-25.
- 59 Кондусов, Д.В. Имитационное моделирование как неотъемлемая часть современного производственного процесса / Д.В. Кондусов, А.И. Сергеев // В сб.: Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии. Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Оренбургский государственный университет. – 2013. – С. 295-300.
- 60 Бадалова, А.Г. Инновационное развитие промышленного производства: структуризация методологии организации управления / А.Г. Бадалова, Ю.Я. Еленева, А.И. Шебаров // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – Вып. 4(12). – С. 158-163.
- 61 Ведунов, А.А. Визуальное управление цехом с помощью *Technomatix Plant Simulation* / А.А. Ведунов, В.В. Кокарева, В.Д. Фомина // X Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах». – 2016. – С. 121-123.
- 62 Паньшина О.Ю. Разработка системы научно-технологической подготовки машиностроительного производства в условиях смены технологических укладов/ О.Ю. Паньшина, С.Г. Селиванов // Вестник УГАТУ. -2008.-т. 10, №1(26).-С. 131-142.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Параметры детали 2					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
20	31850	да	35	0,25	3

Параметры детали 3					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
26	19000	да	30	0,25	3

Параметры детали 4					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
26	27950	да	25	0,3	3

Параметры детали 5					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
20	11000	да	35	0,4	3

Параметры детали 6					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
30	5600	да	30	0,3	2

Параметры детали 7					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
45	3600	да	20	0,2	2

Параметры детали 8					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
10	87500	да	30	0,25	2

Параметры детали 9					
Размер партии, шт	Площадь занимаемой поверхности, мм ²	Необходимость постобработки	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стенки, мм	Требования к квалификации сотрудника (опыт), лет
N	S	Pr	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	Q
100	2800	да	20	0,2	3

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Вспомогательные таблицы

Вспомогательная таблица детали 2		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	τ
2	47	19,6
0	879	#ДЕЛ/0!
1	56	46,7
10	26	2,2
5	26	4,4
0	72	#ДЕЛ/0!
2	47	19,6

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	5	3	4	4	2	0,72
SLM 125	5	4	#ДЕЛ/0!	4	2	#ДЕЛ/0!
Concept Laser M2	5	3	2	4	3	0,72
Concept Laser X LINE 2000R	4	4	5	4	3	0,78
EOS M 400	2	3	5	4	5	0,68
EOS M 100	2	4	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!
SLM 280 (SU)	5	3	4	3	4	0,78

Вспомогательная таблица детали 3		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	T
4	42	11,4
0	85	#ДЕЛ/0!
3	52	18,8
16	22	1,5
8	22	3
0	64	#ДЕЛ/0!
4	42	11,4

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	4	3	4	4	2	0,66
SLM 125	4	4	#ДЕЛ/0!	4	2	#ДЕЛ/0!
Concept Laser M2	4	3	4	4	3	0,7
Concept Laser X LINE 2000R	3	2	5	4	3	0,6
EOS M 400	1	3	5	4	5	0,62
EOS M 100	1	4	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!
SLM 280 (SU)	4	3	4	3	4	0,72

Вспомогательная таблица детали 4		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	τ
2	46	25
0	88	#ДЕЛ/0!
2	55	29,8
11	26	2,6
5	24	5,2
0	67	#ДЕЛ/0!
2	46	25

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	4	4	4	4	2	0,72
SLM 125	4	5	#ДЕЛ/0!	4	2	#ДЕЛ/0!
Concept Laser M2	4	4	4	4	3	0,76
Concept Laser X LINE 2000R	2	3	5	5	3	0,62
EOS M 400	0	4	5	4	5	0,62
EOS M 100	0	5	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!
SLM 280 (SU)	4	4	4	3	2	0,7

Вспомогательная таблица детали 5		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	τ
7	15	1,8
1	33	27,5
5	36	6
29	7	0,3
14	9	0,6
0	23	#ДЕЛ/0!
7	15	1,8

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	5	5	5	4	2	0,86
SLM 125	5	5	4	5	2	0,86
Concept Laser M2	5	5	5	4	3	0,9
Concept Laser X LINE 2000R	4	4	5	4	3	0,78
EOS M 400	2	5	5	4	5	0,8
EOS M 100	2	5	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!
SLM 280 (SU)	5	5	5	3	4	0,92

Вспомогательная таблица детали б		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	τ
14	11	1
2	24	15
11	28	3,2
57	5	0,2
28	6	0,3
1	20	25
14	11	1

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	4	4	5	4	3	0,78
SLM 125	4	5	4	4	3	0,82
Concept Laser M2	4	4	5	4	4	0,82
Concept Laser X LINE 2000R	3	3	5	4	4	0,7
EOS M 400	1	4	5	4	5	0,68
EOS M 100	1	5	4	4	5	0,72
SLM 280 (SU)	4	4	5	2	5	0,82

Вспомогательная таблица детали 7		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	T
21	5	0,5
4	13	6,1
17	17	1,9
88	2	0,1
44	3	0,2
2	10	9,4
21	5	0,5

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	3	2	5	4	3	0,6
SLM 125	3	4	5	5	3	0,74
Concept Laser M2	3	2	5	4	4	0,64
Concept Laser X LINE 2000R	1	1	5	4	4	0,46
EOS M 400	0	2	5	4	5	0,5
EOS M 100	0	4	5	4	5	0,62
SLM 280 (SU)	3	2	5	4	2	0,56

Вспомогательная таблица детали 8		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	T
0	60	#ДЕЛ/0!
0	128	#ДЕЛ/0!
0	145	#ДЕЛ/0!
3	27	3,8
1	32	13,4
0	150	#ДЕЛ/0!
0	60	#ДЕЛ/0!

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	5	3	#ДЕЛ/0!	4	3	#ДЕЛ/0!
SLM 125	5	5	#ДЕЛ/0!	4	3	#ДЕЛ/0!
Concept Laser M2	4	3	#ДЕЛ/0!	4	4	#ДЕЛ/0!
Concept Laser X LINE 2000R	3	1	5	4	4	0,58
EOS M 400	1	3	4	4	5	0,6
EOS M 100	1	5	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!
SLM 280 (SU)	5	3	#ДЕЛ/0!	4	5	#ДЕЛ/0!

Вспомогательная таблица детали 9		
Возможное кол-во дет. на платформе, шт	Время печати 1 дет, час	Продолжительность печати партии, дней
n	t	τ
28	6	0,9
5	12	10
22	15	2,9
114	3	0,2
57	3	0,3
2	9	18,8
28	6	0,9

	Минимальная толщина слоя, мкм	Минимальная толщина стнеки	Продолжительность производства	Возможность постобработки после печати	Опыт сотрудника	Условная вероятность
Обозначение	Min толщ. сл.	Min толщ. ст.	T пр.	Pr	Q	Pij
Параметр важности, A	0,06	0,06	0,02	0,02	0,04	
SLM 280	3	2	5	4	2	0,56
SLM 125	3	4	5	5	2	0,7
Concept Laser M2	3	2	5	4	3	0,6
Concept Laser X LINE 2000R	1	1	5	4	3	0,42
EOS M 400	0	2	5	4	5	0,5
EOS M 100	0	4	4	4	5	0,6
SLM 280 (SU)	3	2	5	4	4	0,64

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Concept Laser M2

Апостериорные вероятности		
Апостериорная вероятность	Значение	Описание
P(B1/G)	0.89	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/Y)	0.89	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/K)	0.88	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/L)	0.90	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/M)	0.96	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/C)	0.93	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/X)	0.84	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/W)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/V)	0.82	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/G)	0.11	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'

Concept Laser X LINE 2000R

Апостериорные вероятности		
Апостериорная вероятность	Значение	Описание
P(B1/G)	0.85	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/Y)	0.91	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/K)	0.82	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/L)	0.83	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/M)	0.91	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/C)	0.88	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/X)	0.72	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/W)	0.81	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/V)	0.68	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/G)	0.15	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'

EOS M 100

Апостериорные вероятности

Апостериорная вероятность	Значение	Описание
P(B1/G)	0.89	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/Y)	0.89	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/K)	0.87	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/L)	0.87	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/M)	0.94	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/C)	0.89	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/X)	0.8	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/W)	0.86	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/V)	0.8	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/G)	0.11	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'

EOS M 400

Апостериорные вероятности

Апостериорная вероятность	Значение	Описание
P(B1/G)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/Y)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/K)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/L)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/M)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/C)	0.91	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/X)	0.88	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/W)	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B1/V)	0.86	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
P(B2/G)	1	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'

SLM 125

Апостериорные вероятности

Апостериорная вероятность	Значение	Описание
$P(B1/G)$	0.83	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/Y)$	0.83	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/K)$	0.78	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/L)$	0.83	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/M)$	0.92	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/C)$	0.87	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/X)$	0.74	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/W)$	0	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B1/V)$	0.70	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'
$P(B2/G)$	0.17	Вероятность события 'undefined' если произошло событие 'undefined'