Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

На правах рукописи

Кузина Светлана Михайловна

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.02.22 - «Организация производства (машиностроение)»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Галкин Виктор Иванович

Москва – 2019

Содержание

Стр.

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИНСТРУМЕНТОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ 9

1.1. Современное состояние промышленности в области применения информационных технологий и систем поддержки принятия управленческих решений 12

1.2. Имитационное моделирование 22

1.3. Бережливое производство как методика управления предприятием 35

1.4. Проведение оптимизационного эксперимента 44

1.5. Методы планирования эксперимента 46

1.6. Выводы по Главе 1 50

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 53

2.1. Методика IDEF0 53

2.2. Методика построения имитационных моделей. 56

2.3. Методика построения многоуровневой имитационной модели 58

2.4. Проведение оптимизационного эксперимента в программе имитационного моделирования 60

2.5. Обработка результатов оптимизационного эксперимента 61

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА НА ПРИНЦИПАХ КОНЦЕПЦИИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА 69

3.1. Построение функциональной модели сборочного производства нескольких видов продукции 72

Стр.

3.2. Построение имитационной модели 76
3.3. Верификация построенной математической модели производственного процесса 90
3.4. Разработка критериальных выражений, отражающих принципы концепции бережливого производства 98
3.5. Выводы по Главе 3 119
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 123
4.1. Дисперсионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента 126
4.2. Регрессионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента для начальной стадии производства 129
4.3. Дисперсионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента для основной стадии производства 133
4.4. Регрессионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента для основной стадии производства 136
4.5. Разработка элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений 139
4.6. Рекомендации по построению элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений. 142
4.7. Применение результатов работы в ООО «ПАКС» и в учебном процессе Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» 144
4.8. Выводы по Главе 4 145
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ 149
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности машиностроительного предприятия является необходимым условиям его успешной деятельности и дальнейшего развития. Фундаментом для экономических показателей результатов работы выступает этап подготовки производства. Именно в процессе подготовки производства определяется эффективность выполнения работ, закладываются основные технические параметры и экономические показатели предприятия, анализируются варианты организации производства, принимаются окончательные решения по объемам выпускаемой продукции и необходимому количеству оборудования. В случае возникновения ошибок в планировании производства на этапе подготовки предприятие не сможет обеспечить выполнение требований к ключевым показателям. При этом после перехода на выпуск серийной продукции устранение большого количества «узких мест» является сложной и дорогостоящей задачей.

Многие машиностроительные предприятия в России в настоящее время внедряют концепцию бережливого производства. Необходимо отметить, что перестроить функционирующее предприятие довольно сложно. Для достижения наибольшего эффекта основные критерии и принципы концепции должны закладываться на этапе подготовки производства.

В целях планирования и анализа результатов деятельности машиностроительного предприятия используют автоматизированные инструменты поддержки принятия управленческих решений. Однако существующие системы работают на основе статистических данных, что не удовлетворяет условиям этапа подготовки производства. Для эффективного управления подготовкой производства предприятиям необходим инструмент, позволяющий определить перспективы развития на основе расчетных данных.

Таким образом, разработка инструментов планирования процессов на основе расчетных данных является важной задачей для этапа подготовки производства. Его реализация возможна с помощью имитационного моделирования, которое позволяет рассматривать производство с позиций системы массового обслуживания, получать объективные расчетные данные с высокой точностью для оценки и прогноза параметров.

Степень разработанности темы исследования. Современные научные труды зарубежных и отечественных ученых содержат теоретические и методологические разработки, охватывающие важные аспекты исследуемой области. Задачи организации производства и проектирования производственных процессов на основе бережливого производства рассмотрели Вумек Д.П., Джексон Т., Имаи М., Ишикава, Вэйдер М. И, Адлер Ю.П., Баев Г.О., Фалько С. Г., Рыжикова Т. Н., Омельченко И. Н., Ларионов В.Г., Дроговоз П.А., Васильев В.А. и др. В области математического и имитационного моделирования производства большой вклад внесли: Орлов А.И, Цырков А.В., Захаров М.Н. и др.

Цель настоящей работы заключается в разработке инструментов планирования процессов подготовки производства для достижения эффекта от применения концепции бережливого производства с помощью комбинирования подходов имитационного моделирования.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Анализ существующих методов и проблем планирования подготовки производства.
2. Построение функциональной и комбинированной имитационной моделей производственного процесса.
3. Обоснование системы критериальных выражений на основе бережливого производства, устанавливающей многофункциональные зависимости между параметрами производственного процесса.
4. Разработка имитационной модели управления ресурсами предприятия.

5. Разработка инструмента управления длительностью ожидания продукции незавершенного производства.

6. Разработка элемента системы поддержки принятия управленческих решений для определения рационального количества оборудования производственного предприятия.

Научная новизна исследования:

1. Построена комбинированная имитационная модель для планирования процессов подготовки производства.

2. Обоснована система критериальных выражений, в отличие от существующих позволяющая на этапе подготовки производства минимизировать основные виды потерь, определенные концепцией бережливого производства. Совмещение предложенных критериальных выражений в разработанной комбинированной имитационной модели позволило получить многофункциональные зависимости рационального количества рабочих мест от программы выпуска изделий.

3. Предложена и разработана имитационная модель управления ресурсами предприятия на основе ПИ-регулятора, ранее применяемого в теории автоматического управления.

4. Предложены модели и инструменты планирования процессов подготовки производства, позволяющие определить оптимальное количество оборудования производственного предприятия с учетом достигнутого эффекта от бережливого производства с помощью комбинированного имитационного моделирования.

Объект исследования: системы поддержки принятия управленческих решений машиностроительных предприятий на этапе подготовки производства.

Предмет исследований: комбинированное имитационное моделирование для оптимизации производственных процессов и достижения эффекта от концепции бережливого производства.

Область исследования. Основные положения диссертации соответствуют паспорту специальности научных работников 05.02.22 –

Организация производства (машиностроение) и охватывает следующие области исследования, предусмотренные паспортом:

П.1 Разработка научных, методологических и системотехнических основ проектирования организационных структур предприятий и организации производственных процессов. Стратегия развития и планирования организационных структур и производственных процессов.

П.2 Разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов и инвестиций в организацию производственных процессов.

П.4 Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов.

П.5 Разработка научных, методологических и системотехнических принципов повышения эффективности функционирования и качества организации производственных систем. Повышение качества и конкурентоспособности продукции, системы контроля качества и сертификации продукции. Системы качества и экологичности предприятий.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенные в диссертационной работе инструменты позволят машиностроительным предприятиям на этапе подготовки производства планировать количество требуемого оборудования, размер запасов для различной программы выпуска изделий, а также выявлять «узкие места» процессов, что обеспечит достижение эффекта от концепции бережливого производства. Применение основных положений работы, состоящих из комбинации инструментов, ранее используемых в разных областях науки, позволяет обеспечить управление ресурсами предприятия и сократить длительность ожидания продукции незавершенного производства.

Достоверность результатов исследования подтверждается тем, что все расчеты и эксперименты проведены в ранее разработанных и апробированных информационных системах. В целях оценки достоверности результатов,

получаемых в разработанной имитационной модели, проведена верификация, которая подтвердила адекватность разработанной модели.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлены на Всероссийских научно-практических конференциях «Применение ИПИ-технологий в производстве». Москва, 2012, 2013; на международных молодёжных научных конференциях «Гагаринские чтения». Москва, 2012, 2016 – 2018; на Шестнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством». Москва, 2017.

Результаты диссертационного исследования внедрены в ООО «ПАКС» и успешно используются в учебном процессе «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)». Реализация результатов диссертационной работы подтверждена соответствующими актами внедрения.

Основные положения диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе в 3 статьях в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ. Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и списка литературы, включающего 108 наименований. Материал работы изложен на 163 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 21 таблицу.

Работа выполнена на кафедре технологий и систем автоматизированного проектирования металлургических процессов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Автор выражает благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Галкину Виктору Ивановичу, директору департамента анализа, планирования и контроля закупок АО «ГСС» Шутенко Александру Александровичу и сотрудникам кафедры за неоценимую поддержку и помощь в выполнении работы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИНСТРУМЕНТОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

На первой стадии жизненного цикла предприятия важно правильно рассматривать все приоритетные вопросы, определяющие гибкость производства. На этапе подготовки производства необходимо заложить концепцию управления производственным процессом, количество оборудования, начальную программу производства, определить сроки окупаемости.

Проектирование и запуск нового производственного предприятия или продукции заключается в совокупности мероприятий, которые в дальнейшем обеспечат изготовление конкурентоспособной продукции. Технологическая подготовка производства (ТПП) и оперативно-календарное планирование представляют собой комплекс взаимосвязанных работ и исследований, которые обеспечат технологическую готовность предприятия выпускать новую конкурентоспособную продукцию, соответствующую всем предъявляемым требованиям [1, 95, 107].

ТПП включает в себя широкий круг вопросов:

1. Разработка технологических процессов производства изделий.
2. Проектирование оснастки, необходимой для производства изделий.
3. Определение необходимого количества оборудования.
4. Определение методик управления ресурсами и т.д.

Единый системный подход к ТПП для всех типов производственных предприятий формируют стандарты единой системы технологической подготовки производства [2].

Проведение исследований на стадии подготовки производства – это один из самых ответственных этапов, который требует больших затрат. На стадии ТПП необходимо выбрать из нескольких альтернативных наиболее

оптимальный технологический процесс, а также определить необходимое количество ресурсов. В серийном производстве сборочного типа оценка технологических процессов должна проводиться с учетом разных вариантов смены номенклатуры и потребностей рынка.

ТПП тесно связана с оперативно-календарным планированием [3-6], т.к. оно позволяет организовать слаженность и непрерывность производственного процесса, координировать выполнение работ с целью своевременного выполнения производственной программы.

Оперативно-календарное планирование – это детализация по срокам всех видов работ на производстве. Оно бывает двух типов:

1. Внутрицеховое оперативное планирование – организация выполнения сменно-суточных заданий, использование календарных планов-графиков на производственных участках.

2. Межцеховое оперативное планирование – организация взаимосвязанных производственных работ, согласованное выполнение общезаводской производственной программы всеми основными цехами.

Одной из основных функций оперативно-календарного планирования является диспетчирование. Оно представляет собой непрерывный контроль за ходом производственного процесса на основе оперативно поступающей информации о выполнении цеховых планов и появлении отклонений от нормативов. Это позволяет своевременно устранять отклонения и корректировать графики производства.

Важно отметить, что оперативно-календарное планирование производственного процесса практически невозможно на стадии проектирования предприятия из-за отсутствия точных данных об оборудовании, циклах производства и т.д.

Основными документами ТПП и оперативно-календарного планирования являются маршрутные карты технологического процесса. Они содержат описание всего технологического процесса, переходы производимой продукции

по всем операциям и цехам в установленной последовательности с указанием различных нормативов.

Сборка является заключительным этапом производства сложных изделий. Ее эффективность зависит от синхронизации изготовления и поставки входящих в состав изделия узлов или деталей. Важно отметить, что в современных условиях рыночной экономики трудно заранее спрогнозировать спрос на продукцию и спланировать график производства [7, 104, 105]. При непостоянном спросе на продукцию на производственных предприятиях сборочного типа возникают проблемы эффективного управления для обеспечения выполнения плана выпуска изделий по конкурентоспособным ценам. Рост спроса и потребность в изменении комплектации изделий приводят предприятия к необходимости увеличения производственных мощностей, объемов складских запасов и росту количества продукции незавершенного производства. При снижении спроса закупленное оборудование простаивает, материалы и комплектующие «замораживают» значительную часть финансов на складе и превращаются в неликвидные запасы.

Для предотвращения этих и многих других проблем важно еще на этапе проекта предусмотреть все возможные пути развития предприятия, а также определить доступный инструментарий, который позволит на протяжении всего жизненного цикла реагировать на изменения рынка и оптимизировать деятельность предприятия. На рынке информационных технологий представлен широкий ассортимент программного обеспечения, которое способно решать различные задачи, стоящие перед руководством компании. Одним из распространенных направлений программных средств являются системы поддержки принятия управленческих решений, которые работают на основе накопленных с помощью различных систем опытных данных.

На стадии подготовки производства большинство компаний внедряет лишь инструменты конструкторского и технологического проектирования, пренебрегая системами поддержки принятия управленческих решений. Это связано с тем, что на начальном этапе предприятия еще не обладают всей

необходимой информацией, которая в дальнейшем будет использоваться для планирования производства и принятия решений. Однако наличие такой системы способно значительно повысить эффективность проводимых мероприятий на стадии проектирования предприятия.

1.1. Современное состояние промышленности в области применения информационных технологий и систем поддержки принятия управленческих решений

Необходимость использования математических методов в организации производства отмечена еще в 1920-е годы. В 1923-1924 гг. В.В. Леонтьевым (под руководством П.И. Попова) разработана первая межотраслевая балансовая модель народного хозяйства СССР. Позже, в 1939 году Л.В. Канторович опубликовал свою работу «Математические методы организации и планирования производства» [8], которая в 1975г. принесла ему Нобелевскую премию. Его работа посвящена методу линейного программирования и его применению для решения различных задач, таких как оптимизация плана перевозок, распределение обработки деталей по станкам и организация производства с обеспечением максимального выполнения плана.

Большое развитие и применение математические методы получили с развитием информационных технологий, благодаря совершенствованию электронно-вычислительных машин, способных обрабатывать большие объемы информации, необходимые для решения различных производственных задач. В наше время конструкторы и технологи могут производить все необходимые расчеты, а также хранить документацию с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР) [9, 10].

В рамках развития САПР существенную роль сыграло создание единого информационного пространства (ЕИП) или интегрированной информационной среды, которая охватывает все стадии ЖЦ изделия. Такая идея получила название CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и ЖЦ) [11].

CALS-технологии, также как и другие современные тенденции, позволяют совершенствовать процесс ЖЦ изделия, повышать его качество, уменьшать затраты и сроки выполнения, что удовлетворяет всех участников цикла. По этой причине методологию CALS используют все развитые страны: Россия, США, Германия, Великобритания и др. [11]

Суть CALS-технологий состоит в том, что они создают информационную поддержку изделия на всех стадиях его ЖЦ, обеспечивают управление процессами и устанавливают взаимодействия между всеми заинтересованными в этом лицами. Вся информация на этапе производства и его подготовки формируется, хранится и передается с помощью программных средств, которыми являются CAD/CAM/CAE/PDM/ERP и др.

Основные показатели экономической эффективности работы предприятий, использующих CAD/CAM/CAE/PDM/ERP это:

1. Сокращение затрат на производство.
2. Сокращение сроков выполнения работ.
3. Минимизация количества бракованных изделий.
4. Уменьшение затрат на обслуживание, эксплуатацию и ремонт изделий.

И, как следствие, применение данной технологии ведет к снижению себестоимости при значительном повышении качества изделия, что очень важно в современной рыночной экономике.

CAD/CAM/CAE/PDM-системы предназначены для автоматизации разработки и подготовки производства изделия. CAD используется для компьютерного конструирования, CAM - для технологической подготовки производства, CAE способствует инженерному анализу, а PDM-системы созданы для управления данными ЖЦ изделия.

Большим достижением в 1970-х годах стало применение метода планирования материальных потребностей (Materials Requirements Planning – MRP). Данный метод способен объединить все процессы, участвующие в производстве сложной продукции в одной компьютерной программе. В

условиях изменения спроса на продукцию это дает возможность наиболее точно планировать потребности в материалах и комплектующих, основываясь на данных о составе производимых изделий и объемах складских запасов [12].

Суть метода состоит в минимизации издержек на запасы предприятия. С помощью него реализуются принципы концепции бережливого производства, такие как «точно вовремя» и KanBan, т.к. основной идеей является наличие всех материалов и комплектующих на производстве в нужное время и в нужном количестве [13]. Эти инструменты стали основой появившихся MRP-систем.

MRP-система позволяет специалистам планировать все протекающие процессы, обрабатывая данные о наличии материалов и комплектующих на складе, а также соотнося эту информацию с потребностями производства во временной шкале. С помощью программы происходит отслеживание маршрутов движения материалов, а затем разрабатывается план очередных заказов поставщикам. Также система информирует о возможных ошибках, которые могут быть вызваны некорректной входящей информацией. Определение возможных узких мест необходимо для определения проблем, которые могут возникнуть вследствие непредвиденных обстоятельств. Графически работа MRP-системы представлена на Рисунке 1.1 [14-15].

Рисунок 1.1. Схема работы MRP-системы

В целях повышения эффективности производства MRP-системы дополнили новыми функциями. Более развитой версией системы MRP является MRP II, которая направлена на эффективное планирование всех ресурсов предприятия. Кроме возможностей первоначальной версии, MRP II позволяет планировать и регулировать ход всего цикла производства от закупки материалов и комплектующих до передачи готовой продукции заказчику. Новая система способна составлять производственные программы и контролировать их [16, 17].

Необходимость оптимизации количества рабочих мест обуславливает добавление к базовым функциям систем MRP II модуля, направленного на планирование потребности в мощностях (Capacity Requirements Planning - CRP) [18]. Он направлен на повышение эффективности использования производственных мощностей. С помощью CRP планируют оптимальную загрузку рабочих мест по всем типам продукции, включенным в план производства. Для каждого рабочего места рассчитывается плановый показатель загрузки с учетом всех возможных ограничений. Функция позволяет визуализировать программу загрузки оборудования и определить наиболее и наименее загруженные участки. При этом модуль не оптимизирует загрузку производственных мощностей автоматически, решение по оптимизации принимают сотрудники предприятия. Результатом использования модуля CRP является соответствующая реальным возможностям загрузки производственных мощностей производственная программа.

Работа CRP заключается в обработке трех массивов основных исходных данных:

1. Календарное планирование производства, в том числе и результат основных расчетов MRP.

2. Предварительное формирование графиков работ рабочих мест для вычисления максимальной производственной мощности.

3. Маршрутные карты изготовления продукции, позволяющие сформировать план загрузки рабочих мест.

После обработки данных, система дает сигналы при расхождении между планируемой и фактической загрузкой оборудования, на основании которых специалисты принимают необходимые инженерные решения. Для каждого изготавливаемого изделия определяется технологический маршрут с подробным описанием требуемых ресурсов для каждой операции.

Третьим этапом развития метода MRP является направление ERP-систем (Enterprise Resource Planning System), которые позволяют планировать потребности предприятия при производстве различных типов продукции, на географически удаленных площадках, формирование планов в денежном выражении. Основной целью ERP-систем является создание единой среды для автоматизации планирования и анализа основных процессов производства. Важной является возможность интеграции ERP-систем с используемыми на предприятии CAD/CAM/CAE-системами. Интеграция всех систем происходит на базе PDM.

Основным преимуществом ERP-систем по сравнению с MRPII является их универсальность. Системы могут одинаково эффективно использоваться как на производственных предприятиях, так и других сферах: образовательная, банковская, продажи и т.д. Специфика работы предприятия не играет важной роли для ERP-системы. Она способна подстроиться под любую задачу. При этом набор модулей для каждой сферы будет свой. ERP-система создает инфраструктуру для консолидации всех ключевых данных на предприятии: планирование производства и закупок, прогнозирование продаж, управление финансами и т.д.

Для управления производством и оптимизации ресурсов крупные компании используют ERP-системы. Основой ERP-систем является единая база данных для всех подразделений. Это платформа для принятия различных управленческих решений, обеспечивающая планирование и консолидацию информации. В связи с этим у предприятия не возникает проблем по сведению всей информации в единое целое для грамотного планирования работы [19].

Внедрение автоматизированных систем планирования деятельности крупных и средних компаний приводит к целому ряду преимуществ:

1. Создание единой согласованной всеми подразделениями базы данных.
2. Управление себестоимостью продукции.
3. Регулирование объемов производства.
4. Точная оценка возможностей производственных мощностей предприятия.
5. Сокращение затрат времени на согласование документации.
6. Своевременные поставки материалов и покупных комплектующих изделий и т.д.

ERP-системы в основном служат для обработки большого объема административно-хозяйственной и учетно-финансовой информации. Для оптимизации и повышения рентабельности производства служат MES (Manufacturing Execution System) – системы [20, 21]. Это автоматизированная система управления производством, которая направлена на оптимизацию процессов в режиме реального времени. За счет того, что MES-системы содержат исключительное производственную информацию, они способны корректировать маршрутную карту процесса неограниченное количество раз. ERP-системы могут обновлять эту информацию один раз в день.

MES-системы позволяют формировать данные о производстве, рассчитывать реальную себестоимость продукции. Полученные данные необходимы для более точной работы ERP-систем. На российском рынке представлено несколько систем управления производством, такие как 1С:ERP Управление предприятием 2, LOGOS, Фобос, YSB.Enterprise.MES, PolyPlan [22, 23].

Особенностью систем управления производством, а также автоматизированных систем технологической подготовки производства, является то, что они работают под управлением реляционных баз данных [24,25]. Их информационная модель представляет собой систему таблиц базы

данных, которые содержат различные взаимосвязанные данные. Программные продукты, функционирующие на основе реляционных баз данных, являются основой для большинства систем поддержки принятия управленческих решений.

Выделяют три основных уровня систем управления [26]:

1. Оперативный уровень реализует выполнение основной массы текущих операций. Основная задача – реализация решений по устранению всех видов потерь организации.

2. Тактический уровень ориентирован на автоматизированную обработку данных. Приоритетной задачей уровня является создание потенциала для развития компании и плана реализации заказов.

3. Стратегический уровень служит для принятия управленческих решений на высшем уровне руководства предприятия. Основной целью уровня является определение приоритетов и перспективных направлений развития организации.

Для функционирования всех уровней управления существуют различные информационные технологии.

TPS (Transaction Processing Systems) – транзакционные технологии. Необходимы на оперативном уровне для обработки новой информации.

MIS (Management Information Systems) – технологии поддержки управленческих функций. Применяются на тактическом уровне управления для планирования, учета и контроля выполнения установленного плана производства и сбыта продукции.

DSS (Decision Support Systems) – системы поддержи принятия решений. Применяются на тактическом уровне для формирования управленческих решений [27-30].

ESS (Executive Support Systems) – технологии интеллектуальной обработки данных. Применяются на стратегическом уровне при возникновении задач с нечеткими характеристиками и с неявной структурой.

В настоящее время наряду с крупными предприятиями в производственной сфере развивается малый и средний бизнес. За счет больших финансовых возможностей, крупные компании имеют качественный, грамотно отлаженный инструментарий принятия управленческих решений. Из-за отсутствия такого инструментария малым и средним предприятиям сложно конкурировать с крупными на фоне изменений потребностей рынка.

На этапе подготовки производства требуется спроектировать рабочие места, спланировать объем производства и потребность в ресурсах. Поэтому, независимо от масштаба компании и типа производства, на стадии проектирования важно определить уровень управления процессом.

Для малых и средних предприятий основополагающими являются оперативный и тактический уровни управления. В силу этого возрастает потребность в DSS-технологиях.

В DSS входят [28, 31]:

1. OLAP – технология (Online Analytic Processing) – технология многомерного анализа и оперативной обработки данных.

2. Data Warehouse – предметно-ориентированная информационная база данных.

DSS представляет собой систему поиска решений, содержащую в себе инструменты ввода, хранения и обработки данных. Ввод данных может быть произведен вручную или автоматически. Основная цель внедрения DSS на предприятии – обеспечение управленческого звена компании инструментом для выполнения обработки и анализа данных. Система не генерирует управленческие решения, а позволяет собрать всю информацию в необходимом формате для возможности изучения. Таким образом, происходит обеспечение принятия решений [32].

Схема работы DSS представлена на Рисунке 1.2 [33].

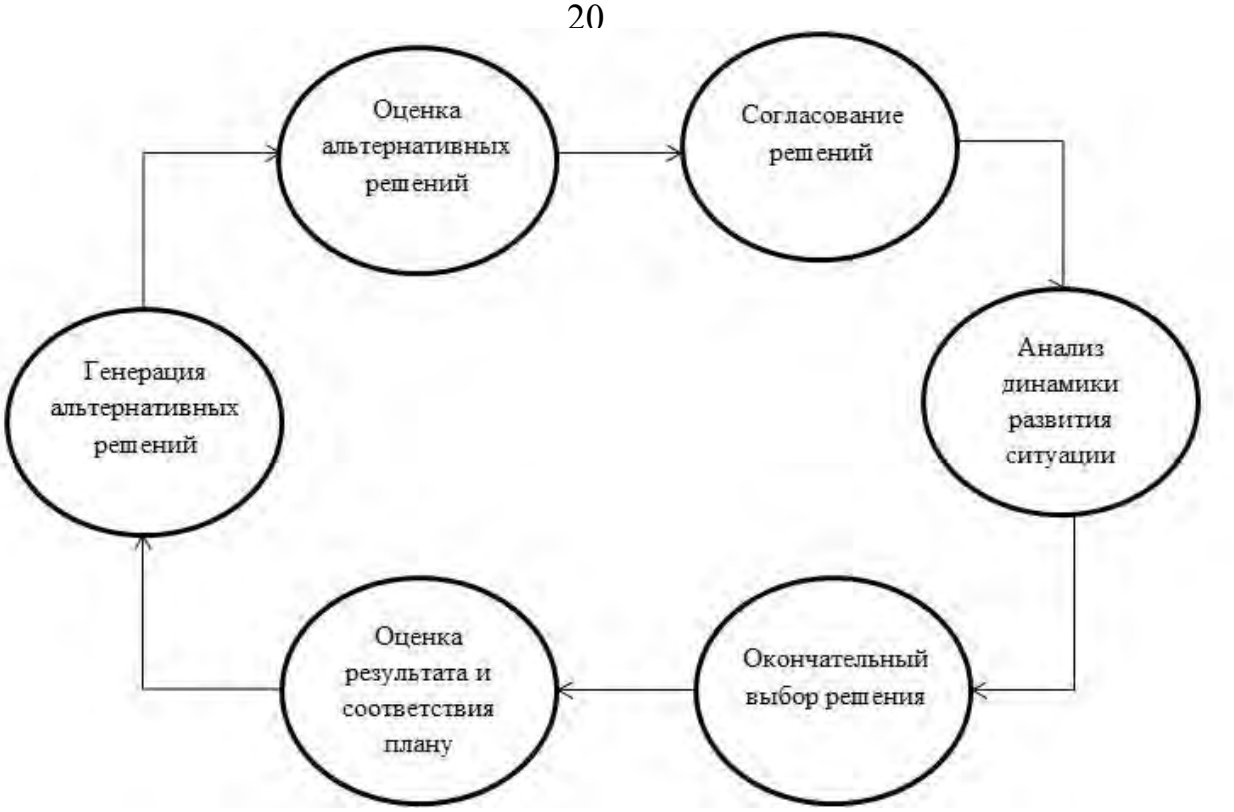


Рисунок 1.2. Схема функционирования DSS

Функционирование DSS происходит по циклическому принципу и начинается с генерации альтернативных решений. После проведения оценки полученного результата, в случае неудовлетворения соответствия плану, процесс может быть запущен сначала.

Необходимость внедрения DSS обусловлена следующими факторами:

1. Высокая конкуренция на рынке, давление со стороны крупных компаний, способных снизить цены на продукцию.

2. Необходимость оперативного реагирования и планирования производства при изменении спроса.

3. Необходимость в оперативной оценке совершаемых действий и принятых управленческих решений.

4. Необходимость получения различной актуальной информации в удобной форме для принятия решений.

Для внедрения DSS на производственном предприятии требуется определить ключевые показатели эффективности работы, а также влияющие на них внешние и внутренние факторы. Кроме того, компании используют разнородные источники первичной информации. Поэтому для достижения

лучшего результата используется индивидуальный подход к разработке системы под конкретное предприятие [34].

ESS являются интеллектуальными системами прогнозирования, служат для принятия решений на стратегическом уровне управления, обеспечивают анализ внешней информации и упорядочивают статистические данные [35]. ESS стоят относительно дешево, но обычно представляют собой модуль для ERP-системы, которая в свою очередь стоит довольно дорого.

ESS-системы направлены на обобщение информации и ее оперативную обработку для оценки возможных ситуаций. Аналитические возможности этого типа систем используют для построения простых моделей, которые возможно применять для предварительного анализа ситуации на стадии планирования производства.

Для предотвращения тактических ошибок необходимо еще на этапе проекта предусмотреть все возможные пути развития предприятия, когда еще нет необходимой статистической информации [92, 96-98]. Для моделирования различных ситуаций предприятие нуждается в комплексе, состоящем из DSS и ESS-систем. При этом важным критерием выбора системы управления является возможность функционирования не только на основании PDM или ERP-систем, которые являются источниками статистических данных [93, 94]. Информацию для дальнейшей обработки можно также получить с помощью имитационного моделирования. Применение имитационного моделирования позволяет на ранних стадиях жизненного цикла производства получать информацию, необходимую для системы управления, тем самым вносить коррективы в организацию производства и управление ресурсами на стадии проектирования предприятия.

К тому же, средним и малым предприятиям экономически не выгодно применять PDM и ERP-системы, т.к. чаще всего они не имеют ресурсов для использования таких программных продуктов. Применение имитационного моделирования может позволить разработать дешевую систему управления, тем самым снизив неравенство в конкуренции с более крупными компаниями.

В связи с тем, что системы принятия управленческих решений на базе имитационного моделирования до сих пор не получили широкого распространения, требуется развить раздел теории, изучающий данное направление.

1.2. Имитационное моделирование

Для сбора статистической информации необходимо выполнение большого количества экспериментов при различных условиях. Проведение экспериментов в реальном времени и над реальной системой зачастую является длительным и экономически не выгодным решением. В таких случаях целесообразно применять моделирование. Моделирование бывает физическое и математическое (Рисунок 1.3) [36].

Рисунок 1.3. Классификация типов моделирования

Под физической моделью понимают масштабированную копию объекта. Например, выполненная в масштабе модель автомобиля. Математическое моделирование подразумевает выражение системы с помощью математических зависимостей. При этом математическое моделирование подразделяется на аналитическое и компьютерное.

Аналитическое – моделирование, при котором все протекающие процессы описаны в виде некоторых функциональных соотношений и могут быть исследованы с помощью поиска явной зависимости факторов модели. Данный тип моделирования подходит только для сравнительно простых моделей, т.к. для исследования сложной системы зачастую требуется существенное упрощение первоначальной модели. Это приводит к получению лишь ориентировочных результатов [37].

Компьютерное – моделирование, построенное в виде алгоритмов с помощью ЭВМ. В зависимости от применяемых методов, компьютерное моделирование делится на статистическое, численное и имитационное моделирование [37, 38].

Статистическое – компьютерный метод получения статистических данных о процессах, возникающих в моделируемой среде. Для получения оценки характеристики модели данные обрабатываются с использованием методов математической статистики [39].

Численное – метод моделирования, заключающийся в определении необходимых количественных данных о поведении систем каким-либо численным методом. Данный вид моделирования является более эффективным, чем аналитическое моделирование, в случае сложных систем, т.к. позволяет получить более точные результаты [37, 40].

Имитационное моделирование – метод численного моделирования, позволяющий в короткие сроки при отсутствии статистических данных получить расчетные данные для различных входных параметров. Имитационное моделирование позволяет анализировать каждый процесс с учетом необходимого для него времени, используя вероятностный подход, позволяющий наиболее точно приблизить модель к реальному процессу. Системы имитационного моделирования имеют хорошие возможности визуализации изучаемых процессов и их оптимизации [37, 38, 41].

Постановка экспериментов на разработанных с помощью ЭВМ моделях значительно сокращает затраченное время и позволяет получить численное

решение для конкретных условий входных параметров. Расчет функции с разными вариантами входных параметров занимает достаточно много времени. Средства имитационного моделирования позволяют в короткие сроки моделировать изучаемые процессы, которые могут рассчитываться при различных входных данных.

Для оптимизации различных параметров системы строится взаимосвязь, которую первоначально можно представить в виде модели «черного ящика» (Рисунок 1.4).

Рисунок 1.4. Модель «Черного ящика»

Модель «черного ящика» характеризуется входными и выходными параметрами. Предполагается, что входные параметры с учетом условий оптимизации преобразуются в значения выходных параметров [42]. Для того чтобы создать модель взаимосвязи входных и выходных параметров эффективно использовать имитационное моделирование. Важной задачей является разработка методики построения подобных моделей.

Выходные параметры системы зависят от ряда входных параметров. Реализация имитационной модели позволяет для каждого варианта соотношения входных данных получить численные значения выходных параметров. Расчет функции с разными вариантами входных параметров занимает достаточно много времени. Средства имитационного моделирования позволяют в короткие сроки моделировать изучаемые процессы.

При построении имитационных моделей выделяют простые и сложные системы. Простые состоят из нескольких процессов, которые легко представить

в виде комплекса параллельных или последовательных задач. Сложной система называется, когда появляется необходимость детального изучения каждого процесса. Например, Р. Шеннон в своей книге «Имитационное моделирование – искусство и наука» [41] замечает, что совокупность некоторых элементов системы может быть представлена как ее подсистема. Подсистемами являются некоторые самостоятельные части, изучать которые можно независимо от остальных протекающих процессов. Поэтому целесообразно на начальном этапе имитационного моделирования определить структуру сложной системы.

Выделяют три основных подхода в имитационном моделировании:

1. Дискретно-событийное моделирование.
2. Системная динамика.
3. Агентное моделирование.

Дискретно-событийное моделирование – подход к имитационному моделированию, анализирующий весь процесс как последовательность отдельных взаимосвязанных подпроцессов. При таком подходе каждое событие представляют в виде объекта, который задерживает весь процесс на заданное время с учетом вероятностного подхода. При этом есть возможность визуального отображения всего процесса (движение заготовки на производстве, движение людей в очереди к кассе и т.д.). В дискретно-событийном моделировании поток обрабатываемых объектов принято называть потоком заявок.

Данный метод также называют «процессно-ориентированным», т.к. вся динамика представляется как последовательность операций над пассивными объектами. Широкое применение «дискретно-событийный» подход получил в моделировании производственных процессов, логистических цепочек и т.д. [43-46].

Необходимость в таком подходе возникла при описании моделей, описывающих системы массового обслуживания (СМО). Это системы, в которых функционирование изучаемого процесса представляется как хронологическая последовательность технологических операций,

взаимосвязанных между собой логическим порядком. При дискретно-событийном моделировании СМО решается за счет построения непрерывного потока дискретных событий.

Впервые основные тезисы теории СМО сформулированы в начале XX века. Позже в 1909г. шведский математик Эрланг впервые с помощью теории вероятностей получил модель зависимости обслуживания телефонных вызовов от числа поступающих звонков. В СССР основные положения теории изложил математик А.Я. Хинчин в своей монографии «Работы по математической теории массового обслуживания» [47].

Джефри Гордон в 1961 г. разработал язык моделирования GPSS (англ. General Purpose Simulation System — общецелевая система моделирования), используемый для СМО, а также предложил систему, базирующуюся на последовательности диаграмм. Концепция, которую он заложил, применялась во многих системах имитационного моделирования в дальнейшем [48-50].

СМО предназначены для обслуживания потока заявок, представляющих собой последовательность определенных событий или объектов, возникающих в случайные заранее неизвестные моменты времени. Обслуживание входящих заявок также происходит с непостоянными интервалами. Таким образом, возникает неравномерная загрузка всей системы. Если скорость обслуживания меньше скорости подачи заявок, возникает перегрузка СМО, т.е. на входе скапливаются необслуженные заявки. Если заявок меньше, чем свободных каналов, способных ее обслужить, то возникает недогрузка СМО. Графически СМО представлена на Рисунке 1.5.

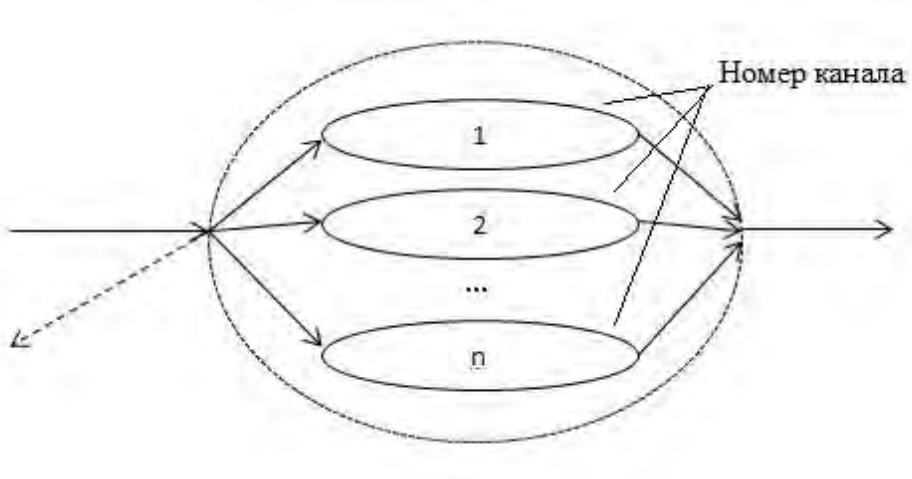


Рисунок 1.5. Система массового обслуживания [51]

СМО бывают одноканальные (n=1) и многоканальные (n>1). По принципу обслуживания СМО подразделяют на:

1. СМО с отказами – каждая заявка после «отказа» остается необслуженной.

2. СМО с ожиданием – для обслуживания перед каналами образуется очередь заявок.

3. Смешанные СМО – возникает ограничение на длину очереди ожидания или на время нахождения заявки в системе.

Основной целью теории систем массового обслуживания является разработка методик и рекомендаций по оптимальному построению СМО, регулированию потока заявок и организации управления ими [51]. Построение СМО с помощью средств имитационного моделирования позволяет получить оптимальное решение для каждой комбинации входных параметров.

Системная динамика – подход, направленный на изучение структуры сложных систем. Он используется для моделирования взаимосвязей внутри системы [52-54]. Все элементы системы представлены в качестве одной целостной системы и их частичная обработка не требуется. Системная динамика в имитационном моделировании базируется на системном подходе в управлении и заключается в том, что эффективность рассматривается как результат взаимосвязанных факторов, а не какого-то одного важного элемента.

Системная динамика позволяет моделировать процессы, описываемые дифференциальными уравнениями или системами дифференциальных и алгебраических уравнений. К классу задач, решаемых системной динамикой, относятся системы управления предприятием, которые крайне важны при организации современного производства.

Системная динамика объединяет качественные и количественные модели (стадии). Качественные позволяют описать систему и взаимодействия внутри нее. Количественные с помощью компьютерного моделирования определяют степень достоверности системы и исследуют её поведение.

Ряд исследователей [55, 56] отмечают возможность разработки причинно-следственных диаграмм методом системной динамики, которые относят к качественным моделям (стадиям). Они не требуют специальной подготовки. Их ценность заключается в наглядном представлении развития проблемы и определении возможных управленческих решений. Причинно-следственные диаграммы представляют собой совокупность переменных и связей между ними.

Количественную стадию представляют в виде концепции «накопителей» и «потоков». «Накопители» - это объекты, в которых сосредотачиваются определенные ресурсы (время, деньги, количество материальных объектов). «Поток» представляет собой некий процесс, который характеризует темп изменения состояния системы. В отличие от причинно-следственных диаграмм, данная концепция позволяет рассчитать итоговый результат взаимодействия элементов системы.

Среди современных исследований в области системной динамики выделяют работы таких ученых как Дж.Ф. Форрестер, М.Р. Гудман, Д.Л. Кауфман, Д.Ф. Андерсен, Дж.Д. Морекрофт, Н.Н. Моисеев, Т. Нейлор, Д.Ю. Каталевский, А. Рыженков, В.Н. Сидоренко и др.

Агентное моделирование – подход, направленный на исследование децентрализованных агентов и влияние их поведения на систему в целом. В роли агентов могут выступать люди, предприятия, изделия, деньги и т.д.

Агенты помещаются в некую окружающую среду с необходимыми взаимосвязями.

Основным отличием агентного моделирования от системно-динамического и дискретно-событийного является то, что в нем исследуются свойства и поведение каждого объекта. Объекты имеют разные свойства, цели, размеры и т.д. При таком подходе зависимости между объектами не строятся целенаправленно, а получаются в процессе моделирования всей системы с большим количеством индивидуальных объектов. С помощью этих свойств, агентное моделирование позволяет исследовать поведение людей и их психологию, причины изменения рынка и т.д. [57-59].

Применение имитационного моделирования расширяет возможности методов организации производства и обеспечивает:

1. Визуализацию всего производственного процесса.
2. Выявление «узких» мест.
3. Проведение анализа показателей эффективности производства.
4. Оптимизацию бизнес-процессов с целью сокращения всех видов потерь.

Особенность имитационного моделирования заключается в вероятностном задании временных показателей. При отсутствии достаточной информации о необходимом времени обычно используется треугольный закон распределения случайных величин. Это непрерывное, ограниченное с обеих сторон, распределение, которое применяется в случае варьирования значения в заданных границах. Треугольный закон распределения случайных величин записывается в виде:

$$triangular\ (min, A, max), \tag{1.1}$$

где min, A, max – соответственно минимальное, наиболее вероятное (предпочтительное) и максимальное значение интервала времени поступления заявки в систему либо обработки заявки инструментом.

Треугольный закон распределения случайных величин выражается формулой:

$$f(x) = \begin{cases} \dfrac{2(x - \min)}{(max - \min)(A - \min)} & \text{при } min < x \leq A \\ \dfrac{2(max - x)}{(max - \min)(max - A)} & \text{при } A < x \leq max \end{cases}, \quad (1.2)$$

Значения min, A и max определяются с помощью фотографии рабочего дня или методом экспертной оценки. Графически треугольный закон распределения случайных величин представлен на Рисунке 1.6.

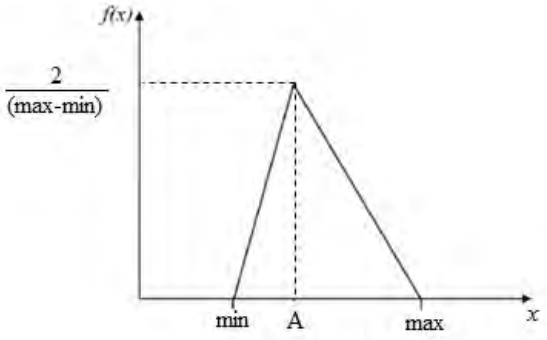


Рисунок 1.6. Треугольный закон распределения случайных величин

Экспоненциальное распределение зачастую применяется при необходимости моделирования интервала времени между случайными событиями или для описания времени выполнения процесса. Также, оно является методом описания временных зависимостей.

Экспоненциальное распределение выражается формулой:

$$f(x;\ \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & , x \geq 0 \\ 0 & , x < 0 \end{cases}, \quad (1.3)$$

где $\lambda -$ интенсивность распределения.

Графически экспоненциальное распределение представлено на Рисунке 1.7.

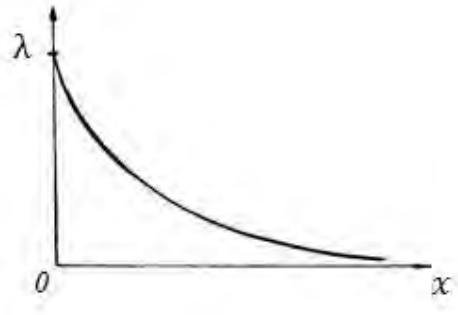


Рисунок 1.7. Экспоненциальное распределение

Распределение Пуассона – это дискретное распределение. Графически оно ограничено снизу нулем и не имеет ограничений сверху. Данный тип распределения позволяет моделировать появление редких событий с постоянной частотой. При этом время между возникновениями распределяется по экспоненциальному закону, поэтому его удобно применять и на начальных этапах изучения различных процессов.

Распределение Пуассона выражается формулой [57, 60]:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \ , \qquad (1.4)$$

где $P_k(t)$ — вероятность того, что за время t поступит k заявок при интенсивности λ,

λ — ожидаемое число заявок, поступающих в систему в единицу времени (интенсивность события),

k — реальное число заявок в единицу времени,

e — основание натурального логарифма.

Графически распределение Пуассона представлено на Рисунке 1.8.

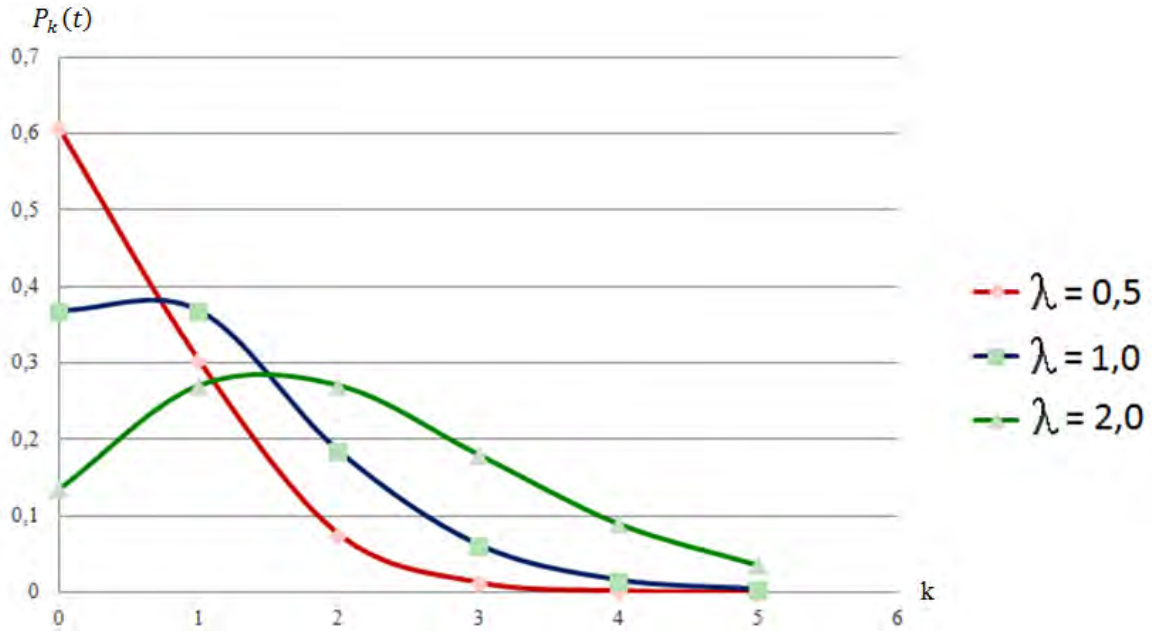


Рисунок 1.8. Распределение Пуассона

Благодаря применению вероятностного подхода можно построить имитационную модель, близкую к реальному процессу, что представляет

большой интерес при анализе и прогнозировании производственных параметров.

Имитационное моделирование позволяет получать количественные данные по производственному процессу и может применяться для получения расчетных данных изучаемых процессов. Один из основных вопросов при разработке имитационной модели – насколько точно представляет построенная модель реальную систему, т.е. является ли она адекватной? Существует несколько рекомендаций относительно определения адекватности имитационных моделей:

Верификация – процесс проверки достоверности результатов моделирования, при котором происходит проверка правильности преобразования имитационной модели в компьютерную программу путём сверки полученных расчетным путём и данных, полученных на практике [61].

Валидация – проверка на соответствие имитационной модели для конкретной цели использования. В отличие от верификации, валидация используется не всегда. Потребность в ней возникает только при возникновении конкретных требований при использовании продукта.

В настоящее время рынок программного обеспечения средств имитационного моделирования стремительно развивается. Разработчики предлагают большой выбор систем, предназначенных для разных подходов к имитационному моделированию (Таблица 1).

Рассмотрим наиболее известные. GPSS – язык программирования, используемый в имитационном моделирования при описании СМО и моделировании различных информационных процессов. Это первая система имитационного моделирования, которая заложила основы последующих разработок [48-50].

Таблица 1.

Программное обеспечение средств имитационного моделирования [62]

Подход к имитационному моделированию	Средства имитационного моделирования
Дискретно-событийное моделирование	GPSS, AnyLogic, Arena, DELMIA, Extend, PowerSim Studio, Witness, ProModel, Pilgrim, Taylor Simulation, SimScript, FlexSim и др.
Системная динамика	AnyLogic, Arena, SimBioSys, eMPlant, Plant Simulation, SimuLab, VenSim, PowerSim, Pilgrim, Dynamo, Stella, Ithink и др.
Агентное моделирование	AnyLogic, SimAgent, SimBioSys, AgentSpeak, TeleScript, RePast, NetLogo, Ascape, Mason и др.

Одним из популярных средств имитационного моделирования является программный комплекс DELMIA компании Dassault Systemes, который позволяет решить задачи планирования и оптимизации процессов производства. Система основана на PPR (Product, Process and Resources – продукт, процесс, ресурс) - модели данных об изделии. Т.е. каждая модель объединяет в себе 3D-модель изделия, протекающие процессы и необходимые ресурсы. С помощью такого построения системы происходит обмен данными между всеми модулями системы [63].

Выделяют основные задачи, решаемые системой DELMIA:

1. Планирование производственных процессов.
2. Планирование производственных площадок.
3. Анализ и оптимизация процессов производства.
4. Анализ качества изделий.
5. Визуализация работы производственного оборудования.

DELMIA интегрируется с PDM-системами (напр., ENOVIA Smarteam), а также с различными САПР (напр., CATIA) [64].

Разработка решения Plant Simulation крупной компании Siemens PLM Software представляет собой объектно-ориентированную среду имитационного моделирования. Система содержит несколько библиотек объектов:

1. Material Flow – библиотека элементов для обработки основных подвижных объектов;

2. Movable Units – библиотека основных подвижных объектов, с которыми производятся различные операции;

3. Information Flow – библиотека элементов, предназначенных для информационного обеспечения всей модели;

4. User Interface – библиотека построения диаграмм и графиков со сводными данными о модели [65].

Plant Simulation используется во многих производственных отраслях. Однако, как и DELMIA, предоставляет возможность построения процессов, используя только один из подходов к имитационному моделированию.

Отличительной чертой программного продукта Arena компании Rockwell Automation является возможность интеграции системы с программой функционального моделирования BPwin. Такая разработка обусловлена необходимостью подробного изучения бизнес-процессов перед построением имитационной модели. Таким образом, пользователь сначала разрабатывает весь процесс методом IDEF, а затем переносит полученную диаграмму в систему Arena. Далее строится процессно-ориентированная модель [66].

Отечественная система AnyLogic, разработанная компанией XJTechnologies, охватывает все три основных подхода к имитационному моделированию: дискретно-событийный, агентный и системную динамику, а также позволяет получать как обычные, так и оптимизационные решения. В этой связи, система AnyLogic перспективна для настоящей работы. Безусловным преимуществом системы является возможность совмещения нескольких подходов в одной имитационной модели [67]. Программный продукт имеет современный графический интерфейс и, в случае необходимости, позволяет использовать язык программирования Java для разработки непредусмотренных в AnyLogic свойств объектов и классов.

Имитационное моделирование позволяет исследовать реальные производственные процессы и получать технические решения на базе моделей, предусматривающих большое количество особенностей и параметров конкретного предприятия. Системы имитационного моделирования базируются

на применении численных методов, поэтому каждое решение относится к конкретному сочетанию параметров производственного процесса или предприятия в целом. Таким образом, можно получить большое количество частных решений, в зависимости от параметров производства. В силу этого полученное решение может быть взято за основу для дальнейшей обработки и получения универсального решения при оптимизации количества ресурсов.

На основе имитационного моделирования получают зависимости, которые могут использоваться при бизнес-планировании производственного предприятия и в дальнейшем быть составляющими системы принятия управленческих решений на производстве. Поэтому большой интерес представляет разработка методики создания подобных систем на базе имитационного моделирования.

Задачи организации производства и разработки системы поддержки принятия управленческих решений должны решаться комплексно с применением различных механизмов и инструментов, которые взаимодействуя между собой, позволят добиться максимального эффекта. Управленческие решения должны быть направлены на реализацию наиболее перспективных концепций. Одной из эффективных концепций непрерывного совершенствования является бережливое производство, позволяющее с системных позиций оптимизировать различные параметры производства [68-74].

1.3. Бережливое производство как методика управления предприятием

При разработке системы поддержки принятия управленческих решений необходимо учитывать основную идеологию руководства предприятия, согласно которой будут приниматься управленческие решения. В качестве основополагающей эффективно установить концепцию бережливого производства [101, 102].

В конце 1980-х - начале 1990-х годов ведущими японскими компаниями разработана концепция, которая представляет собой подход к управлению

организацией, направленный на повышение качества работы за счет сокращения потерь. Этот подход распространяется на все протекающие процессы – от проектирования и производства до сбыта продукции. Концепция базируется на производственной системе, разработанной компанией Toyota, и известной под аббревиатурой TPS (Toyota Production System).

Под TPS подразумевается комплекс производственных, технологических, логистических и управленческих методик по производству продукции с низкой себестоимостью и высоким качеством в оптимальном количестве в необходимые сроки. Основные цели производственной системы – исключение перепроизводства и всех видов потерь и снижение себестоимости продукции. На основе этого комплекса появилась концепция бережливого производства.

После Второй Мировой войны Toyota начала использовать, предложенный Генри Фордом еще в 1913 году, метод «поточного производства» и дополнила его своими идеями и принципами, позволяющими улучшить показатели качества, логистики, планирования и мотивации сотрудников. В результате Toyota смогла произвести качественную продукцию с меньшей стоимостью [75].

Согласно концепции бережливого производства потери, возможные на производственных предприятиях, принято подразделять на семь основных видов [68, 69]:

1. Перепроизводство

Перепроизводством называют весь объем продукции, произведенный вне производственного плана, до возникновения на него спроса. Таким образом, предприятие несет потери, связанные с использованием материалов, трудовых ресурсов, оформлением дополнительной документации. Перепроизводство требует дополнительных площадей на складе и финансовых вложений.

Для исключения перепроизводства в имитационной модели могут быть устанавлены критерии оптимизации, которые влияют на распределение ресурсов.

2. Ожидание

Любое ожидание, будь то ожидание освободившегося оборудования, оформления документов, сотрудников, является потерей для предприятия. Причинами ожидания в цепочке производства могут стать поломки оборудования, неграмотное планирование производственного цикла, низкая пропускная способность операций.

В программе имитационного моделирования можно установить критерии оптимизации ожидания на каждом участке производственной линии. Это позволит оценить и минимизировать затраты времени.

3. Излишние запасы

Многим предприятиям свойственно переполнение склада запасами.

Каждая единица расходных материалов, инструментов и комплектующих фактически является потраченными деньгами, которые не приносят прибыль. Со временем многие из них могут стать невостребованными. Это может быть вызвано неграмотной закупкой, когда сотрудники для облегчения работы размещают заказы на материалы, количество которых превышает потребность, а также неграмотным хранением на складе. Необходимые детали просто можно не найти на складе, если не проработана точная система хранения.

Системы поддержки принятия управленческих решений могут позволить определить потери, связанные с излишними запасами, а также разработать инструмент для управления ими.

4. Транспортировка

Каждое производственное предприятие сталкивается с необходимостью перемещения продукции между операциями, цехами и т.д. Каждый процесс перемещения требует затрат времени, электроэнергии, топлива и других ресурсов. Поэтому важно организовать производство с учетом транспортировок, сокращая расстояния любых перевозок.

Затраты времени на транспортировку учитываются при расчетах в системе принятия инженерных решений, т.к. при составлении диаграммы

процесса в программе имитационного моделирования могут быть выделены в отдельный этап укомплектования склада.

5. Дефекты

Любые дефекты, выявленные в процессе производства или на этапе контроля качества, безусловно, являются потерями, т.к. приводят к дополнительным затратам на доработку или утилизацию брака.

В программе имитационного моделирования можно установить этап проверки контроля качества, в котором согласно заданному закону распределения будет определяться количество забракованных изделий. Брак будет учитываться отдельно от готовой продукции и это отразится на полученных результатах оптимизационного эксперимента. Следовательно, разработанная на базе имитационного моделирования, система принятия управленческих решений будет использовать эту информацию.

6. Чрезмерная обработка

К данному типу потерь относят те операции, которые не востребованы у потребителей. Их выполнение, как правило, не оплачивается. Обычно к этому типу потерь относят добавление каких-либо функций, изменение свойств или материалов, которые, по мнению заказчика, не являются необходимостью.

7. Лишние движения

Этот тип потерь имеет схожие принципы с потерями на транспортировку. Каждое движение рассматривается как операция, которая должна добавлять ценность изготавливаемой продукции. Соответственно, неэффективная организация рабочих мест, расстановка оборудования и дополнительных расходных материалов являются причинами лишних движений.

Для своевременного выявления потерь и их ликвидации в концепции бережливого производства выделяют наиболее эффективные методы и инструменты [70-74]:

1. Карта потока создания ценности

Это инструмент, позволяющий визуализировать весь процесс, который проходят материальные и информационные потоки для создания ценности

продукции. Такая визуализация позволяет определить источники потерь, а также позволяет всем специалистам наглядно увидеть весь производственный процесс.

2. Вытягивающее поточное производство

Метод организации бережливого производства, при котором объем работ на каждом производственном этапе определяется потребностями последующих этапов. Конечным этапом такого метода рассматривают потребность заказчика. Каждая операция «вытягивает» продукцию с предыдущей операции. Таким образом, до тех пор, пока заказчик не сообщит о своей потребности, производство не будет запущено.

3. Канбан

Этот метод обеспечивает непрерывный материальный поток, сокращает объемы запасов материалов и готовой продукции на складе. Материалы передаются непосредственно в нужное место в определенном количестве, тем самым минуя склад. Готовая продукция в этом случае также не попадает на склад, а передается сразу заказчику. Передача информации между процессами происходит посредством карточек, в которых указывается необходимое количество деталей.

4. Кайдзен

Этот принцип организации производства, основанный на непрерывном совершенствовании всего процесса. Управленческие механизмы призваны стимулировать всех сотрудников принимать участие в развитии предприятия. Создаются рабочие группы, задачей которых является разработка метода устранения какого-либо типа потерь. С помощью «мозгового штурма» созданные коллективы выдвигают предложения по усовершенствованию того или иного процесса. Помимо ликвидации потерь развивается взаимодействие между сотрудниками, а также повышается моральное состояние.

5. Система 5С

С помощью данного метода ликвидируются потери от лишних движений, т.к. он направлен на организацию рабочего места сотрудника. Система состоит из пяти принципов, японское название каждого начинается на букву «С»:

1. Сортировка.
2. Рациональное расположение.
3. Уборка.
4. Стандартизация.
5. Совершенствование.
6. Система SMED (Single Minute Exchange of Die)

Данный метод позволяет произвести переналадку оборудования в максимально короткие сроки, которые доходят до нескольких секунд.

Метод заключается в определении внутренних (выполняются после остановки оборудования. Например, пресс-форму можно заменить только при остановленном прессе) и внешних (могут быть выполнены во время работы оборудования. Например, болты крепления пресс-формы можно подобрать и отсортировать и при работающем прессе) операций наладки, а также в преобразовании внутренних во внешние.

7. Система TPM (Total Productive Maintenance)

Метод заключается в профилактике и предупреждении возможных дефектов оборудования по запланированному графику профилактического техобслуживания.

8. Система Just-In-Time

Соблюдение метода «точно вовремя» заключается соблюдении трех основных принципов:

1. На операцию поступают только необходимые материалы.
2. Материалы поступают в строго определенном количестве, согласно потребности.
3. Материалы поступают строго в момент времени, когда они необходимы на операции.

9. Визуализация

Принцип визуализации частично встречается и в описанных выше методах. Для этого используется любое средство, с помощью которого на предприятии удобно информировать сотрудников о том, как должна выполняться работа. Также с помощью средств визуализации у руководителей есть возможность определить, какие операции требуют усовершенствования или как можно перераспределить работу между сотрудниками.

10. U-образные ячейки

Данный метод предполагает организацию расположения оборудования в форме латинской буквы «U». При такой организации наиболее оптимально происходит транспортировка изделий между операциями, а также в непосредственной близости находятся начальная операция и конечная, что позволяет сократить путь работника для выполнения следующего производственного цикла.

Эффект от внедрения любого инструмента бережливого производства можно оценить с помощью системы поддержки принятия решений, внеся необходимые правки в построенную имитационную модель процесса.

Бережливое производство базируется на принципах визуального контроля, т.е. стремится к мгновенному визуальному выявлению любым сотрудником предприятия любых видов потерь и отклонений. Для внедрения инструментов на предприятиях организовывают рабочую группу, состоящую из сотрудников разных специализаций. Реализация проектов происходит поэтапно [76]:

1. Определение проектов и их приоритетности, исходя из анализа «узких мест».
2. Назначение руководителя проекта и формирование рабочей группы.
3. Анализ текущего состояния.
4. Формирование будущего состояния, которое стремится достичь рабочая группа.
5. Разработка плана мероприятий по переходу к требуемому состоянию.

6. Реализация плана мероприятий.
7. Оценка результатов проекта.

Концепция бережливого производства перекликается с теорией ограничений, разработанной Э. Голдраттом в 1980 году. Методика направлена на определение и управление основными ограничениями системы. Это ограничения, которые возникают в каком-то определенном узле и при этом определяют итог работы всей системы [74].

Согласно теории ограничений, скорость работы производственного предприятия не может быть выше скорости самого медленного узла цепочки производства. Рабочее место с наименьшей производительностью является «узким местом» или потерей и задает темп всему производству. Помимо того, что результат работы производственной цепочки снижается, перед «узким» рабочим местом скапливаются изделия незавершенного производства. Поэтому очень важно отрегулировать производительность каждой операции так, чтобы за единицу времени производилось ровно столько продукции, сколько требуется для выполнения производственного плана, и время ожидания не превышало установленную на предприятии норму.

Одним из решений повышения пропускной способности является увеличение количества оборудования или сотрудников. Однако это вызывает и дополнительные финансовые потери. В случае снижения потребностей, большое количество ранее созданных рабочих мест окажется неэффективным. Поэтому важно на этапе проектирования предприятия разработать систему поддержки принятия управленческих решений. Одной из задач такой системы может стать определение оптимального числа оборудования для каждого участка производства и построение динамики изменения потребности в оборудовании при варьировании плана выпуска продукции.

Оптимизации количества оборудования и длительности выполнения операций зачастую не хватает для эффективного функционирования предприятия. Распространенной ошибкой производственных предприятий является закупка большого количества комплектующих изделий, объемы

которых значительно превышают потребности производства и размеры складских помещений. Отсутствие контроля над складскими остатками неблагоприятно сказывается на финансовых результатах деятельности компании. Кроме «замороженных» на складе денег в виде закупленных материалов, зачастую возникает необходимость во вложениях в расширение складской площади.

Технология изготовления продукции со временем совершенствуется, состав изделий меняется, потребность в уже закупленных комплектующих может не возникнуть. Чтобы решить проблему управления запасами и оптимизировать финансовые потоки на складе, необходим комплексный подход к решению проблемы. В связи с этим важной задачей настоящей работы является создание механизма, который позволит регулировать объем запасов материалов на складе и поддерживать его уровень в оптимальных границах [91, 99, 100]. Этот механизм должен эффективно работать не только в процессе производства изделий, но и на стадии проектирования предприятия.

Помимо определения оптимального объема запасов важно создать подходящие условия хранения, при которых сотрудники предприятия всегда будут точно знать, где находится то или иное изделие на складе. Поэтому предприятия зачастую переходят к методике адресного хранения материалов.

Адресное хранение – способ хранения материалов и готовой продукции, предполагающий присвоение индивидуального номера (адреса) каждой ячейке на складе. Способ позволяет исключить ошибки размещения материалов и обеспечивает оперативную передачу материалов на производство.

Потери являются неизбежными для любого производственного процесса. Предприятия по всему миру переходят к концепции бережливого производства. Большая часть методов концепции предполагает модернизацию бизнес-процессов, а значит, для реализации требуются различные технические средства. Наряду с использованием вышеописанных методов, эффективны различные математические средства, позволяющие повысить показатели эффективности предприятия. Для того чтобы добиться максимального эффекта

зачастую необходимо совмещать различные принципы управления производством.

Одним из способов минимизации вышеописанных потерь является система поддержки принятия управленческих решений, разработка которой возможна на базе имитационного моделирования. Весьма интересной была бы система, построенная на основе критериев, каждый из которых оптимизирует выделенные «узкие места». Эффективность применения такой критериальной системы еще до её внедрения на реальное производство возможно проверить в имитационной модели предприятия. Одним из способов реализации критериальной системы может быть проведение оптимизационного эксперимента, который позволяет по реальным заданным условиям определять значения показателей эффективности производства с позиций концепции бережливого производства.

Для обработки полученных с помощью оптимизационного эксперимента результатов можно применить методы планирования вычислительного эксперимента. Это даст возможность получить многофункциональные зависимости, которые позволят для разных случаев выполнения программы без дополнительных расчетов получать выходные значения искомого показателя. Таким образом, происходит переход от решения единичной оптимизационной задачи к получению общего решения. В дальнейшем разработанная модель может применяться в качестве элемента системы принятия управленческих решений.

1.4. Проведение оптимизационного эксперимента

Реализация принципов бережливого производства во многом определяется получением наилучших (или оптимальных) решений. В соответствии с этим возникает необходимость постановки и решения оптимизационной задачи.

Оптимизационная задача – это особый класс задач, целью которого является определения наилучшего сочетания ресурсов для достижения

максимально (или минимально) возможного результата. Математическую модель оптимизационной задачи составляют целевая функция и система ограничений и граничных условий [77]. Оптимизационную задачу можно записать в виде:

$$F(x_1, x_2, \dots x_k) \rightarrow \max(\min)$$

$$x_i \geq 0$$

$$f_1(x_1, x_2, \dots x_k) = a_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots x_k) < a_2 \qquad (1.5)$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$f_n(x_1, x_2, \dots x_k) = a_n$$

где $F(x_1, x_2, \dots x_k)$ – целевая функция,

x_i – входные параметры процесса.

Ограничения состоят из математических уравнений и бывают линейными и нелинейными, детерминированными и стохастическими.

Решением оптимизационной задачи является наилучший вариант из допустимых решений, который удовлетворяет условиям ограничений. При этом имеется, как правило, одно оптимальное решение. Критерием определения оптимальности решения является максимальное, минимальное или заданное значение целевой функции.

Поиск оптимального решения в задачах сложных производственных процессов практически невозможен без применения математических методов. Одним из эффективных инструментов является построение имитационной модели процесса и его оптимизация в программе имитационного моделирования. В этом случае оптимизация будет заключаться в итерационном прогоне модели с различными значениями входных параметров, удовлетворяющих условиям ограничений.

Интересно создание системы поддержки принятия управленческих решений с помощью решения оптимизационных задач. В условиях проектирования нового предприятия могут возникнуть трудности построения

оптимизационной задачи из-за неопределенности в значениях некоторых факторов. Имитационная модель способна самостоятельно рассчитать интервал допустимых значений неопределенного параметра и выбрать оптимальное значение при прочих условиях.

Оптимизационный эксперимент в имитационном моделировании строится на базе итерационных численных методов, т.е. каждое решение определяется для конкретных условий. При наличии ряда решений можно получить общую зависимость, которую в дальнейшем можно исследовать. Для выявления зависимости из общего количества частных решений весьма эффективно использовать методы планирования эксперимента.

1.5. Методы планирования эксперимента

При разработке системы поддержки принятия управленческих решений производственным процессом необходимо определить влияние различных факторов на целевой показатель и построить общую зависимость из совокупности частных решений. Весьма эффективным способом определения степени влияния различных факторов является дисперсионный анализ.

В реальных системах на исследуемую функцию может влиять большое число факторов, но только некоторые из них будут являться определяющими. Согласно принципу Парето, только 20% факторов являются основными и способны определить 80% результата. Для качественной оценки влияния факторов на функцию выходного параметра служит дисперсионный анализ, а для получения расчетных зависимостей – регрессионный анализ, на котором основан метод планирования эксперимента [78].

При дисперсионном анализе общая связь между входными и выходным параметрами выражается функцией:

$$y = f(x_1, x_2, \dots x_n), \tag{1.6}$$

где x – это входные и выходные параметры.

В числе входных параметров выделяют сильные факторы, которые оказывают наиболее значимое влияние на выходной параметр. В

производственных и экономических моделях обычно бывает не более трех-четырех определяющих факторов [79]. Влияние на выходной параметр оказывают как сами факторы, так и их взаимодействие друг с другом. Исключение хотя бы одного из них может привести к неверному расчету.

Дисперсионная модель эксперимента представляет сумму эффектов факторов, эффекта их взаимодействия и ошибки воспроизводимости. Так, дисперсионная модель двухфакторного эксперимента выражается формулой:

$$y = A + B + AB + \varepsilon\,, \tag{1.7}$$

где A – эффект первого фактора,

B – эффект второго фактора,

AB – эффект взаимодействия факторов,

ε – ошибка воспроизводимости.

Дисперсионный анализ количественных факторов проводится в два этапа. Первый этап – определение значимости фактора. На втором этапе оценивается характер зависимости величины выходного параметра от этого фактора.

Значимость факторов определяется на основании критерия Фишера. При сравнении элементов дисперсии между собой возможно установить значимость варьируемых факторов на результат.

Регрессионный анализ служит для статистической обработки результатов эксперимента. Это метод математического моделирования, определяющий функциональную зависимость между факторами эксперимента. Полученные результаты позволяют проанализировать степень зависимости факторов и определить новые значения выходного параметра при варьировании исходных данных.

В ходе регрессионного анализа рассчитывают коэффициенты уравнения регрессии, т.е. определяют вид зависимости между выходным и входными параметрами и оценивают значимость полученного уравнения. Его результатом является получение общего уравнения математической модели, которое будет связывать выходной параметр с входными [80].

Для построения уравнения регрессии для каждого возможного варианта значений факторов проводят эксперименты. При этом измеряют величину, зависимость которой исследуется в результате каждого эксперимента. После проведения всех экспериментов получается функция, заданная таблицей, где каждая ячейка представляет собой значение определенной экспериментальной точки. Наиболее эффективно использование зависимости в виде функции, поэтому с помощью регрессионного анализа из табличной зависимости получают уравнение в виде полинома.

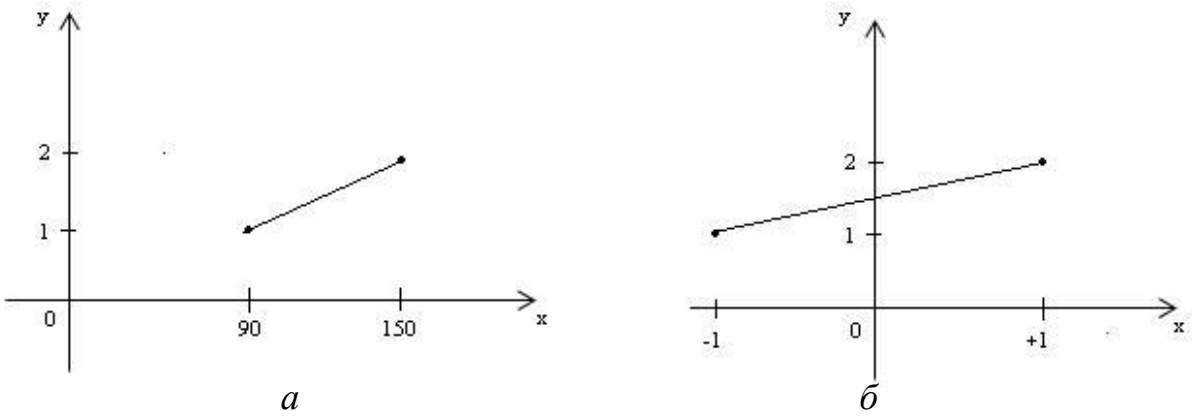
В общем виде уравнение регрессии представляется как:

$$y_p = k_0 + k_1x_1 + kx_2 + \cdots + kx_n + k_{12}x_1x_2 + \cdots + k_{n-1}x_{n-1}x_n + \\ + k_{12\ldots n}x_1x_2 \ldots x_n + k_{11}x_1^2 + k_{22}x_2^2 + k_{33}x_3^2 + \cdots + k_{nm}x_n^2, \quad (1.8)$$

где $k_0, k_1, \ldots, k_{nm}$ – коэффициенты регрессии

Одним из наиболее распространенных методов определения параметров уравнения регрессии является метод наименьших квадратов (МНК) [79]. Это математический метод, основанный на определении суммы квадратов отклонений и их минимизации.

Значимую роль в теории планирования эксперимента играет полный факторный эксперимент 2^k, где k – количество факторов. Каждый фактор меняет свое значение на двух уровнях, которые относительно оси координат называют «-1» и «+1». Максимальному значению фактора присваивают координату «+1», минимальному – «-1» (Рисунок 1.9) [81, 82].



а *б*

Рисунок 1.9. Перенос центра оси координат в полном факторном эксперименте

а) эксперимент в абсолютных координатах фактора *x*;

б) эксперимент в относительных координатах фактора *x*.

При переносе центра оси координат эксперимент становится ортогональным. Это свойство полезно, когда исследователю не известны точный вид математической модели и факторы, оказывающие наибольшее влияние на искомый результат. Приведение эксперимента к ортогональности позволяет достичь более точных значений коэффициентов уравнения регрессии.

Эксперимент проводится в три серии. Первая серия экспериментов для случая полного факторного эксперимента проводится по плану 2^k, строится линейная модель. Вторая серия проводится в «нулевой» точке для проверки полученной линейной модели и определения ошибки воспроизводимости. В случае большого отклонения «нулевой» точки от линейной модели проводится третья серия эксперимента с переходом к модели второго порядка.

Для автоматизации расчета по полученным зависимостям, определенным методом планирования эксперимента, эффективно использовать средства MS Excel. С помощью встроенных функций можно создать рабочий инструмент, который позволит получать значение выходного параметра при различных исходных данных.

Системы поддержки принятия управленческих решений актуальны и востребованы в настоящее время. Большинство систем, представленных на

рынке информационных технологий, основываются на обработке статистической информации. Поэтому возникают трудности при внедрении систем поддержки принятия управленческих решений на этапе проектирования предприятий. Однако потребность в таких системах приводит к необходимости замены статистических данных на расчетные. Этот подход возможно реализовать с помощью применения имитационного моделирования. Результаты имитационного моделирования можно привести к получению общего уравнения зависимости выходного параметра от входных факторов с помощью метода планирования эксперимента. Таким образом, становится возможной замена статистических данных, собираемых на протяжении нескольких лет, на данные, полученные численными методами.

Следует отметить, что разработка системы поддержки принятия управленческих решений на базе имитационной модели производственных процессов предприятия значительно дешевле существующих готовых программных продуктов. Это делает такие системы доступными для малых и средних предприятий, которые не могут себе позволить дорогостоящие программы. В связи с вышесказанным, актуальной задачей является разработка методики создания системы принятия управленческих решений, базирующейся на расчетной информации. Для разработки методики необходимо проведение комплексных исследований. Подобная методика будет представлять практическую значимость, как на стадии проектирования предприятия, так и после запуска серийного производства.

1.6. Выводы по Главе 1

1. В настоящее время существуют различные системы поддержки принятия управленческих решений, работа которых основана на статистической информации, накопленной за длительное время эксплуатации подобных систем. Эти системы работают по принципу подхода DSS (Decision Support Systems), основанного на применении статистических данных о производственных процессах реального предприятия. В связи с этим на этапе

подготовки производства возможным вариантом является получение необходимой информации для систем принятия решений, основанных на расчетных данных, полученных с помощью имитационного моделирования. Эффективным средством получения расчетных данных, анализа организации производства и управления предприятием является имитационное моделирование, которое позволяет рассмотреть производственный процесс с позиций теории СМО. СМО представляет собой модель, в которой изучаемый процесс или система представляется как хронологическая последовательность событий. Данная теория позволяет изучить загрузку системы и определить оптимальные параметры организации производства. Имитационное моделирование обеспечивает расчет параметров процесса, что позволяет заменить отсутствующие статистические данные на расчетные. Одним из преимуществ имитационного моделирования является вероятностное распределение времени, позволяющее наиболее точно приблизить модель к реальному процессу. Имитационное моделирование позволяет без дополнительных затрат на физические эксперименты рассчитать оптимальные значения производственных параметров. Поэтому актуальной задачей является разработка инструментов планирования процессов на основе расчетных данных с помощью имитационного моделирования.

2. Системы имитационного моделирования работают на базе численных методов, т.е. каждый расчет основан на конкретных значениях параметров исследуемого производственного процесса. Для эффективной работы систем принятия решений, работающих на основе расчетных данных, требуется получение многофункциональных зависимостей, определяющих взаимосвязи параметров технологических процессов и организации производства. Для получения подобных зависимостей по результатам расчетов имитационного моделирования целесообразно применение методологии планирования эксперимента, что позволит получать многофункциональные зависимости в виде уравнений-полиномов.

3. При разработке системы поддержки принятия управленческих решений, необходимо опираться на базовую концепцию организации производства, принятую на предприятии. Одной из наиболее распространенных и эффективных методик организации производства является концепция бережливого производства. Ее основной целью является исключение всех видов потерь предприятия. Наиболее важными являются потери, вызванные простоем оборудования, его низкой загрузкой, перенасыщением склада материалами и комплектующими изделиями, длительным ожиданием продукции незавершенного производства на различных этапах. Для эффективного применения принципов концепции бережливого производства в разрабатываемой системе принятия решений следует сформировать систему критериев, на основании которых будет функционировать управленческая система.

4. Изучен современный рынок программ имитационного моделирования. Для разработки методики организации производства определен наиболее подходящий инструмент – Anylogic компании XJ Technologies. Основным критерием выбора стало то, что это один из немногих инструментов, который поддерживает все три подхода к имитационному моделированию. Дискретно-событийный подход направлен на анализ всего процесса в виде последовательности отдельных взаимосвязанных подпроцессов, позволяет реализовать принципы теории СМО. Системная динамика позволяет изучить структуру сложных систем. Агентное моделирование исследует децентрализованных агентов (т.е. агентов без единого поведения) и влияние их поведения на систему в целом. Алгоритм работы системы Anylogic позволяет учитывать в моделях производственных процессов элементы концепции бережливого производства.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Современное сборочное производство представляет собой совокупность сложных технологических процессов, которые трудно изучать как единое целое. В качестве инструмента для исследования производственных систем наиболее эффективно использовать имитационное моделирование. Имитационная модель производственного процесса заключается в моделировании отдельных подпроцессов и создании взаимосвязей между ними. Для предприятий со сложной производственной структурой целесообразно построение составной многоуровневой имитационной модели. Таким образом, происходит переход к многоуровневому имитационному моделированию.

При разработке системы поддержки принятия управленческих решений для проектируемого предприятия одной из задач является управление ресурсами. Для вычисления оптимального объема ресурсов при непостоянной программе выпуска изделий необходимо рассмотреть весь технологический процесс с позиций системы массового обслуживания. Первым шагом реализации принципа СМО при построении многоуровневой имитационной модели является исследование структуры, характеристик и параметров производственных систем, реализованное посредством метода IDEF0 [83, 106].

2.1. Методика IDEF0

Основой принципа построения моделей IDEF0 является визуальное представление бизнес-процессов в виде набора блоков, взаимосвязанных между собой. Каждому процессу или функции соответствует отдельный блок, который в свою очередь может состоять из нескольких других подфункций. В основе методики лежат четыре основных понятия:

1. Функциональный блок (Activity Box) – конкретная функция, реализуемая в рамках изучаемого бизнес-процесса. Она изображается на диаграмме в виде прямоугольника (Рисунок 2.1).

Рисунок 2.1. Модель функционального блока

По требованиям стандарта [83-84], название каждого функционального блока должно быть сформулировано в виде глагольного наклонения (например, «заказать детали у поставщиков»). Каждая сторона функционального блока имеет свое назначение в модели:

Левая сторона («Вход») – показывает, какие входные параметры необходимы для реализации функционального блока.

Правая сторона («Выход») – показывает, какие выходные параметры получаются за счет преобразования входных параметров функциональным блоком.

Верхняя сторона («Управление») – указывает перечень необходимых для реализации функционального блока управляющих воздействий и документов.

Нижняя сторона («Механизм») – указывает перечень необходимых ресурсов (кадровых, инструментальных и др.).

2. Интерфейсная дуга (Arrow) – элемент системы, оказывающий влияние на функцию, представленную функциональным блоком, и изображенный в виде стрелки. Позволяет отображать различные объекты, в роли которых могут выступать материальные ресурсы, производственные мощности, потоки различных данных и информации. Род объекта определяется стороной функционального блока, к которой подходит (или из которой исходит) стрелка.

3. Декомпозиция (Decomposition) – основное понятие методики IDEF0, принцип которого заключается в разделении сложного процесса на составляющие его подпроцессы. Количество уровней детализации зависит от изучаемого процесса и определяется разработчиком модели.

4. Глоссарий (Glossary) – набор определений и ключевых слов, являющийся описанием сущности элемента.

При построении функциональной модели IDEF0 используется процессный подход, согласно которому все функции разбиваются на подпроцессы. На первом этапе строится диаграмма верхнего уровня A-0, в которой содержится только один функциональный блок и полный набор интерфейсных дуг. Имя такого блока представляет собой конечную задачу, которая стоит перед разработчиком. Пример диаграммы A-0 представлен на Рисунке 2.2.

Рисунок 2.2. Функциональный блок A-0

Данная диаграмма может быть разложена на основные подпроцессы посредством создания дочерней диаграммы. Каждая дочерняя диаграмма состоит из дочерних блоков и стрелок, обеспечивающих дополнительную детализацию родительской диаграммы (Рисунок 2.3).

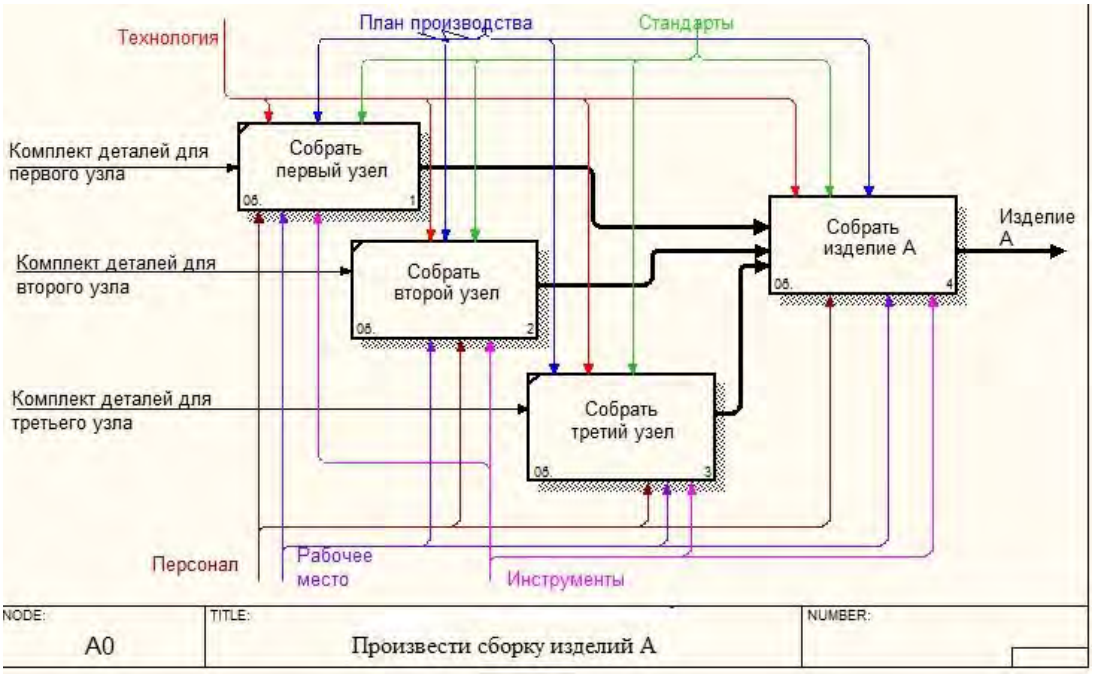


Рисунок 2.3 Дочерняя диаграмма

Для построения блок-схем использован ведущий инструмент моделирования бизнес-процессов по методологии IDEF - AllFusion Process Modeler.

В данной работе методика IDEF0 использована для создания точной структуры всей системы, которая является базой для построения имитационных моделей изучаемых производственных процессов.

2.2. Методика построения имитационных моделей.

Построение имитационной модели происходит на базе разработанного бизнес-процесса с помощью методики IDEF0. Одним из эффективных программных средств, позволяющих выполнять не только графическое (визуальное), но и имитационное моделирование бизнес-процессов, является система AnyLogic, в основе которой лежит объектно-ориентированный подход.

Основными инструментами имитационного моделирования являются базовые элементы библиотеки Enterprise Library, с помощью которых реализуется построение СМО. Согласно методике, любые материальные ресурсы проходят имитируемый процесс в виде заявок, которые выполняют действия, установленные с помощью элементов библиотеки [85].

Построение имитационных моделей в среде AnyLogic осуществляется методом перетягивания элементов библиотеки Enterprise Library на рабочее поле модели. Каждый элемент библиотеки представляет собой настраиваемый параметрический шаблон типового инструмента, который по умолчанию выполняет свои определенные функции. Путем настройки характеристик элементы на рабочем поле преобразуются в объекты строящейся модели процесса. На Рисунке 2.4 представлена элементарная имитационная модель.

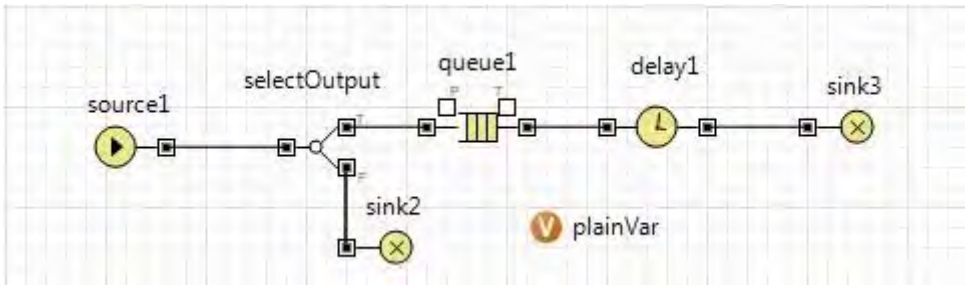


Рисунок 2.4. Пример имитационной модели

Основные элементы библиотеки Enterprise Library, использованные в работе:

1. Source – стандартный элемент, который используется в качестве исходной точки имитационной модели. Source создает и посылает заявки далее по схеме, согласно заданной интенсивности.

2. Queue – элемент, моделирующий очередь заявок перед очередным обслуживающим звеном.

3. Delay – элемент, способный задерживать прибывающие заявки на заданный промежуток времени. Попадание заявки в блок delay говорит о том, что в текущий момент времени заявка обслуживается.

4. Sink – элемент, обозначающий конечную точку процесса. Sink уничтожает поступающие заявки, как и его аналог объект Exit.

5. SelectOutput – элемент, определяющий дальнейший путь заявки, путем проверки выполнения заданного условия или по заданной вероятности [62, 86, 87].

Настройка свойств элементов представлена на Рисунке 2.5 на примере элемента sink.

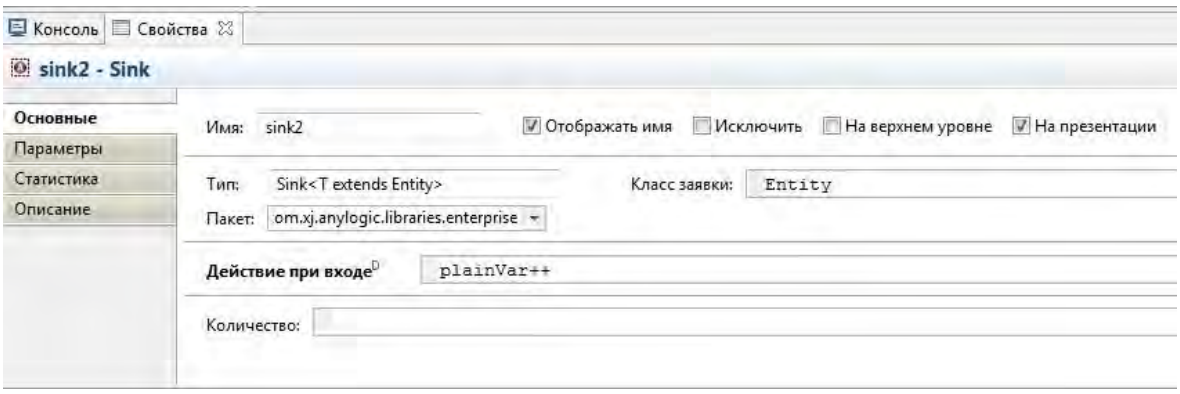


Рисунок. 2.5 Свойства элемента sink

В строке «Действие при выходе» прописана задача, которая выполняет подсчет заявок, дошедших до элемента sink, и хранит это значение в переменной plainVar. Все условия в системе AnyLogic записываются на языке программирования Java.

Время подачи или задержки заявки задаётся вероятностное. В работе используется треугольный закон распределения, позволяющий наиболее точно приблизить модель к реальному процессу.

2.3. Методика построения многоуровневой имитационной модели

При построении имитационной модели современного сборочного производства необходимо учитывать большое число характеристик и параметров системы. Поэтому важно разрабатывать многоуровневую имитационную модель на базе полученного по методике IDEF0 бизнес-процесса, обеспечивая взаимодействие между всеми процессами сложного производства. При этом в отличие от метода IDEF0, многоуровневая имитационная модель строится в обратном порядке.

Выделяют отдельные процессы, моделирование которых происходит на отдельных классах активного объекта. Передача данных от одного процесса к другому (или с одного уровня на другой) осуществляется с помощью портов. Каждый новый класс активного объекта может также выступать в роли шаблона, если требуется создать несколько процессов с одинаковой схемой работы.

Для формирования иерархии системы создают вложенные объекты, которые являются экземплярами других классов активных объектов. Для того чтобы класс активного объекта мог стать основой вложенного объекта необходимо, чтобы на его диаграмме был хотя бы один порт для передачи информации. Для создания вложенного объекта необходимо перетянуть из панели «Проект» заготовленный шаблон в рабочее поле другого класса активного объекта. При этом структура вложенного объекта в любое время может быть отредактирована. Количество использования каждого класса активного объекта в роли вложенного не ограничено (Рисунок 2.6).

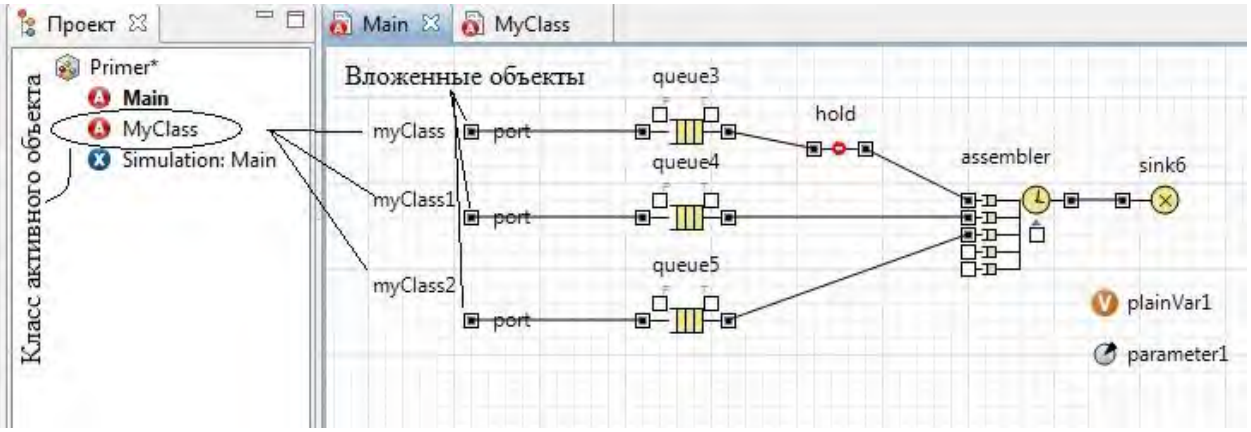


Рисунок 2.6. Вложенные объекты

Каждый созданный вложенный объект имеет структуру, заданную в исходном классе. Вложенные объекты целесообразно использовать при моделировании сложных систем как шаблоны аналогичных подпроцессов.

После завершения разработки всех подпроцессов создается окончательная схема производства на основном классе активного объекта Main, куда с помощью портов передается вся необходимая информация.

Стандартные классы заявок не всегда обладают всеми необходимыми для модели свойствами. Для придания заявкам дополнительных свойств создаются новые Java классы, которые представляют собой программный код, написанный на языке Java. На Рисунке 2.7 представлен Java редактор для создания текстового класса, выраженного указанным типом – String.

```
/**
 * MyClass
 */
public class MyClass extends com.xj.anylogic.libraries.enterprise.Entity implements java.io.Serializable {


    /**
     * Конструктор по умолчанию
     */
    public MyClass(){
    }


    @Override
    public String toString() {
        return super.toString();
    }

    /**
     * Это число используется при сохранении состояния модели<br>
     * Его рекомендуется изменить в случае изменения класса
     */
    private static final long serialVersionUID = 1L;

}
```

Рисунок 2.7. Java редактор

2.4. Проведение оптимизационного эксперимента в программе имитационного моделирования

Имитационное моделирование является инструментом определения значений факторов, при которых достигается максимальный эффект. Для этого требуется проведение оптимизационного эксперимента на базе разработанной имитационной модели. Оптимизационный эксперимент – это итерационный процесс, заключающийся в прогоне имитационной модели с различными значениями входных параметров и определении оптимальной комбинации для текущей задачи.

Для реализации оптимизационного эксперимента в программе имитационного моделирования необходимо создать эксперимент с типом «Оптимизация». В свойствах эксперимента указывается целевая функция, которая служит для определения оптимального результата, а также параметры и ограничения (Рисунок 2.8).

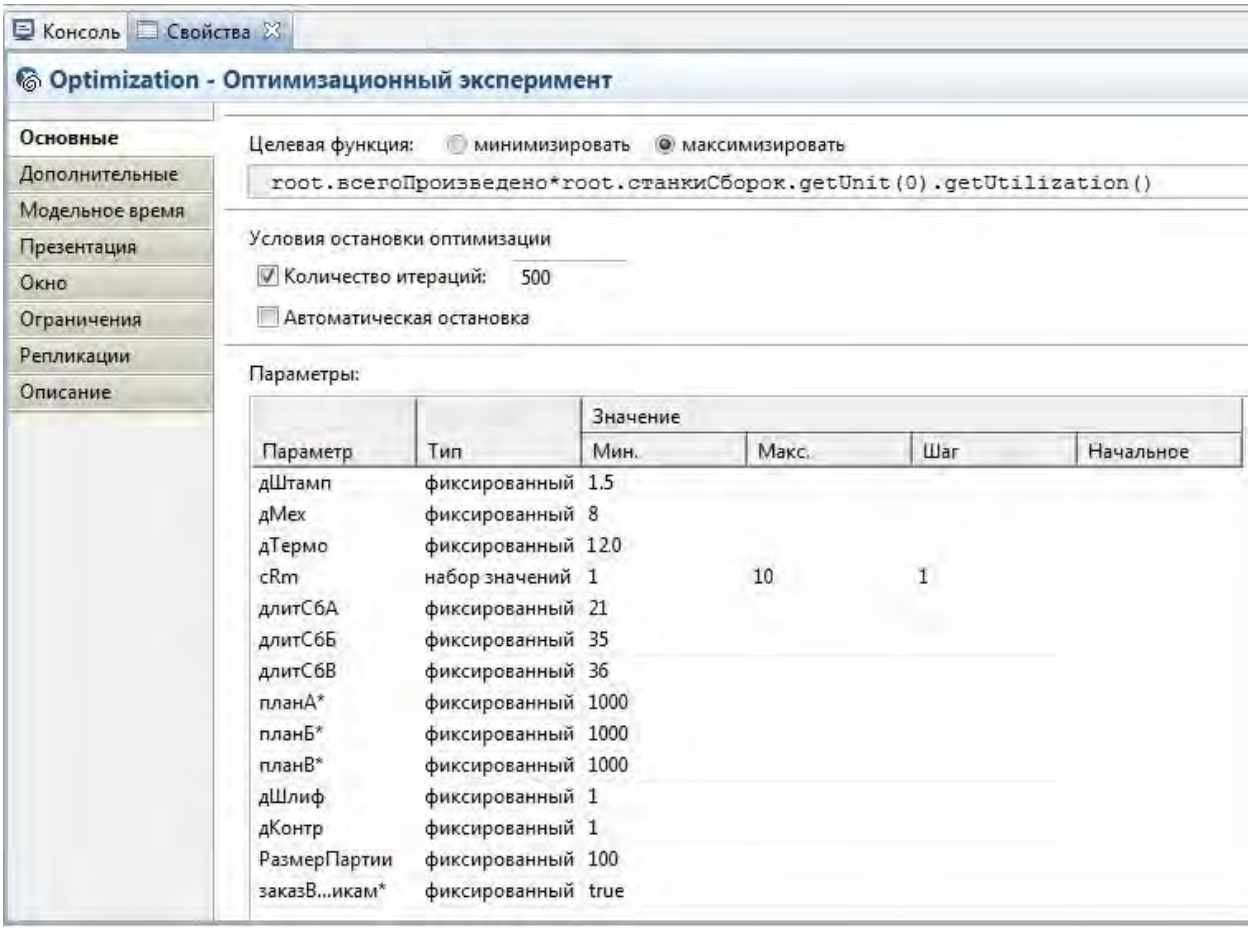


Рисунок 2.8. Оптимизационный эксперимент

С помощью оптимизационного эксперимента в AnyLogic получают результаты возможного выпуска продукции для разных вариантов соотношения значений параметров. В связи с тем, что таких вариантов большое количество, целесообразна их обработка методом планирования эксперимента для расчета общей зависимости, которая позволяет для разных вариантов выполнения программы без дополнительных расчетов получать выходные значения загрузки оборудования. Таким образом, происходит переход от решения единичной оптимизационной задачи к получению общего решения.

2.5. Обработка результатов оптимизационного эксперимента

Система AnyLogic работает на основе численных методов. Поэтому решения оптимизационных экспериментов получаются для конкретных вариантов значений параметров производства. Для получения общей

зависимости в работе используются методы планирования эксперимента и дисперсионного анализа.

Дисперсионный анализ изучает влияние каждого фактора на общее значение дисперсии. Для проведения дисперсионного анализа необходимо с помощью оптимизационного эксперимента в AnyLogic провести серию опытов и получить результаты искомого показателя y для разных вариантов соотношения факторов. Затем необходимо рассчитать общую сумму квадратов отклонений, которая является суммой сумм квадратов отклонений всех факторов. Для четырехфакторного эксперимента уравнение имеет вид:

$$\sigma_{об} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_1\sigma_4 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_2\sigma_4 + \sigma_3\sigma_4 + \\ + \sigma_1\sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_2\sigma_4 + \sigma_2\sigma_3\sigma_4 + \sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4 + \sigma_0\,, \quad (2.1)$$

где $\sigma_{об}$ – общая сумма квадратов отклонений,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ – сумма квадратов отклонений факторов,

σ_0 – сумма квадратов отклонений ошибки воспроизводимости.

Сумма квадратов отклонений одного фактора рассчитывается по формуле:

$$\sigma_1 = \sum_{i}^{a}\sum_{j}^{b}\sum_{m}^{c}\sum_{p}^{d}(\bar{y}_{ijmp} - \bar{y}_{*****})^2, \quad (2.2)$$

где $\bar{y}_{ijmp}$ – среднее значение первого фактора,

$\bar{y}_{*****}$ – общее среднее значение,

a,b,c,d – количество уровней каждого из четырех факторов.

Средние значения рассчитываются по формулам:

$$\bar{y}_{ijmp} = \frac{y_{i****}}{bcdn}\,, \quad (2.3)$$

$$\bar{y}_{*****} = \frac{y_{*****}}{abcdn}\,, \quad (2.4)$$

где, n – количество проведенных опытов для каждого варианта соотношений факторов.

Уравнение четырехфакторного дисперсионного анализа имеет вид:

$$f_{об} = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_1f_2 + f_1f_3 + f_1f_4 + f_2f_3 + f_2f_4 + f_3f_4 + \\ + f_1f_2f_3 + f_1f_2f_4 + f_2f_3f_4 + f_1f_2f_3f_4 + f_0\,, \quad (2.5)$$

где $f_{об}$ – общее число степеней свободы,

f_1, f_2, f_3, f_4 – число степеней свободы факторов,

f_0 – число степеней свободы ошибки воспроизводимости.

Для анализа суммы квадратов отклонений в дисперсионном анализе определяют число степеней свободы:

$$f_1 = a - 1\,, \quad (2.6)$$

$$f_2 = b - 1\,, \quad (2.7)$$

$$f_3 = c - 1\,, \quad (2.8)$$

$$f_4 = d - 1\,, \quad (2.9)$$

$$f_0 = abcd(n - 1), \quad (2.10)$$

Сравнение дисперсий для определения наиболее значимых факторов производится путем определения критерия Фишера:

$$F_i = \frac{\sigma_i/f_i}{\sigma_{об}/f_{об}}\,, \quad (2.11)$$

В случае если полученный критерий Фишера меньше табличного значения $F_T(p;\, f_i; f_{об})$, то влияние i-того фактора считается незначительным. Если F_i больше табличного значения, влияние фактора считается значимым. Фактор, показывающий наибольшее значение критерия Фишера, является наиболее значимым. Таким способом производится ранжирование и отбрасывание наименее значимых факторов.

Значимость суммы эффектов отброшенных факторов определяется по формуле:

$$F_{от} = \frac{\sigma_{от}/f_{от}}{\sigma_{об}/f_{об}} \leq F_T(p;\, f_{от};\, f_{об}), \quad (2.12)$$

где $\sigma_{от}$ – сумма квадратов отклонений отброшенных факторов,

$f_{от}$ – число степеней свобод отброшенных факторов.

Регрессионный анализ проводится в целях определения функциональной зависимости факторов. Общий вид уравнения регрессии второго порядка четырехфакторного эксперимента имеет вид:

$$y_p = k_0 + k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + k_4x_4 + k_5x_1x_2 + k_6x_1x_3 + k_7x_1x_4 + \\ + k_8x_2x_3 + k_9x_2x_3 + k_{10}x_3x_4 + k_{11}x_1x_2x_3 + k_{12}x_1x_2x_4 + k_{13}x_2x_3x_4 + \\ + k_{14}x_1x_2x_3x_4 + k_{15}x_1^2 + k_{16}x_2^2 + k_{17}x_3^2 + k_{18}x_4^2\,, \quad (2.13)$$

Задачей регрессионного анализа является определение значений коэффициентов *k*, которые регулируют значение *y*. В связи с наличием большого количества неизвестных, коэффициенты определяются по методу МНК, который основан на минимизации суммы квадратов отклонений значений параметров.

Для построения полного факторного эксперимента используют центральный композиционный план. Такой способ позволяет значительно сократить количество проводимых опытов. Для этого необходимо перенести начало координат в центр эксперимента и произвести замену переменных по формуле:

$$x_i' = \frac{x_i - 0{,}5\,(x_{i\,min} + x_{i\,max})}{0{,}5 \cdot \Delta x_i}\,, \quad (2.14)$$

где x_i' - новая координата,

$x_{i\,min}$ и $x_{i\,max}$ – минимальное и максимальное значения фактора x_i.

Также значения факторов x_i преобразовывают в относительные координаты согласно величине «звездного плеча» α, значение которого для четырехфакторного эксперимента рассчитывается по формуле:

$$\alpha = 2^{k/4} = 2\,, \quad (2.15)$$

Далее центральный композиционный план проводится в три этапа (Рисунок 2.9).

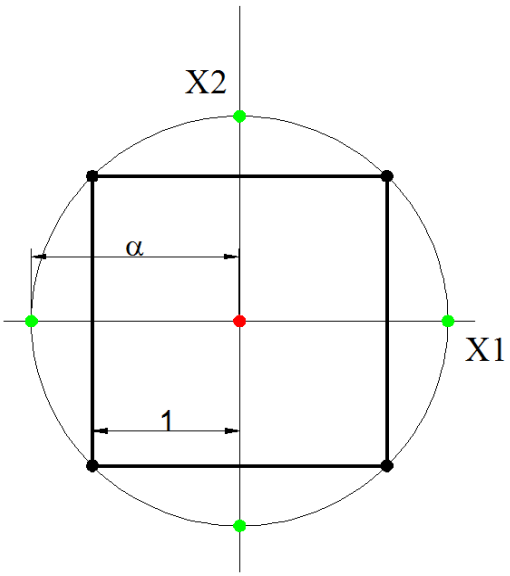


Рисунок 2.9. Целевые точки центрального композиционного плана

1. Для первой серии экспериментов требуется определить значения во всех точках линейной части уравнения (черные точки), кроме нулевой. В случае четырехфакторного эксперимента таких точек будет:

$$N = 2^4 = 16\,, \tag{2.16}$$

2. Вторая серия выполняется в нулевой точке (красная точка).

3. Третья серия выполняется в «звездных точках» (зеленые точки).

Центральный композиционный план эксперимента представлен в Таблице 2.

Таблица 2.

Центральный композиционный план эксперимента

						X12	X13	X14	X23	X24	X34	X123	X124	X234	X1234	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2	
u	X'0	X'1	X'2	X'3	X'4	X'5	X'6	X'7	X'8	X'9	X'10	X'11	X'12	X'13	X'14	X'15	X'16	X'17	X'18	Yu
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
3	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	
4	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
5	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	
6	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	
8	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	
9	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	1	
10	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	
11	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	
12	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	
13	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	
14	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	
15	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	
19	1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	
20	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	
21	1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	
22	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	
23	1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	
24	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	
25	1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	

Для определения коэффициентов регрессии решаются уравнения:

$$(ij) = \sum_{u}^{N} x_{iu} x_{ju} \,, \tag{2.17}$$

$$(jy) = \sum_{u}^{N} x_{iu} y_{u} \,, \tag{2.18}$$

где *i* – индекс, определяющий номер столбца,

j – индекс, определяющий номер строки,

(ij) – нормальная (информационная) матрица,

(jy) –столбец свободных членов.

Для решения уравнений систему нормальных уравнений записывают в виде матриц *(ij)* и *(jy):*

$$(ij) = \begin{vmatrix} 00 & 01 & 02 & 03 & 04 \\ 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 20 & 21 & 22 & 23 & 24 \\ 30 & 31 & 32 & 33 & 34 \\ 40 & 41 & 42 & 43 & 44 \end{vmatrix}, \tag{2.19}$$

$$(jy) = \begin{vmatrix} 0y \\ 1y \\ 2y \\ 3y \\ 4y \end{vmatrix}, \tag{2.20}$$

Элементы матриц рассчитываются по формулам:

$$(ij) \; = \sum_{u=1}^{N} x_{iu} x_{ju} \,, \tag{2.21}$$

$$(jy) = \sum_{u=1}^{N} x_{ju} y_{u} \,, \tag{2.22}$$

где *u* – номер узловых точек эксперимента;

N – общее количество узловых точек эксперимента.

Далее требуется построить обратную матрицу (C_{ij}) и рассчитать коэффициенты регрессии по формуле:

$$a_i = \sum_{j=0}^{M} [C_{ij}(ij)] \,, \tag{2.23}$$

После проведения аппроксимации с помощью критерия Фишера необходимо оценить наиболее значимые факторы и отбросить незначительные, чтобы получить окончательное уравнение регрессии. В дальнейшем его можно будет использовать для определения значения эксперимента при различных входных параметрах. Для наиболее эффективного использования уравнения регрессии требуется разработать инструмент принятия решений, в котором для расчета искомого параметра будет использовано полученное уравнение. Для этих целей используется Microsoft Excel.

ГЛАВА 3. ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА НА ПРИНЦИПАХ КОНЦЕПЦИИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Работа посвящена созданию инструментов планирования производственных процессов на этапе подготовки производства с помощью имитационного моделирования. Для этого требуется определить значения производственных параметров множества вариантов функционирования предприятия. Преимуществом имитационного моделирования является то, что оно позволяет получить расчетные значения производственных параметров вместо набора статистических данных, которых еще нет на этапе подготовки производства.

Первым шагом построения имитационной модели является исследование структуры, характеристик и параметров производственной системы. Поэтому важным этапом является построение функциональной модели, позволяющей наиболее подробно рассмотреть структуру функционирования предприятия. Функциональная модель необходима для создания имитационной модели.

Для разработки инструментов планирования процессов подготовки производства рассмотрим предметно-замкнутый механосборочный участок, который планирует производить редукторы трех типов на заказ (среднесерийное производство). Состав изделий приведен в Таблице 3. Отдельные детали, приведенные в Таблице 3, применяются только в одном из изделий, некоторые детали применяются в двух либо трех изделиях. Помимо этого в таблице указано количество деталей, входящих в состав изделий. Ряд деталей поставляется комплектами (к-т).

Таблица 3.

Состав редукторов трех типов

№	Наименование	Поставщик	А	Б	В
1	Корпус_1	1	1	-	-
2	Корпус_2	1	-	1	-
3	Корпус_3	1	-	-	1
4	Болты_1	3	1 к-т	1 к-т	-
5	Болты_2	3	-	-	1 к-т
6	Быстроходный вал	2	-	1	1
7	Тихоходный вал	2	-	1	-
8	Вал-червяк	2	1	-	-
9	Винты	4	1 к-т	1 к-т	-
10	Втулка распорная	4	-	1	-
11	Втулки	4	-	-	2
12	Гайки	3	1 к-т	1 к-т	1 к-т
13	Колесо	5	-	1	-
14	Кольцо	5	1	-	-
15	Крышка с манжетой	5	-	2	-
16	Крышка редуктора_1	1	1	-	-
17	Крышка редуктора_2	1	-	1	-
18	Крышка редуктора_3	1	-	-	1
19	Крышка смотровая	6	-	-	1
20	Крышки подшипников	3	-	1 к-т	1 к-т
21	Манжеты	5	1 к-т	1 к-т	1 к-т
22	Маслоотражатель	6	-	1	-
23	Маслоотражатель подвижный	6	-	1	-
24	Маслоотражатель неподвиж.	6	-	1	-
25	Маслоуказатель	6	1	-	1
26	Подшипники	3	1 к-т	1 к-т	-
27	Полумуфты	5	1 к-т	-	-
28	Пробка	6	1	-	-
29	Прокладка	6	1 к-т	1 к-т	1 к-т
30	Промежуточный вал	2	-	-	1
31	Шестерни покупные	4	1	-	-
32	Средний вал	2	1	-	-
33	Сапун	8	-	1	-
34	Стакан	7	-	1	-
35	Тихоходный вал	2	-	-	1
36	Фланец маслоотражателя	6	-	1	-
37	Фланец	8	-	1	-

Продолжение таблицы 3.

№	Наименование	Поставщик	А	Б	В
38	Червячное колесо	2	1	-	-
39	Шайбы	3	1 к-т	1 к-т	1 к-т
40	Шпонки	3	1 к-т	1 к-т	1 к-т
41	Штифты	4	-	-	1 к-т
42	Шестерни	Собственные	-	1	1

Каждое изделие производится путем сборки из ряда деталей, которые закупаются у поставщиков или производятся непосредственно на участке. Для редукторов типов Б и В технология изготовления предусматривает собственное производство шестерней, которые изготавливаются методом штамповки. Редуктор типа А полностью состоит из покупных компонентов. Технологическая схема производства комплектующих деталей и самой сборки иллюстрируется схемой, изображенной на Рисунке 3.1.

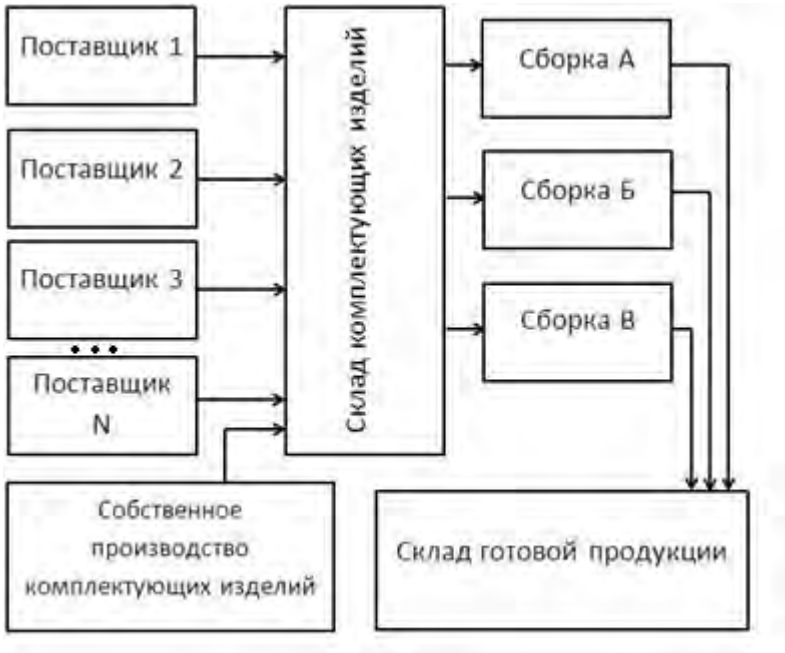


Рисунок 3.1. Технологическая схема производства

Для исследования всех взаимосвязей и оптимизации ключевых показателей эффективности работы производственного участка необходимо прибегнуть к имитационному моделированию. Однако структура данной системы весьма сложная. Поэтому для наиболее точного построения модели важно определить общую схему функционирования производства, провести первоначальную детализацию различных элементов данной системы. Это

можно осуществить с помощью функционального моделирования. Наиболее подходящим способом для этого является метод IDEF0.

3.1. Построение функциональной модели сборочного производства нескольких видов продукции

Основной задачей функционального моделирования на первом этапе является построение контекстной диаграммы «произвести продукцию трех типов» и детализация всего бизнес-процесса. Функциональный блок диаграммы верхнего уровня А0 представлен на Рисунке 3.2.

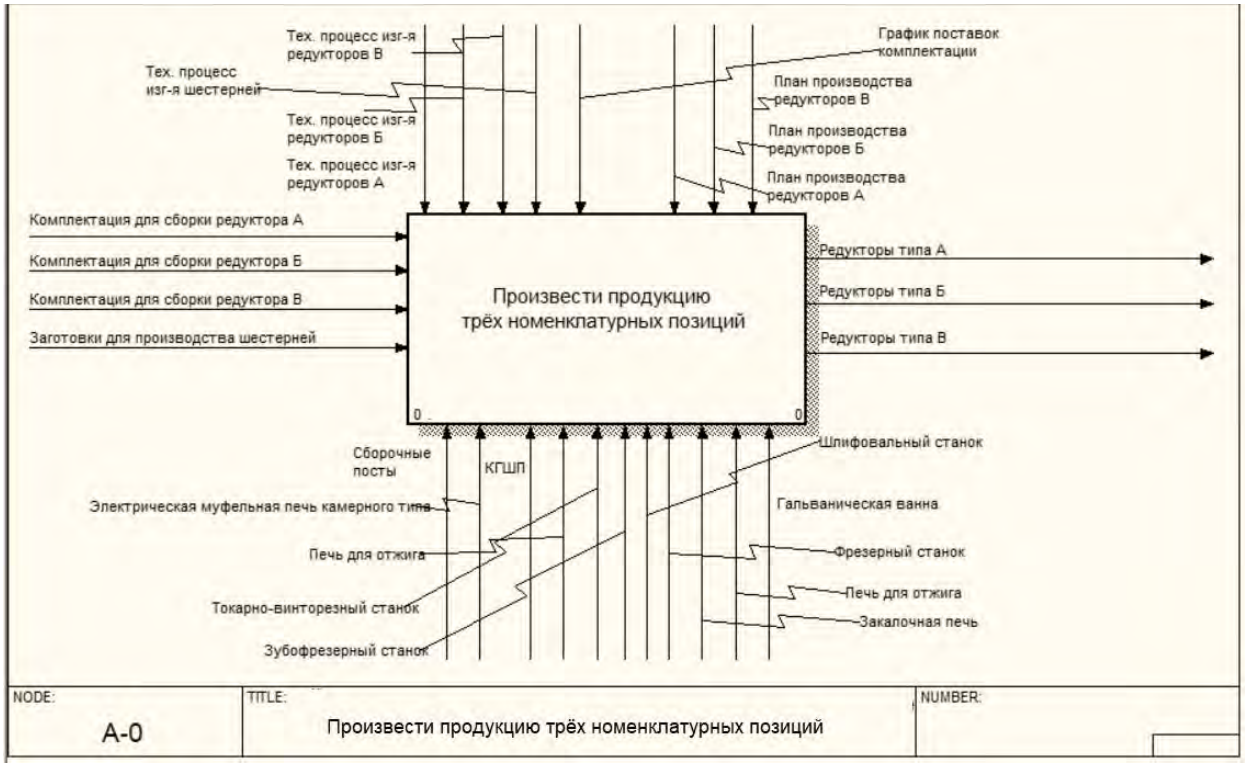


Рисунок 3.2. Контекстная диаграмма

Декомпозиция контекстной диаграммы состоит из четырех основных параллельных процессов (Рисунок 3.3):

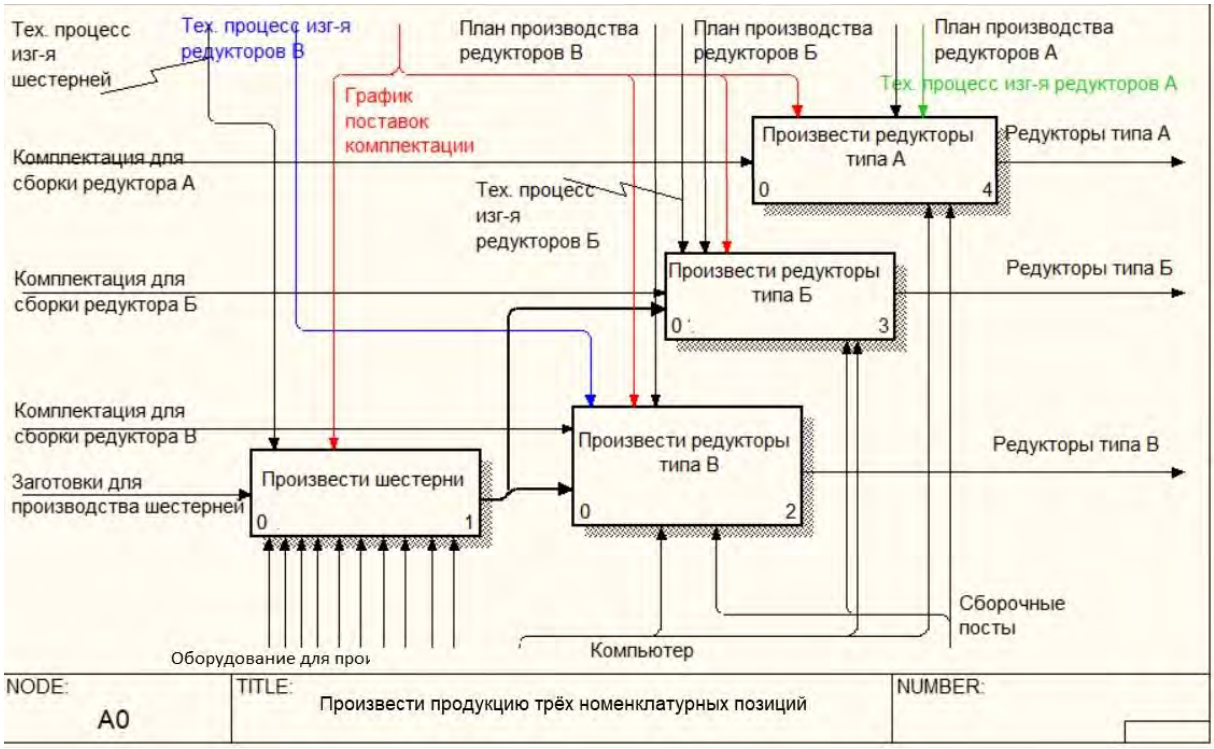


Рисунок 3.3. Диаграмма основных процессов

Каждый из указанных процессов рассматривается более подробно и делится на подпроцессы. Диаграмма производства шестерней изображена на Рисунке 3.4.

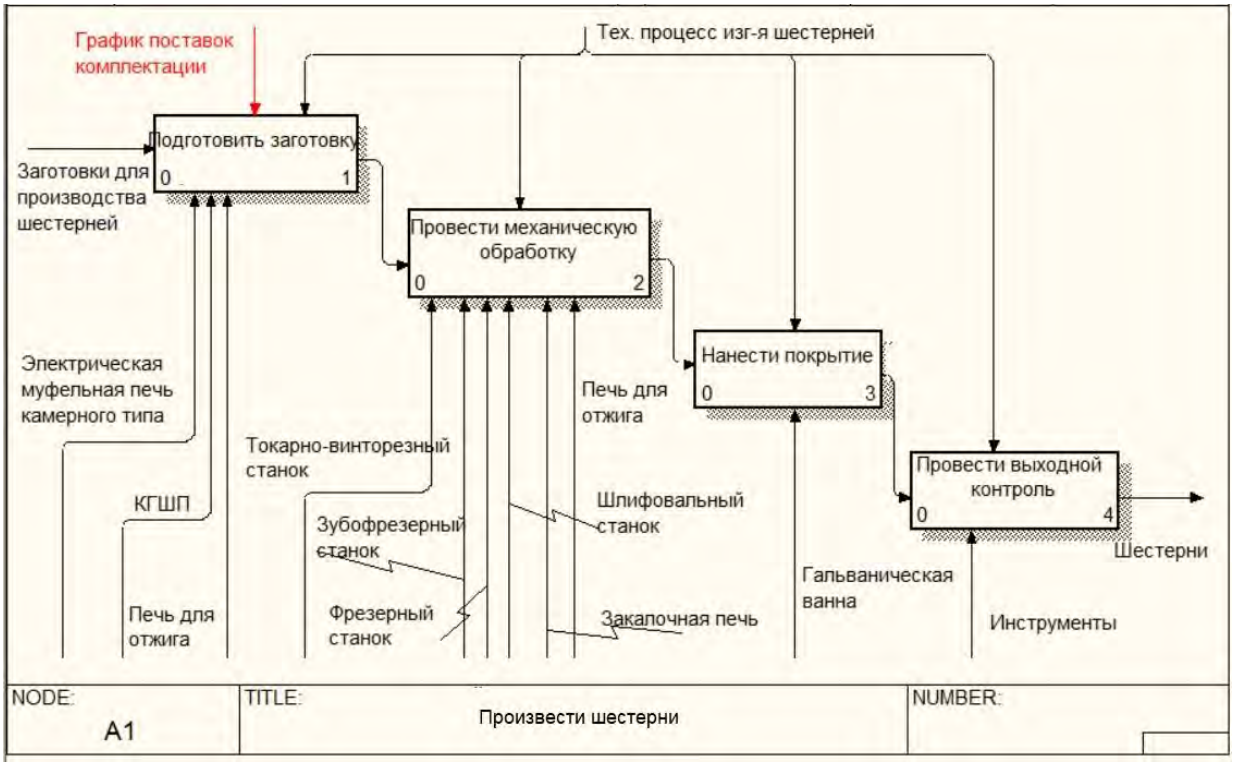


Рисунок 3.4. Диаграмма процесса производства шестерней

Диаграмма сборки редукторов типа А изображена на Рисунке 3.5.

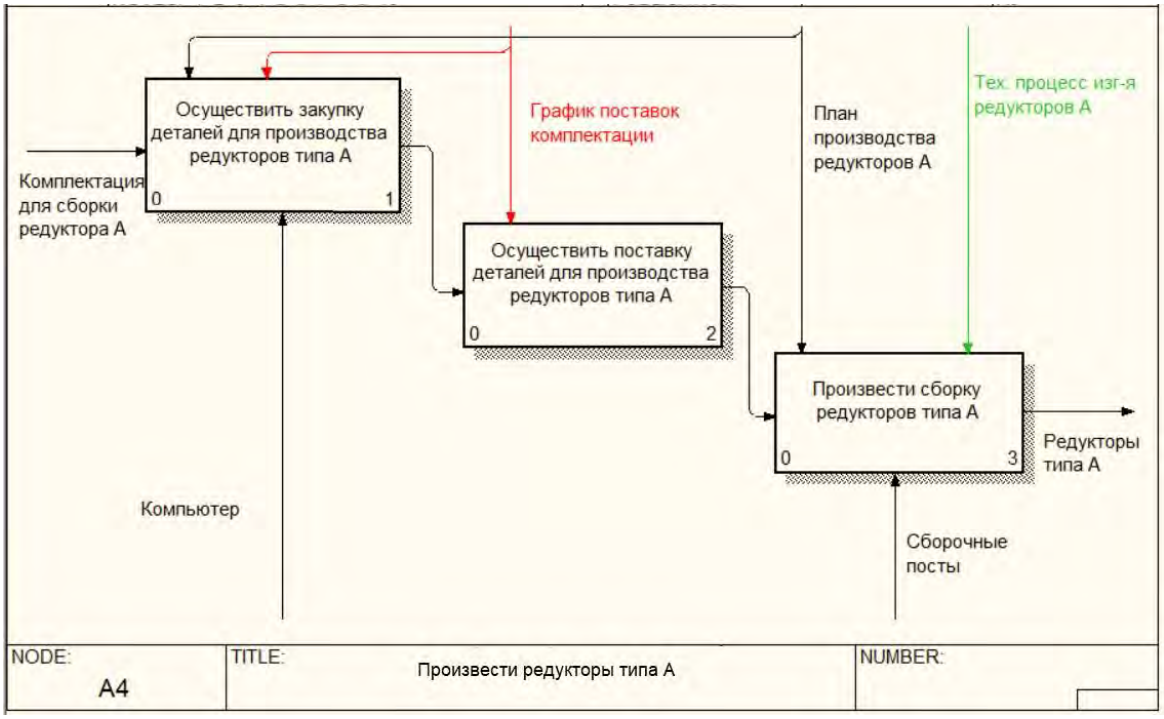


Рисунок 3.5. Диаграмма процесса сборки редукторов типа А

Основные этапы сборки редукторов трех типов идентичны и различаются только составом комплектующих и длительностью сборки. Процесс сборки редукторов типа Б представлен на Рисунке 3.6.

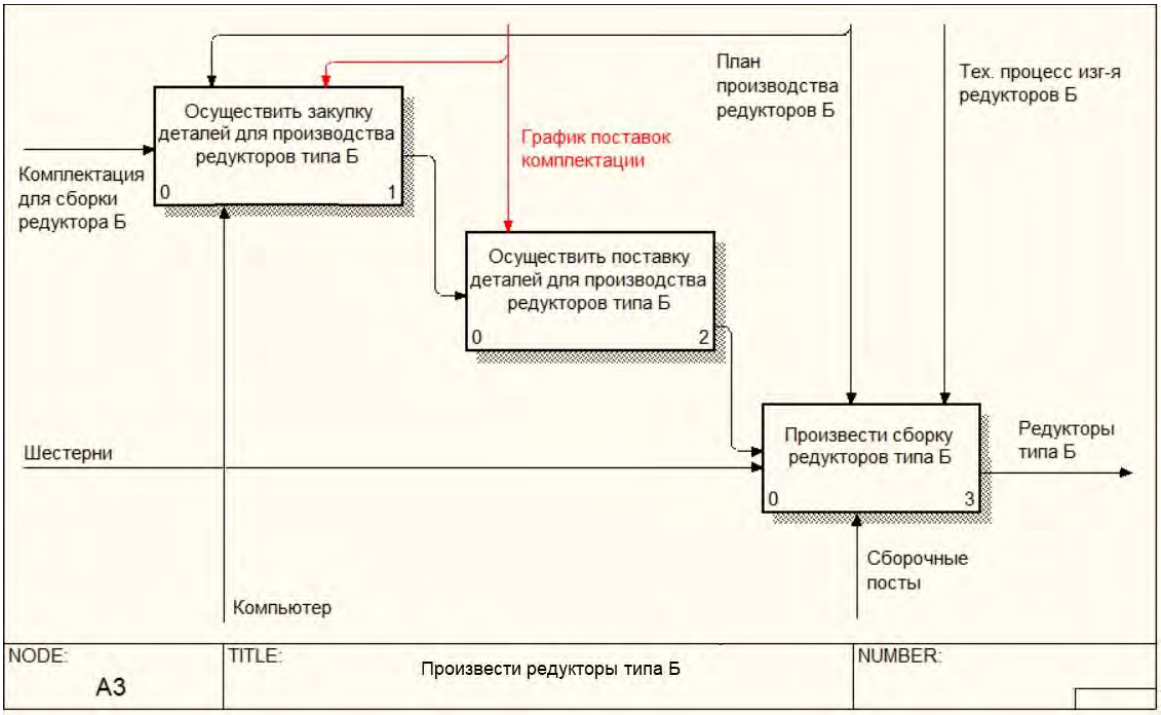


Рисунок 3.6. Диаграмма процесса сборки редукторов типа Б

Диаграмма процесса закупки представлена на Рисунке 3.7.

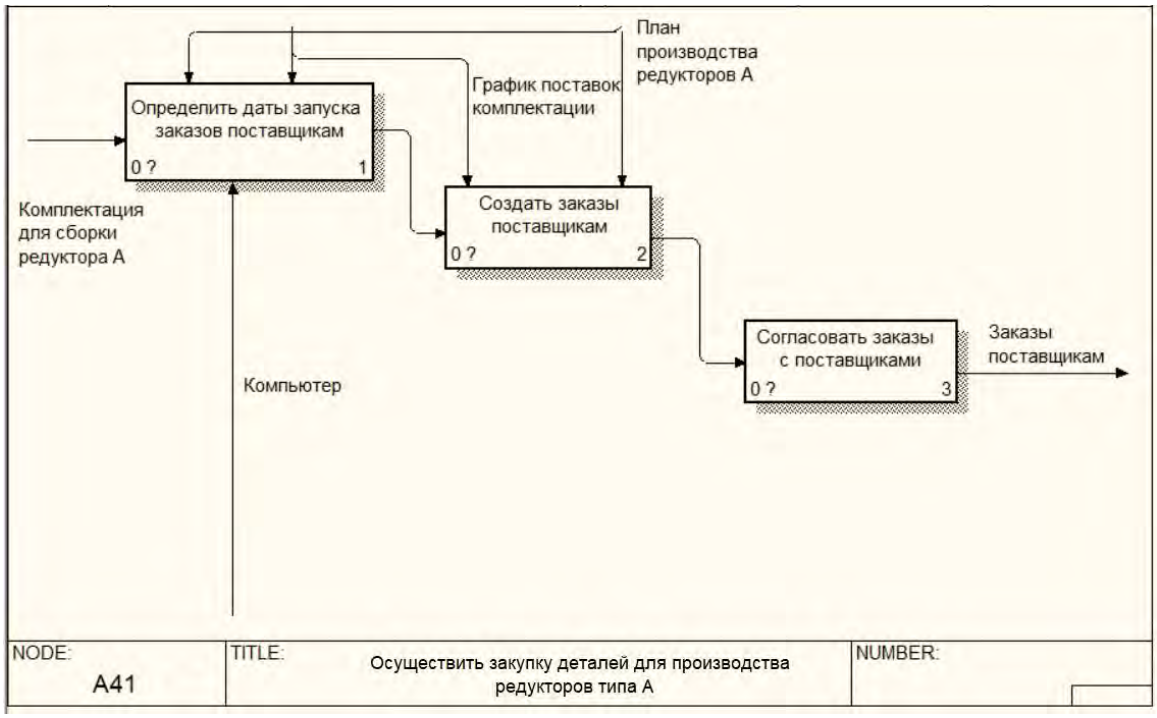


Рисунок 3.7. Диаграмма процесса закупки комплектующих изделий для редукторов типа А

С помощью методики IDEF0 основной процесс разбит на отдельные стадии. Для создания взаимодействий между этими стадиями и оптимизации ключевых показателей необходимо создать имитационную модель. При этом, разработанный бизнес-процесс по методике IDEF0 указывает на необходимость выделения уровней системы, т.е. на переход к многоуровневой имитационной модели.

На основе полученных результатов можно выделить три задачи, которые делятся на этапы:

1. Закупка комплектующих изделий.
   1.1 Согласование заказов и поставка комплектующих для основного производства.
   1.2 Учет покупных комплектующих на складе.
   1.3 Передача покупных комплектующих на производство.
2. Производство шестерней.
3. Основное производство.

3.1 Производство редукторов типа А.

3.2 Производство редукторов типа Б.

3.3 Производство редукторов типа В.

При построении имитационной модели необходимо опираться на выделенные этапы.

3.2. Построение имитационной модели

В основе предлагаемого метода лежит использование многоуровневого имитационного моделирования. Принципиальное преимущество такого подхода заключается в разбиении основного процесса на этапы, определенные в параграфе 3.1. При этом каждый этап представляет собой отдельную задачу, которая может моделировать исходные данные для последующей задачи. В отличие от метода IDEF0, весь процесс строится в обратном порядке, от подпроцессов к основной задаче. После того, как все этапы будут смоделированы, переходят к созданию основных взаимосвязей. Путем объединения всех этапов достигается основная цель поставленной задачи.

Первым этапом является оформление заказов и поставка комплектующих для основного производства. Рассмотрим процесс создания заказов поставщикам. При наличии большого количества поставщиков целесообразно создать шаблон процесса оформления заказа и поставки комплектующих изделий, который будет использован для каждого поставщика.

Создадим новый класс активного объекта и назовем его «ЗаказПоставщику» (Рисунок 3.8).

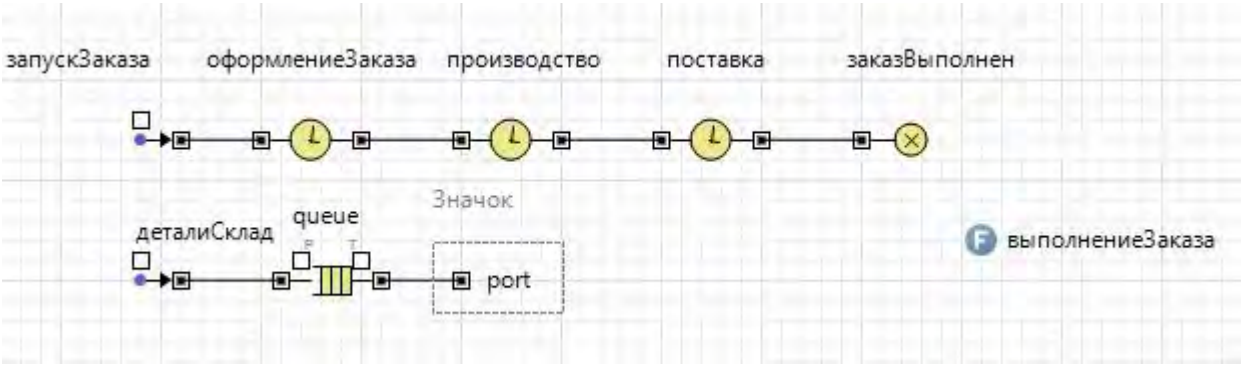


Рисунок 3.8. Диаграмма «ЗаказПоставщику»

Первая цепочка элементов диаграммы представляет собой процесс заказа и поставки комплектующих на склад. При этом можно определить необходимое время для каждого из этапов, таких как оформление и согласование заказа, производство деталей поставщиком, транспортировка.

В связи с тем, что базовый класс заявок в Anylogic не имеет нужных свойств характеризующих поступающие детали, создадим два новых Java класса «Деталь» и «Номенклатура», которые будут описывать детали и заказы, содержащие эти детали. На данном этапе в качестве заявок представлены заказы поставщикам. Для учета поставленных деталей создан инструмент – функция «выполнениеЗаказа», которая будет перебирать заявки – детали, входящие в комплектацию. Код функции представлен на Рисунке 3.9:

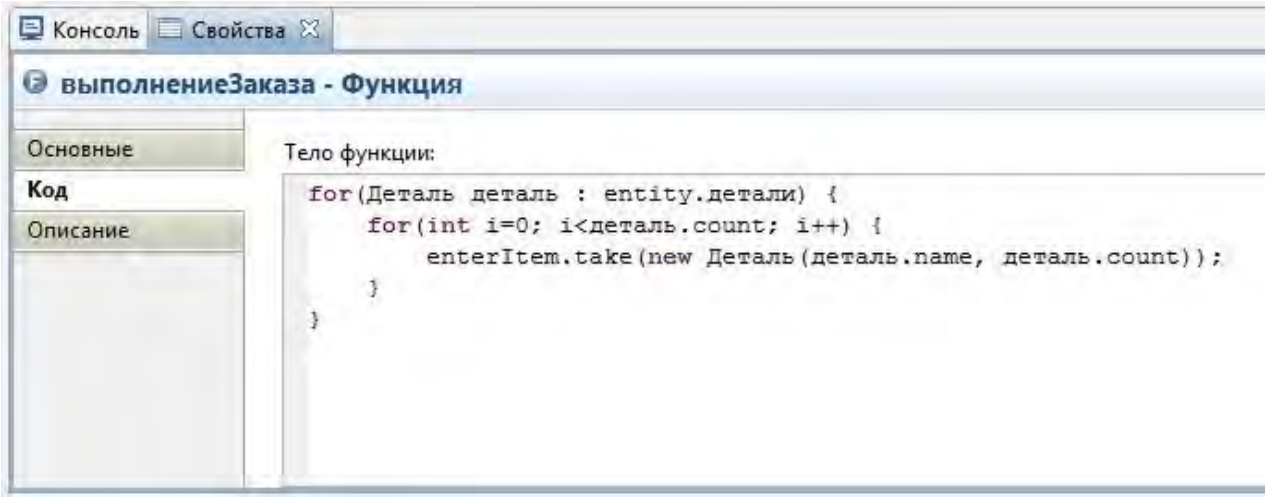


Рисунок 3.9. Тело функции «выполнениеЗаказа»

Каждый поставщик может изготавливать несколько типов деталей, поэтому для размещения деталей на складе необходима предварительная сортировка. Вторая цепочка диаграммы на Рисунке 3.8 отражает передачу поступающих на склад комплектующих деталей на сортировку.

Класс активного объекта «ЗаказПоставщику» можно использовать в других классах активного объекта, поскольку вторая цепочка завершается «портом». Это позволяет использовать созданный класс в качестве шаблона и исключить построение одинаковых диаграмм.

Для сортировки и учета комплектующих на складе необходимо создать второй класс активного объекта «ВсеДетали», распределяющий всю номенклатуру поставляемых деталей по своим ячейкам. Т.к. все поставщики работают по схеме, построенной в классе активного объекта «ЗаказПоставщику», создадим из него вложенные объекты и построим схему сортировки комплектующих (Рисунок 3.10).

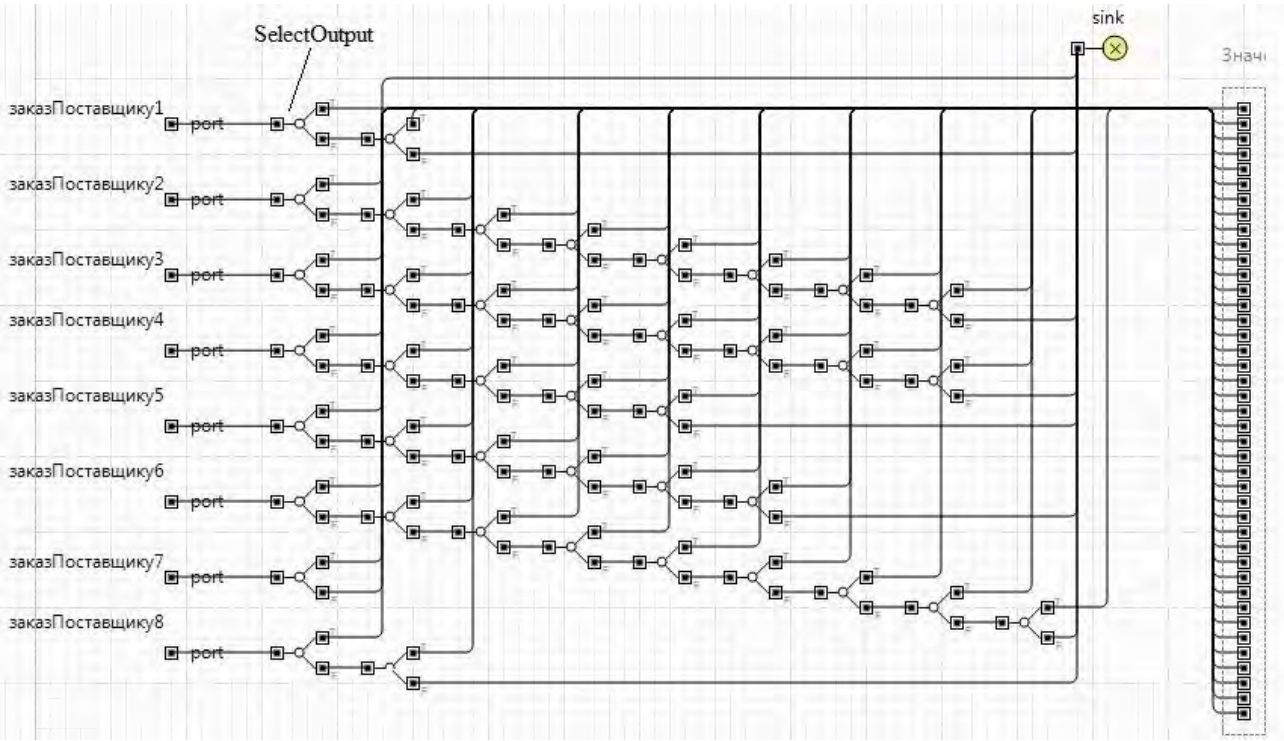


Рисунок 3.10. Диаграмма сортировки и учета комплектующих

Принцип работы диаграммы:

Сортировка деталей, поступающих от поставщиков осуществляется с помощью элементов SelectOutput. Блок-схема работы диаграммы представлена на Рисунке 3.11.

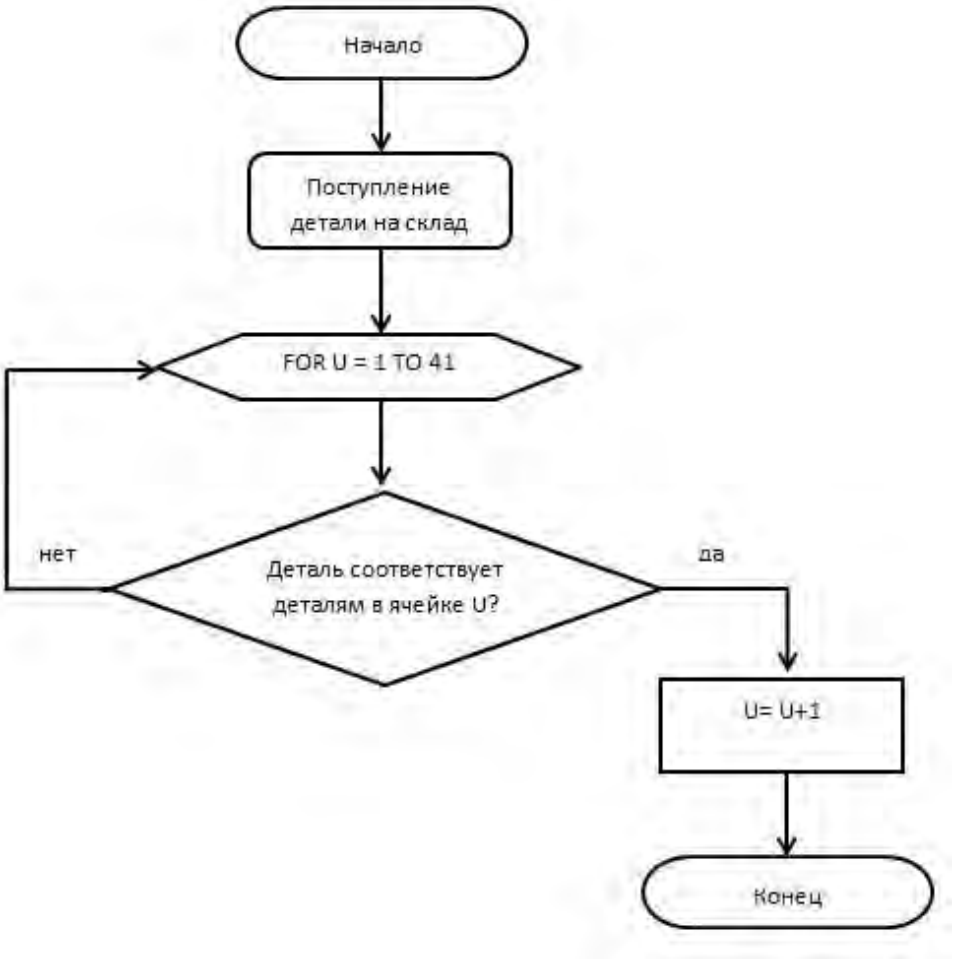


Рисунок 3.11. Блок-схема сортировки деталей на складе

Операция «Поступление детали на склад» на диаграмме сортировки (Рисунок 3.10) отображена с помощью вложенных объектов «заказПоставщику». Каждый вложенный объект – это выход одной процессной диаграммы. Т.е. заявка, покидающая диаграмму «заказПоставщику», одновременно выходит из восьми портов и проходит проверку на соответствие той или иной детали в элементах SelectOutput. При этом условие выполняется только в одном из *n=42* элементов SelectOutput. В случае выполнения условия, заявка-деталь передается в соответствующий

порт-ячейку для дальнейшей передачи на соответствующую сборку. Во всех остальных случаях деталь передается в элемент sink и далее не используется. Таким образом, для сортировки каждая поступающая на склад деталь имеет в рассматриваемом случае 8 аналогов, из которых только один остается для дальнейшей обработки.

Предложенная методика моделирования процесса поставки комплектующих на склад позволяет реализовать один из принципов концепции бережливого производства – адресное хранение деталей на складе. С помощью того, что каждый выходной порт соответствует только одному наименованию, происходит сортировка комплектующих. При необходимости порты можно разделить на товарные группы. Преимущество этого метода в том, что он позволяет организовать точный учет комплектующих и рационально использовать складские площади.

Для моделирования процесса распределения покупных деталей создан дополнительный класс активного объекта «Склад». На Рисунке 3.12 представлена диаграмма этого процесса.

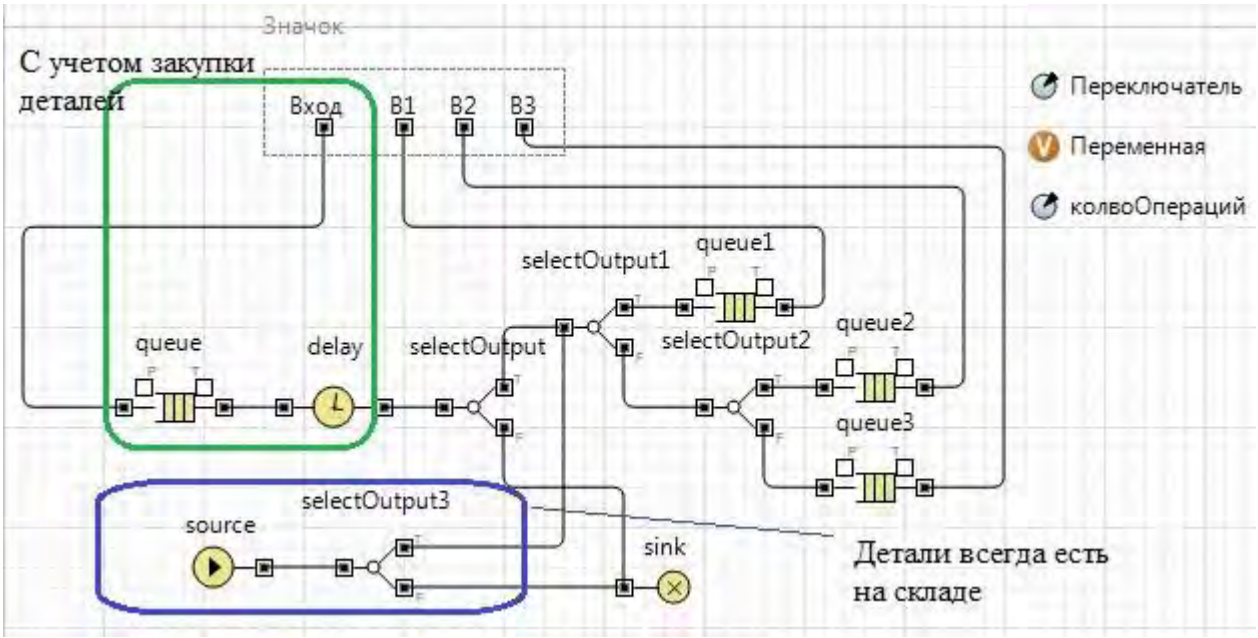


Рисунок 3.12. Диаграмма работы склада

Диаграмма содержит 4 порта:

«Вход» - порт, через который заявки-детали передаются на распределение перед подачей на производство.

Порты-выходы «B1», «B2» и «B3» используются для передачи комплектующих непосредственно на производство.

Данная диаграмма содержит два варианта поступления деталей на склад:

1. Все детали всегда есть на складе. Нет необходимости в моделировании процесса закупки (выделено синим цветом на Рисунке 3.12)

2. Необходимо моделировать процесс закупки деталей (т.е. заявки-детали передаются из класса активного объекта «заказПоставщику» или из цепочки производства шестерней (выделено зеленым цветом на Рисунке 3.12)

Модель построена таким образом, что при необходимости можно отказаться от учета работы с поставщиками. Для этого на странице запуска эксперимента установлен переключатель (Рисунок 3.13).

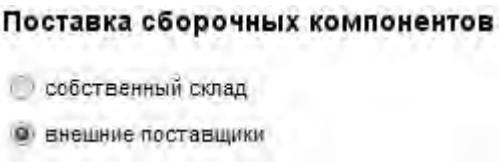


Рисунок 3.13. Переключатель

С помощью параметра «переключатель» на классе активного объекта «Склад» (Рисунок 3.12) происходит выбор необходимого варианта. Переключатель определяет, какой из двух источников передает заявки-детали в объект selectOutput. Далее происходит процесс определения потребностей в деталях. Если поступающая деталь требуется только для одного изделия, то для него строится одна связка «деталь-изделие». Траектория движения деталей показана на рисунке 3.14.

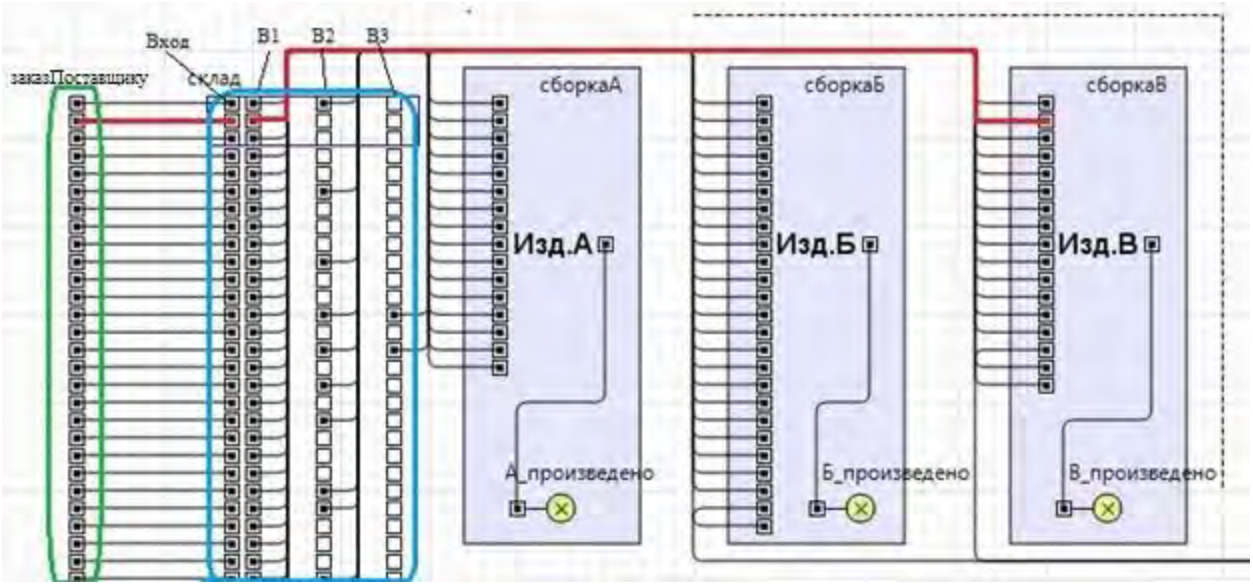


Рисунок 3.14. Одна связка «деталь-изделие»

Основной класс активного объекта «Main» содержит копии класса активного объекта «Склад» для каждого порта, моделирующего процесс поставки детали от поставщика. Например, быстроходный вал используется только для сборки редуктора типа В, поэтому порт соответствующей детали имеет только одну связку с изделием, а процесс распределения этой детали моделируется следующим образом:

1. Моделирование закупки детали в классе активного объекта «заказПоставщику».

2. Передача заявки-детали в класс активного объекта «Склад» через порт «Вход» для дальнейшего распределения согласно потребностям производства.

3. Определение потребности в детали в классе активного объекта «Склад».

4. Передача детали на сборку редуктора типа В через порт «В1».

На Рисунке 3.15 выделены детали, используемых для двух и трех изделий.

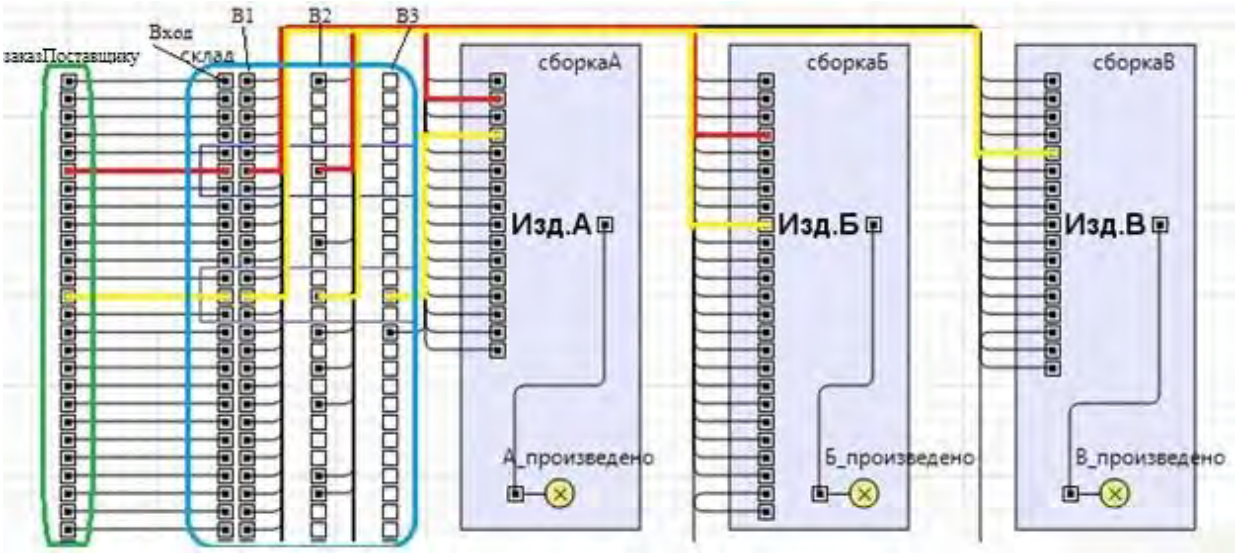


Рисунок 3.15. Две и три связки «деталь-изделие»

Если какая-либо деталь используется в сборке двух изделий, то она имеет две связки (красная линия). Если деталь используется в сборке трех изделий, то она имеет три связки (желтая линия). При этом модель определяет наиболее предпочтительный маршрут для поступившей детали путем анализа обеспеченности машинокомплектов на производстве. Деталь передается на сборку того редуктора, для которого требуется наименьшее количество прочих деталей.

Для комплектации основного производства требуется не только поставить покупные комплектующие детали, но и произвести шестерни. Диаграмма производства шестерней представлена на Рисунке 3.16.

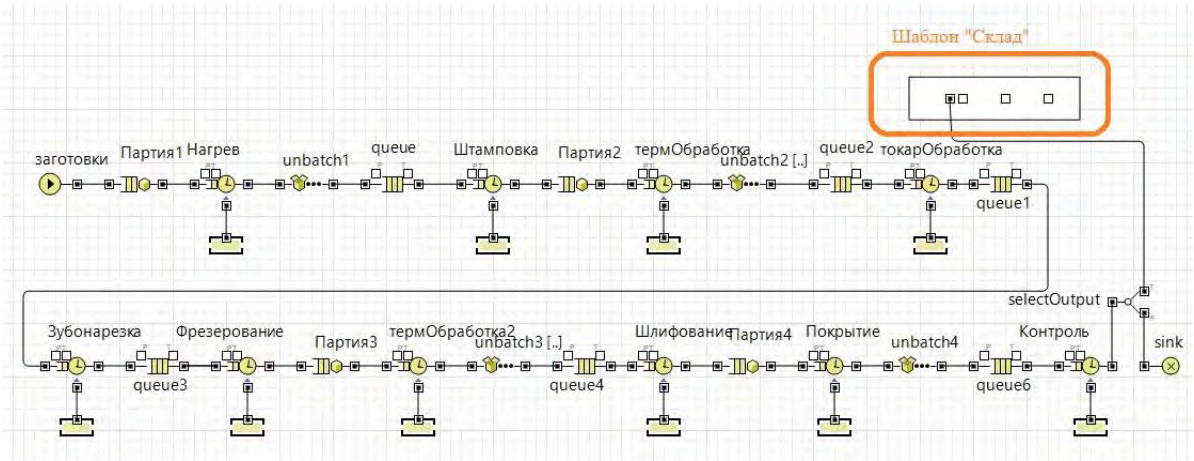


Рисунок 3.16. Диаграмма производства шестерней

Весь процесс производства шестерней разбит на основные этапы:

1. Передача заготовок на производство.
2. Нагрев партии заготовок.
3. Штамповка.
4. Термическая обработка.
5. Токарная обработка.
6. Зубонарезка.
7. Фрезерование.
8. Термическая обработка.
9. Шлифование.
10. Нанесение покрытия.
11. Контроль качества.
12. Передача шестерней на склад готовой продукции.

Процесс производства реализуется во времени, поэтому длительность выполнения каждой операции задается с помощью объектов service, которые задерживают заявку-заготовку на указанное в соответствующем параметре время. Объект batch накапливает необходимое количество деталей и преобразует их в партию для последующей термообработки. По завершению операции с помощью объекта unbatch партия делится на количество деталей, входящих в нее. После объекта service «Контроль» изделия сортируются: на склад готовой продукции или в брак.

Для моделирования процесса сборки редукторов типа А необходимо создать новый класс активного объекта «СборкаА». Готовая диаграмма представлена на Рисунке 3.17.

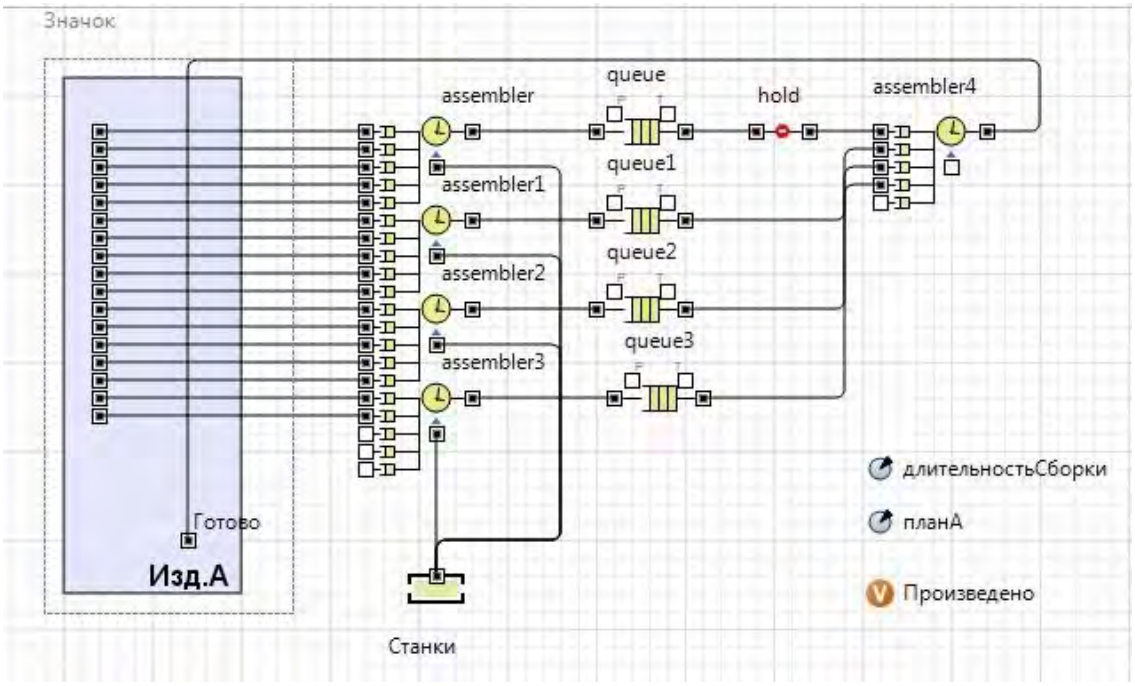


Рисунок 3.17. Схема сборки редукторов типа А

Каждый порт в левой части диаграммы соответствует одному типу комплектующего изделия. Для моделирования процесса сборки нескольких комплектующих в одно изделие используются элементы assembler. Разработанная схема позволяет учесть время, необходимое на сборку, количество рабочих мест, а также факт выполнения производственной программы. Как только количество произведенной продукции будет равно запланированному объему производства, весь процесс сборки остановится. Данный принцип реализован с помощью элемента hold и заданного в assembler4 условия:

Произведено++;

if (Произведено >= планА) hold.setBlocked(true);

Процессы сборки редукторов типов Б и В моделируются аналогичным способом. Отличие заключается только в количестве комплектующих изделий. В случае возникновения очереди из разных типов редукторов перед освободившемся рабочим местом приоритет отдается тому изделию, которое имеет наименьший процент выполнения производственной программы. Готовые диаграммы представлены на Рисунках 3.18-3.19.

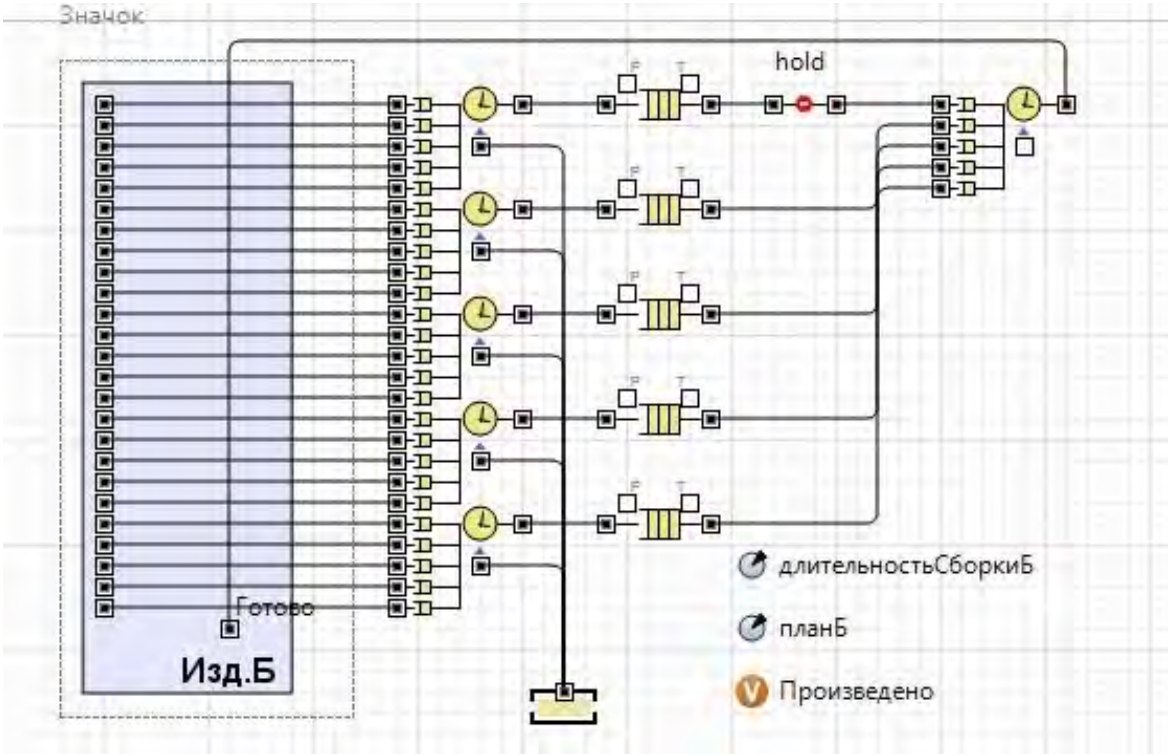


Рисунок 3.18. Схема сборки редукторов типа Б

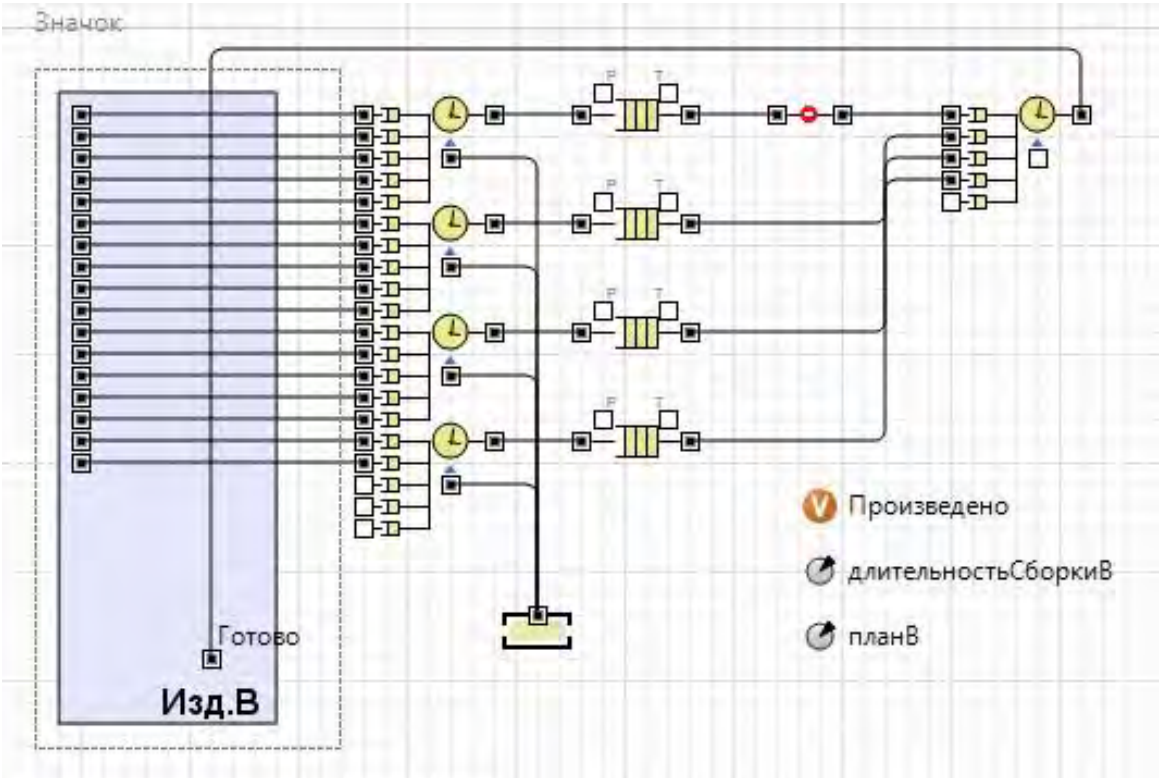


Рисунок 3.19. Схема сборки редукторов типа В

После того, как все отдельные этапы смоделированы, необходимо построить оставшиеся взаимосвязи для всего производственного процесса.

Для этого на диаграмме Main выстроим вложенные объекты из ранее созданных классов активного объекта (Рисунок 3.20).

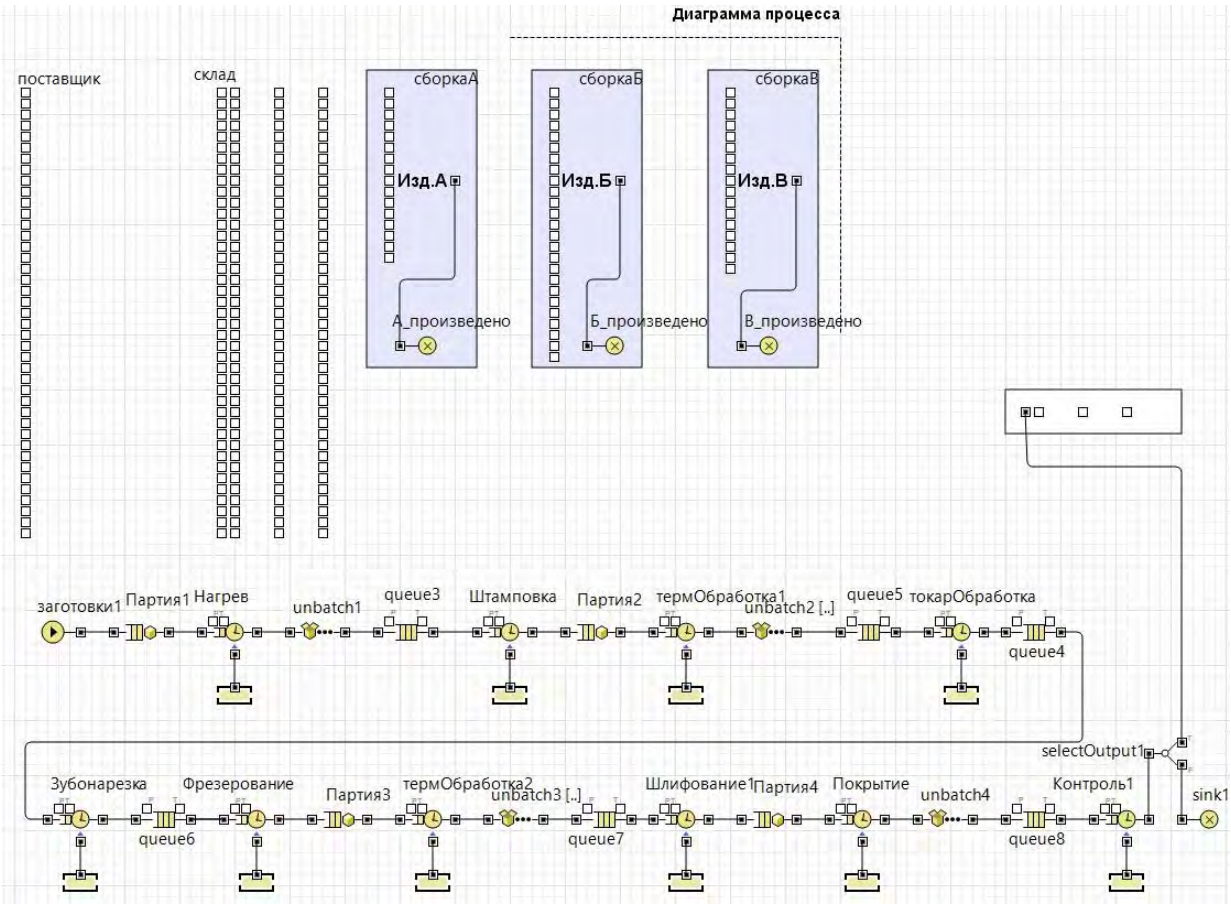


Рисунок 3.20. Построение основной схемы

Первым, согласно логике построения, добавляем класс «заказПоставщику». Далее для каждого типа комплектующего созданный ранее шаблон «Склад». Следом добавляем классы, моделирующие сборку редукторов, а также схему производства шестерней.

После того, как основные этапы сведены на одном классе активного объекта, создадим взаимосвязи, соединив «порты» склада с соответствующими «портами» на сборках по каждому изделию (Рисунок 3.21).

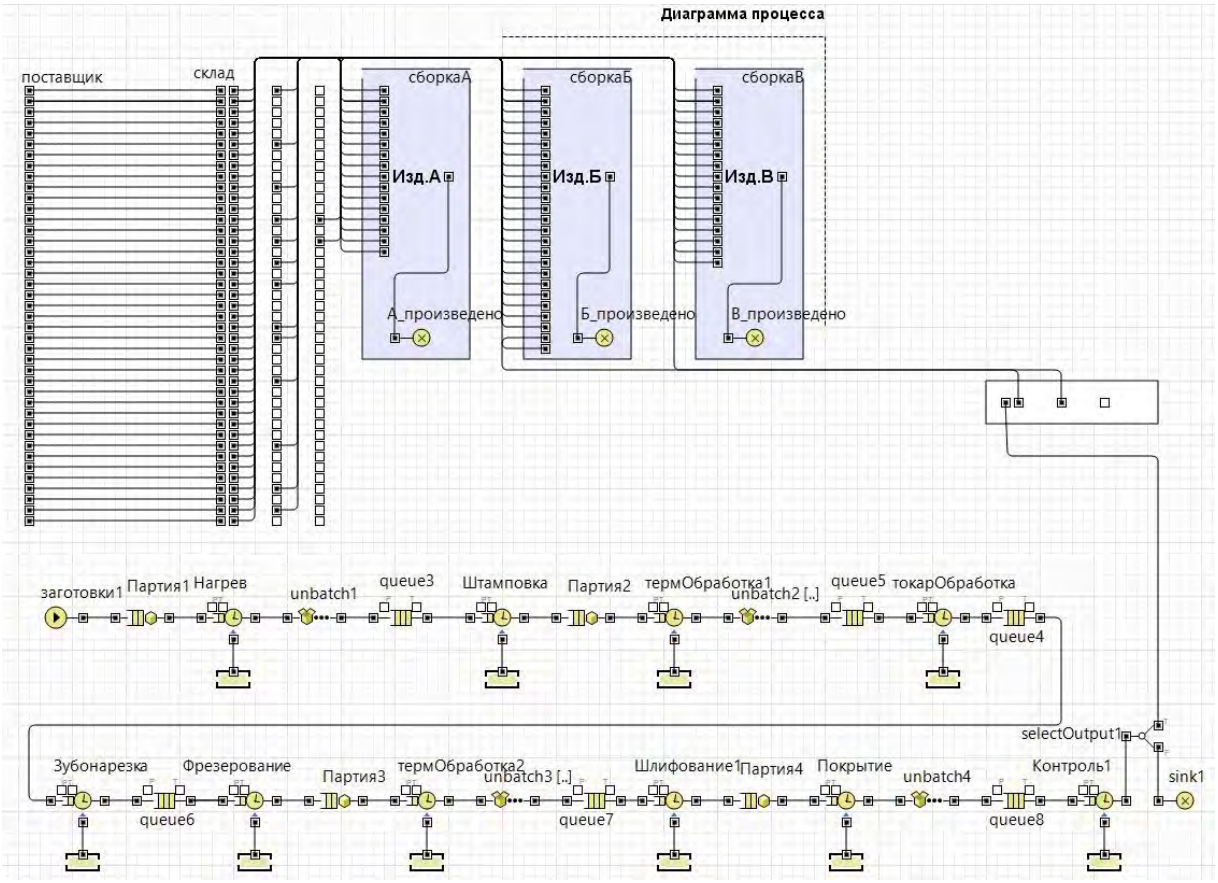


Рисунок 3.21. Схема производства

Разработанная многоуровневая имитационная модель позволяет визуализировать работу предприятия на каждом участке производственного процесса. Для моделирования результатов работы с различными входными параметрами можно вручную изменять значения заданных условий с помощью формы запуска (Рисунок 3.22).

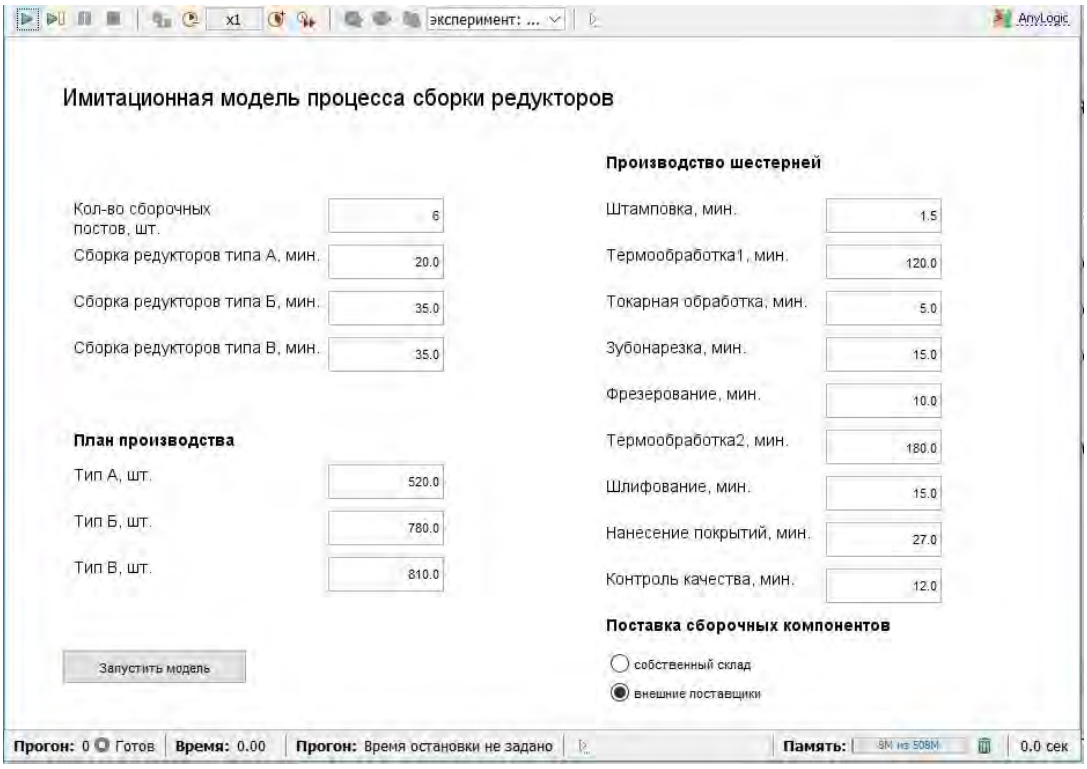


Рисунок 3.22. Окно запуска имитационного моделирования процесса

Окно запуска позволяет изменять значения параметров разработанной модели до запуска симуляции процесса. Также оно содержит переключатель выбора способа поставки комплектующих на Рисунке 3.13.

Построенная имитационная модель позволяет синхронизировать по времени все выполняемые операции и представляет собой часть системы принятия управленческих решений, позволяющих оперативно проводить расчеты по текущим значениям производственных параметров и получать расчетные значения времени выполнения производственного задания с учетом вероятностного подхода к расчету времени. Однако построенная имитационная модель жестко привязана к количеству сборочных постов, которое не всегда оптимально для задаваемой программы выпуска продукции. Поэтому после верификации результатов разработанной модели требуется построить оптимизационную модель, целью которой является определение рационального количества рабочих мест.

3.3. Верификация построенной математической модели производственного процесса

В целях проверки достоверности результатов моделирования рассмотрим более подробно процессы изготовления шестерней и редукторов. Рассчитаем некоторые параметры производственного процесса и сравним их с показателями, полученными с помощью разработанной имитационной модели. Исходные данные приведены в Таблицах 4 – 5.

Таблица 4.

Исходные данные производственного процесса изготовления шестерни

Обозначение	Расшифровка	Значение
дШтамп	Длительность штамповки заготовок	1,5 мин.
дТермо	Длительность термической обработки	120 мин.
РазмерПартии	Количество заготовок, одновременно поступающих на термическую обработку	100 шт.
дТокар	Длительность токарной обработки заготовок	5 мин.
дЗуб	Длительность зубонарезки	15 мин.
дФрез	Длительность фрезерования	10 мин.
дТермо2	Длительность термической обработки	180 мин.
дШлиф	Длительность шлифования заготовок	15 мин.
дПокрыт	Длительность нанесения защитного покрытия	27 мин.
дКонтр	Длительность проведения выходного контроля	12 мин.

Таблица 5.

Исходные данные производственного процесса сборки редукторов

Обозначение	Расшифровка	Значение
планА	План производства редукторов типа А	520 шт.
планБ	План производства редукторов типа Б	780 шт.
планВ	План производства редукторов типа В	810 шт.
длитСбА	Длительность сборки редукторов типа А	20 мин.
длитСбБ	Длительность сборки редукторов типа Б	35 мин.
длитСбВ	Длительность сборки редукторов типа В	35 мин.

В Таблицах 4 – 5 приведены базовые значения длительностей этапов производственного процесса. В разработанной имитационной модели длительности указаны с учетом треугольного закона распределения случайных величин, который позволяет варьировать время выполнения операции в заданных границах. Границы треугольного закона распределения заданы формулой 1.1. В связи с заданным вероятностным распределением, результаты, полученные в имитационной модели, могут незначительно отличаться от расчетных.

Для сборки редукторов требуется предварительно обеспечить производство оборудованием и всеми необходимыми комплектующими деталями. Каждый сборочный пост позволяет производить сборку любого из трех типов редукторов. Для проверки адекватности разработанной имитационной модели решим задачу на примере выпуска одного изделия:

Задача 1

Определим максимально возможный объем производства редукторов типа А для первого месяца функционирования предприятия при наличии трех сборочных постов. Для этого необходимо рассчитать фонд рабочего времени в минутах, в соответствии с модельным временем.

При 40-часовой рабочей неделе общий фонд рабочего времени составляет:

$$Ф_{рв} = Д \cdot 480 = 11040 \text{ мин.}, \quad (3.1)$$

где Д – количество рабочих дней.

Для расчета объема выпуска изделий в имитационной модели используются значения параметров, представленные в таблице 3.1. Диаграмма процесса со всеми рассчитанными показателями представлена на Рисунке 3.23.

Результат имитационной модели: произведено 1660 шт. редукторов типа А при условии отсутствия возможных конфликтов со стороны редукторов типов Б и В, а также при наличии всей необходимой комплектации на складе. В целях проверки адекватности полученных данных рассчитаем время, требуемое для производства 1660 редукторов I типа:

$$T_{\text{A}} = \frac{\text{планА} \cdot \text{длитСбА}}{cRm}, \tag{3.2}$$

$$\text{T}_{\text{A}} = \frac{1660 \cdot 20}{3} = 11066{,}7 \text{ мин.}, \tag{3.3}$$

Отклонение в 26,6 мин. вызвано вероятностным подходом распределения времени, заданным в разработанной имитационной модели, что дает более объективные данные. Данное отклонение не является критичным, что подтверждает достоверность результатов имитационной модели.

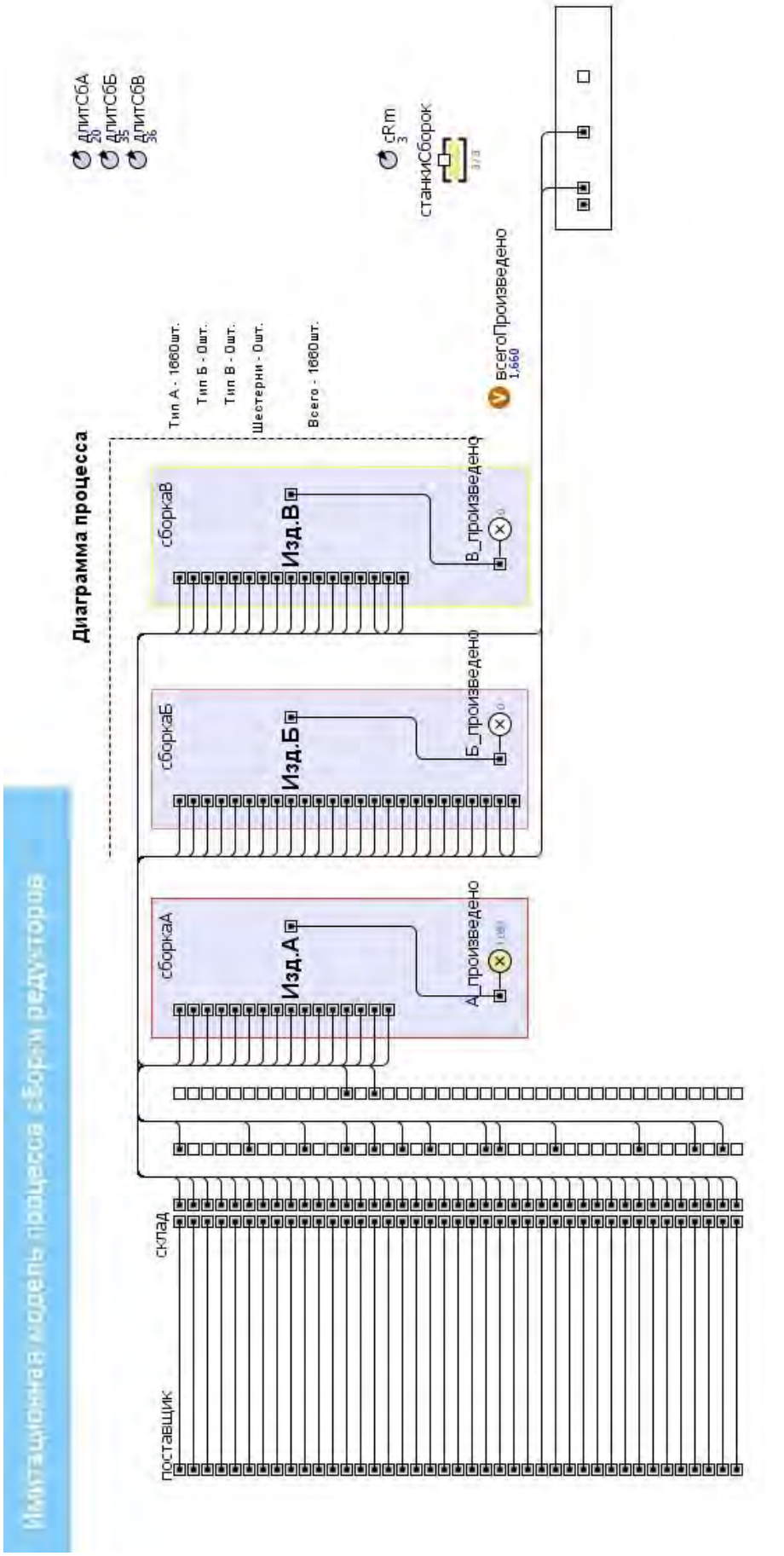


Рисунок 3.23. Диаграмма процесса определения оптимального плана производства на месяц при cRm=3

В следующей задаче реализуем особенности имитационного моделирования, добавляя условия по возможным возникающим конфликтам на рабочих местах и задержкам поставок комплектации.

Задача 2

Рассмотрим ситуацию, при которой предприятию поступили заказы на 321 редукторов I типа, 377 редукторов II типа и 391 редукторов III типа. Определим требуемое время для выполнения установленного плана при наличии трех сборочных постов расчетным путем:

$$T_{\text{общ}} = \frac{\text{планА} \cdot \text{длитСбА} + \text{планБ} \cdot \text{длитСбБ} + \text{планВ} \cdot \text{длитСбВ}}{cRm}, \quad (3.4)$$

$$\text{Т}_{\text{общ}} = \frac{321 \cdot 20 + 377 \cdot 35 + 391 \cdot 35}{3} = 11100 \text{ мин.}, \quad (3.5)$$

Сравним полученное значение с результатами имитационного моделирования. Для этого запустим эксперимент с заданной программой производства. На Рисунке 3.24 отражена диаграмма производственного процесса в момент выполнения плана выпуска изделий. В нижней строке диаграммы указано модельное время выполнения задания – 11554,35 мин.

Разница результатов, полученных с помощью имитационного моделирования и расчетным путем составляет 454,35 мин. Данное отклонение объясняется затратами времени на ожидание комплектации и возможные конфликты выбора очередного изделия, производимого на сборочном посту.

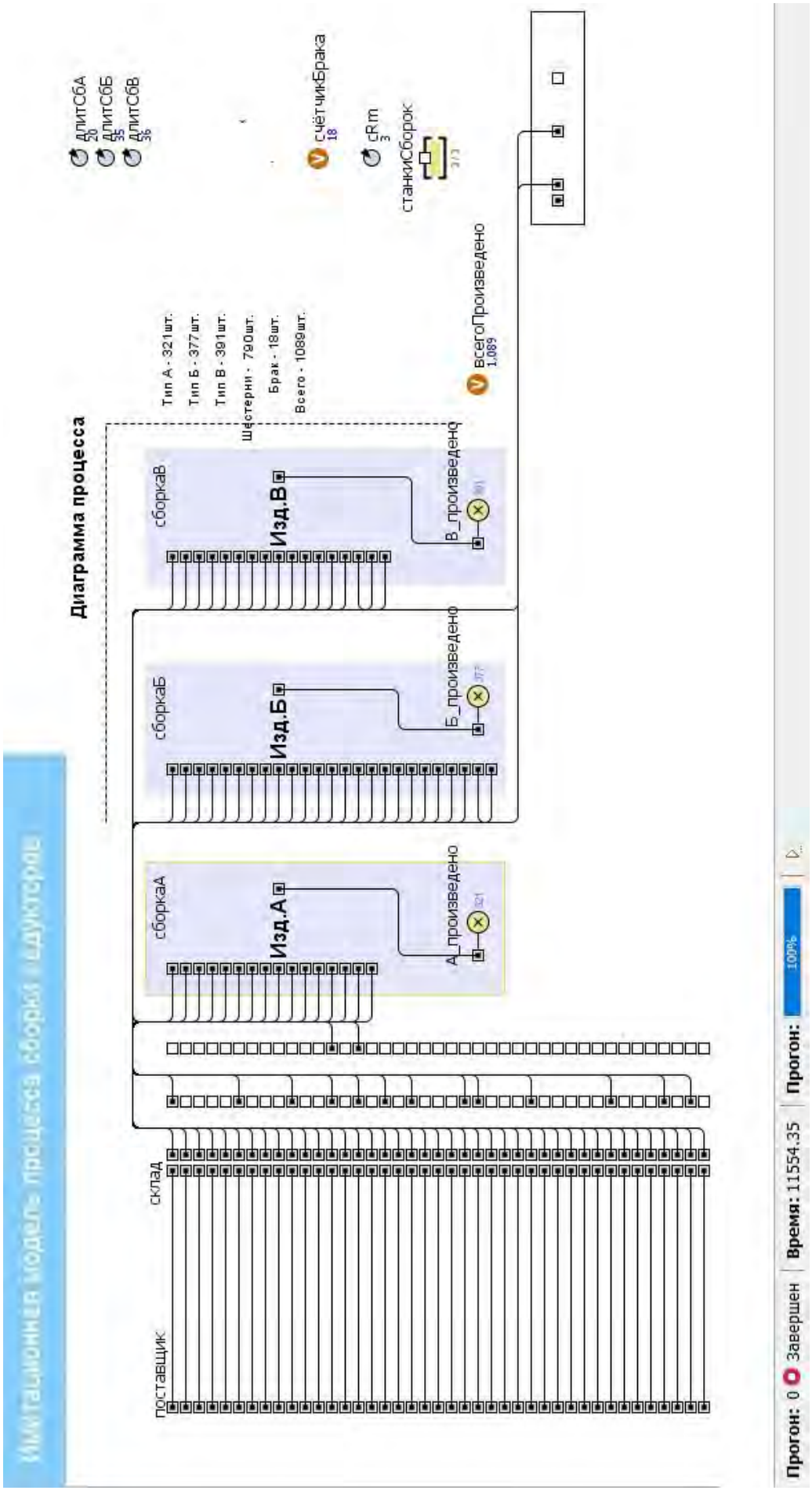


Рисунок 3.24. Диаграмма процесса определения потребного времени на выполнение заданной программы при cRm=3

Сравнительный анализ полученных значений представлен в Таблице 6.

Таблица 6.

Сравнительный анализ полученных значений

	Изд.	Кол-во, шт.	Время, затраченное в ИМ, мин.	Требуемое время (расчетное), мин.	Δ, мин.	% откло-нения
Задача 1	А	1660	11040	11066,7	26,7	0,2
	Б	0				
	В	0				
Задача 2	А	321	11554,35	11100	454,35	4,09
	Б	377				
	В	391				

Из таблицы видно, что разница полученных результатов при расчете с помощью формул и имитационного моделирования незначительна только в случае исключения возможных нестандартных ситуаций на производстве. Отклонение, вызванное вероятностным характером распределения времени, заданным в имитационной модели, позволяет получить наиболее точные результаты. Кроме того, в отличие от результатов, полученных при расчете в MS Excel, особенностью имитационного моделирования является возможность учитывать длительности ожиданий и конфликтов в процессе сборки.

Помимо рассмотренных показателей, имитационная модель позволяет определить среднее значение каждого параметра процесса. Пример итоговых значений параметров имитационного моделирования представлен на Рисунке 3.25.

Рисунок 3.25 Форма с результатами моделирования

Приведенный вариант ручного расчета учитывал параметры лишь одной производственной ситуации, что для получения объективных данных, необходимых для системы принятия управленческих решений, далеко недостаточно. Имитационная модель в этом случае является производительным инструментом для анализа большого числа производственных ситуаций.

Определение различных показателей эффективности производства на стадии проектирования предприятия является трудоемким процессом, в котором необходимо учитывать множество различных вариантов развития предприятия. На план выпуска изделий оказывает влияние большое количество параметров рынка и самого производства. При использовании имитационного моделирования достаточно построить связи между процессами, а затем варьировать исходные значения для получения точных результатов, что позволит быстро реагировать на сложившиеся ситуации. Кроме того, разработанная имитационная модель позволяет проработать возможные варианты совершенствования производственного процесса и оценить их эффект.

3.4. Разработка критериальных выражений, отражающих принципы концепции бережливого производства

В первой главе диссертационной работы определены основные виды потерь. Принцип работы построенной имитационной модели подразумевает вытягивающее производство, что позволяет исключить производство невостребованной продукции [103]. Точками планирования производства для редукторов являются параметры, содержащие планы производства, для шестерней – сумма параметров планов производства редукторов типов Б и В. Также важно сократить потери, вызванные простоем оборудования, его низкой загрузкой, перенасыщением склада материалами и комплектующими изделиями, длительным ожиданием продукции незавершенного производства на различных этапах. Для сокращения потерь и оптимизации параметров производственного процесса предлагается разработать критериальную систему, основанную на приципах бережливого производства. Она представляет собой совокупность целевых функций, выраженных критериальными выражениями.

Разрабатываемый критериальный подход базируется на системе выражений, определяющих взаимосвязь между производственными и технологическими параметрами процесса, готовой продукции и особенностями организации производства. Совмещение этих параметров приводит к получению единой системы, характеризующей производство. Для построения единой системы и взаимосвязей между всеми критериями необходимо создать имитационную модель, которая позволит визуализировать производственные процессы и получить численные значения критериальных выражений для различных вариантов значений входных параметров.

Однако следует отметить, что хотя в работе на основании представленных ниже критериальных выражений строятся и решаются оптимизационные модели, их решения следует считать рациональными, а не оптимальными, так как они не учитывают ряда важных параметров плана.

Первым критерием является выражение, на основании которого производится сокращение потерь от излишних запасов комплектующих на складе:

$$Q \rightarrow Q_{\text{стр}}, \tag{3.6}$$

где для заданного расчетного периода:

$Q_{\text{стр}}$ – страховой запас деталей на складе (шт.),

Q – текущий остаток деталей на складе (шт.).

Предприятиям сборочного типа, выпускающим продукцию разной номенклатуры для различных заказчиков свойственна закупка комплектующих «впрок». Зачастую закупленные комплектующие становятся неликвидными и, таким образом, происходит «замораживание» денег на складе. Специалистам, занимающимся управлением запасами, важно своевременно реагировать на изменения производственного плана. Для этого строится система управления ресурсами. Концепция бережливого производства позволяет минимизировать потери «замороженных» денег, которые находятся в виде неиспользуемых деталей на складе.

Процесс образования запасов деталей и комплектующих на складе и управление ими можно описать схемой (Рисунок 3.26):

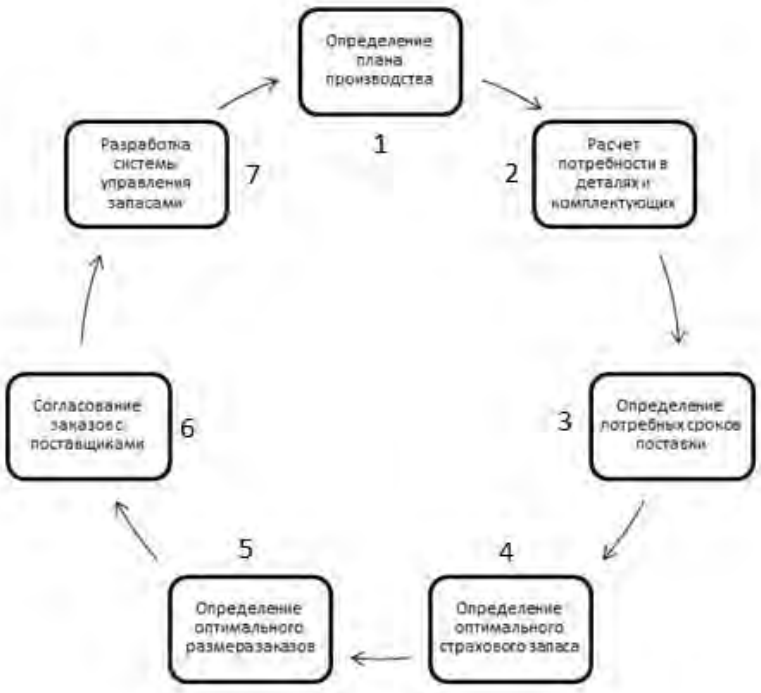


Рисунок 3.26. Процесс формирования запасов на складе

Цикличность данной схемы объясняется нестабильным спросом на продукцию. Периодически предприятия пересматривают свою производственную программу. Это отражается на всем производственном процессе, в том числе на производстве и закупке комплектующих деталей. При этом разработанная однажды система управления запасами должна быть гибкой и автоматически учитывать все изменения производственного плана.

Для реализации этого аспекта в разработанной имитационной модели предлагается использовать принципы динамического моделирования процессов управления. Объектом управления является объем запасов. Обязательное условие системы управления – наличие регулятора. В связи с этим рассмотрим принципы использования регуляторов в системах управления (Рисунок 3.27) [85, 90].

Рисунок 3.27. Воздействие регулятора на объект управления

Для управления складскими запасами регулятор позволяет установить заданный уровень необходимого количества деталей на складе ($Q_{стр}$) и поддерживать его в течение длительного времени, т.е. $Q \rightarrow Q_{\text{стр}}$.

В теории автоматического управления [85, 90] разработаны принципы управления с помощью различных регуляторов:

1. П-регулятор – с пропорциональным законом управления;

2. ПД-регулятор – с пропорционально-дифференциальным законом управления;

3. ПИД-регулятор – с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом управления;

4. ПИ-регулятор – с пропорционально-интегральным законом управления.

Для системы управления складскими запасами возможно применение ПИ-регулятора, математическая модель которого представляет собой систему одного алгебраического и двух дифференциальных уравнений. Интегральная составляющая необходима для устранения возможной статической ошибки, которая характерна для П-регулятора.

Рассмотрим принцип работы ПИ-регулятора на классическом примере автоматического регулирования объема жидкости в емкости, имеющей два клапана, через которые жидкость поступает и убывает. Для того чтобы жидкость не переполнила емкость, в нее добавлен рычаг, регулирующий подачу жидкости. Заданы значения минимально и максимально допустимого объема. Как только объем достигает максимальной точки, поплавок поднимается, а клапан подачи жидкости закрывается. От положения поплавка зависит скорость подачи жидкости. При уменьшении объема жидкости, клапан постепенно открывается, и жидкость вновь поступает в ёмкость (Рисунок 3.28):

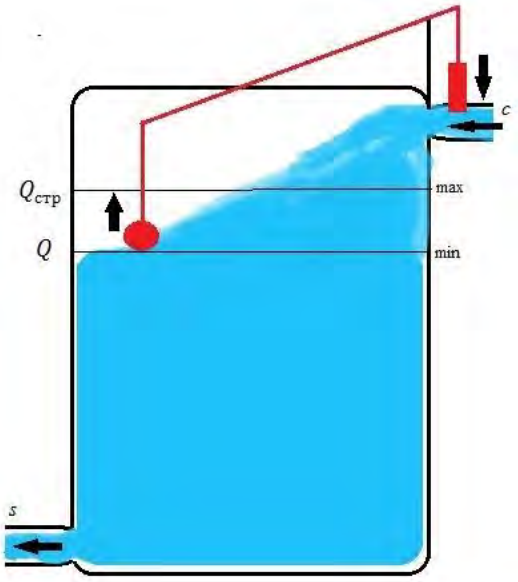


Рисунок 3.28. Ёмкость с жидкостью

Из примера с емкостью видно, что определяющим параметром положения поплавка является текущий уровень жидкости Q. По аналогии строится работа ПИ-регулятора для складских запасов (Рисунок 3.29).

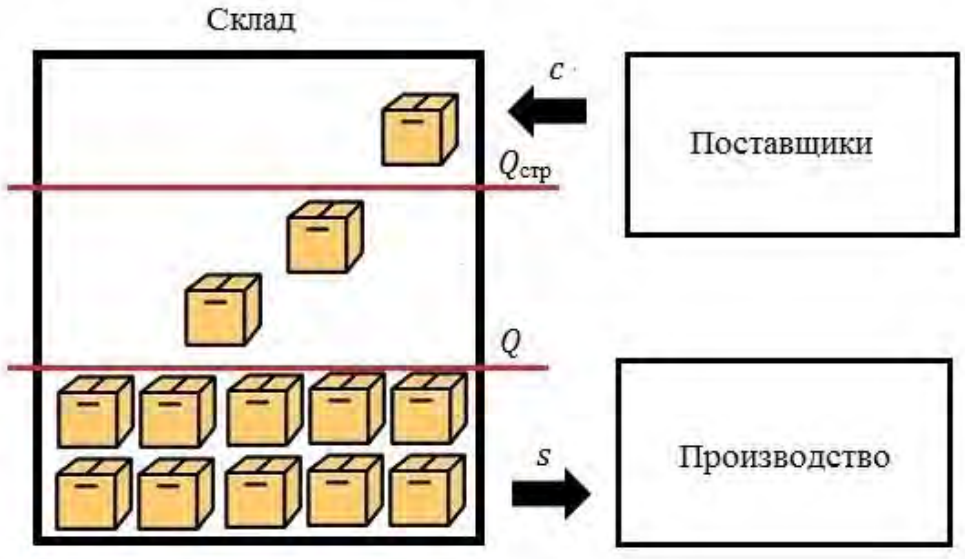


Рисунок 3.29. Схема работы ПИ-регулятора

Для управления запасами комплектующих изделий концепция бережливого производства предусматривает введение визуального контроля (LEAN-технологии), а также определение размера страхового запаса ($Q_{стр}$) комплектующих по формуле [89]:

$$Q_{\text{стр}} = d_{max} + \left(LT_{max} - LT_{\text{ср}}\right) \cdot d, \qquad (3.7)$$

где d_{max} – максимальная потребность в деталях в рассматриваемом периоде;

d – средняя потребность в деталях в рассматриваемом периоде;

LT_{max} – максимальный срок исполнения заказа;

$LT_{ср}$ – средний срок исполнения заказа.

Входной поток c, формирующий страховой запас определяется следующим образом [85]:

$$c = c_i + k_p \cdot (Q_{\text{стр}} - Q), \quad (3.8)$$

где c_i – интегральная составляющая входного потока,

k_p – коэффициент при пропорциональной составляющей входного потока.

Первая интегральная составляющая входного потока для ПИ-регулятора задается формулой:

$$\frac{dc_i}{dt} = k_i * (Q_{\text{стр}} - Q), \quad (3.9)$$

где k_i - коэффициент при интегральной составляющей входного потока.

Вторая интегральная составляющая определяется по формуле:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{a} \cdot (k \cdot c - s - Q), \quad (3.10)$$

где α - коэффициент пропорциональности, определяемый параметрами объекта управления;

k – коэффициент усиления объекта по управлению;

s – выходной поток.

Критерий управления запасами реализован в системе AnyLogic с помощью элементов системной динамики (Рисунок 3.30), значения которых представлены в Таблице 7.

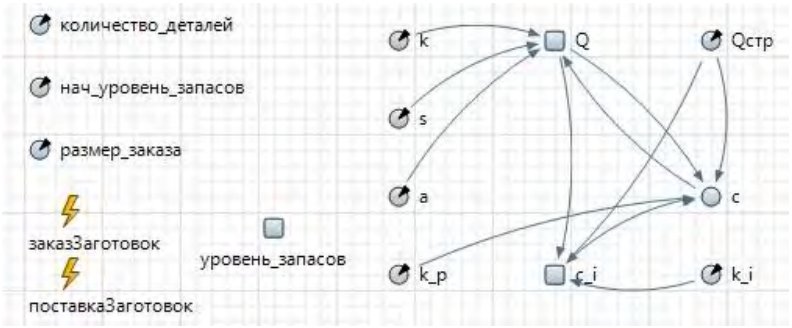


Рисунок 3.30. Имитационная модель управления запасами деталей на основе ПИ-регулятора

Таблица 7.

Значения элементов диаграммы инструмента управления запасами

Элемент диаграммы	Значение
количество_деталей	1600 шт.
нач_уровень_запасов	200 шт.
размер_заказа	200 шт.
уровень_запасов	нач_уровень_запасов
k	1
s	160
a	10
k_p	0,5
k_i	0,5
d	160 шт.
d_{max}	260 шт.
LT_{max}	2,49 дн.
$LT_{ср}$	2,05 дн.

Абсолютные значения всех перечисленных величин в имитационной модели указывается рядом с названием параметра.

В разработанной модели реализовано взаимодействие элементов двух подходов, применяемых в имитационном моделировании: дискретно-событийный и системная динамика. С помощью дискретно-событийного подхода построена СМО, отражающая всю цепочку производства шестерней. Регулятор, базирующийся на элементах системной динамики, позволяет управлять запасами на производстве.

Вспомогательная переменная *c* и накопители c_i *(c_i)* и *Q* рассчитываются по формулам (3.8-3.10).

Страховой запас на неделю рассчитывается по формуле 3.7 [89]:

$$Q_{\text{стр}} = 260 + (2{,}49 - 2{,}05) \cdot 160 = 330 \text{ шт.}, \qquad (3.11)$$

На Рисунке 3.31 изображена имитационная модель системы управления запасами сразу после запуска эксперимента.

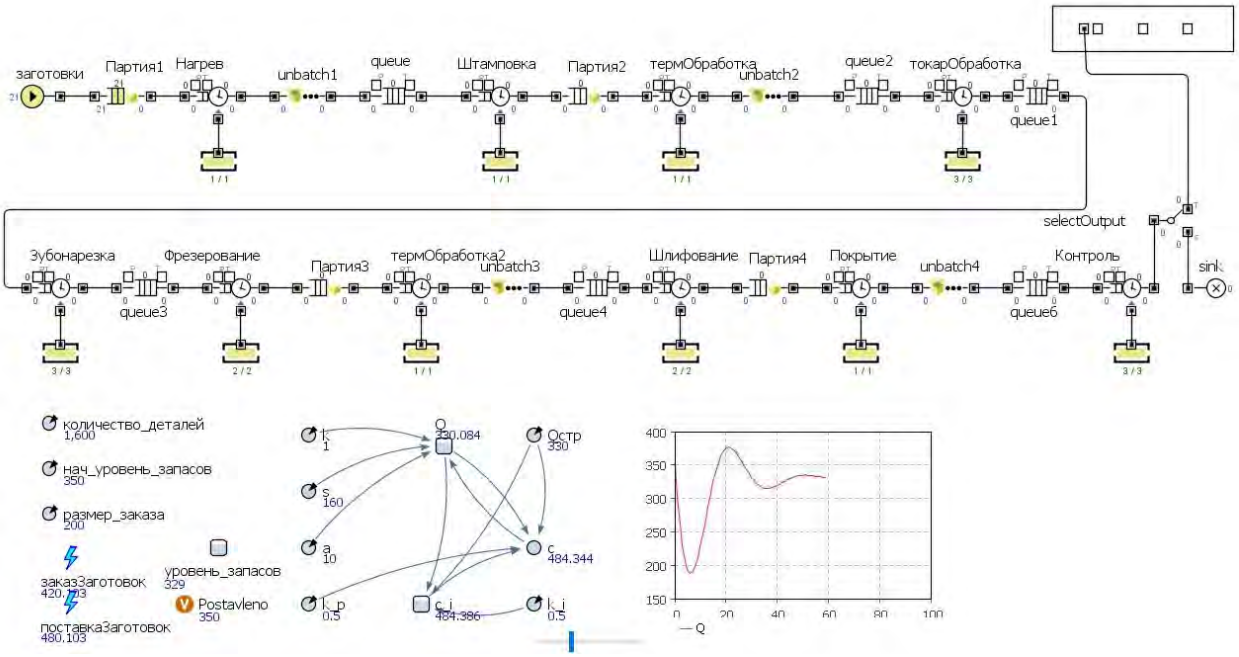


Рисунок 3.31. Значения параметров эксперимента в начальный период расчета имитационной модели

Диаграмма содержит два события. Событие «заказЗаготовок», моделирует процесс передачи заказа на поставку заготовок в заготовительный цех 1 раз в день (1 раз в 480 мин.). Второе событие «поставкаЗаготовок» моделирует процесс передачи заготовок на производство. Передача заготовок в среднем занимает 1 час. Возле каждого элемента находится его цифровое значение. Например, из диаграммы видно, что планируется выпустить 1600 деталей в месяц, в настоящее время на складе находится 350 заготовок. Очередной заказ заготовок будет сформирован через 8 часов.

Сразу после запуска имитационной модели начинается работа ПИ-регулятора, которая заключается в решении двух дифференциальных и одного алгебраического выражений (формулы 3.8-3.10). По мере решения этих уравнений система определяет значения неизвестных параметров для

приведения значения Q к значению $Q_{стр.}$ Разработанная система управления запасами рассчитывает необходимый приток объема поступлений на склад для поддержания уровня страхового запаса (Рисунок 3.32).

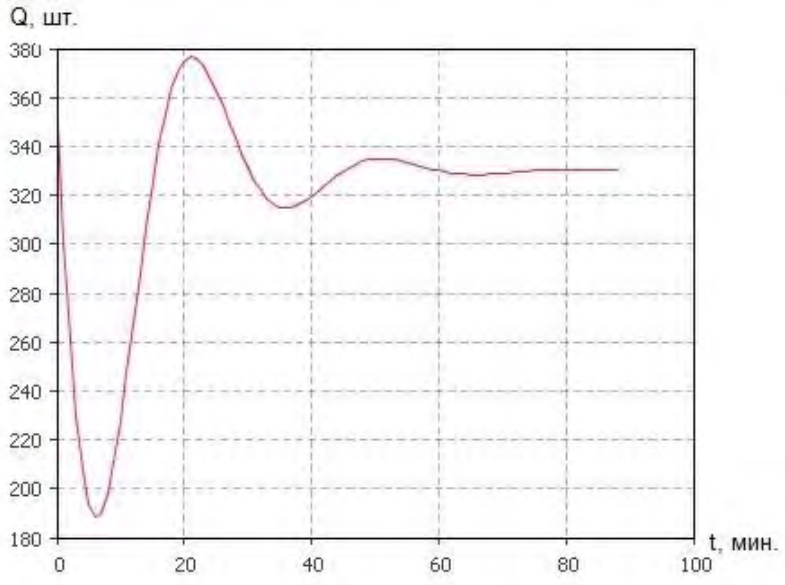


Рисунок 3.32. График изменения Q

Рассмотрим изменение состояния диаграммы через 240 модельных минут (4 часа) (Рисунок 3.33).

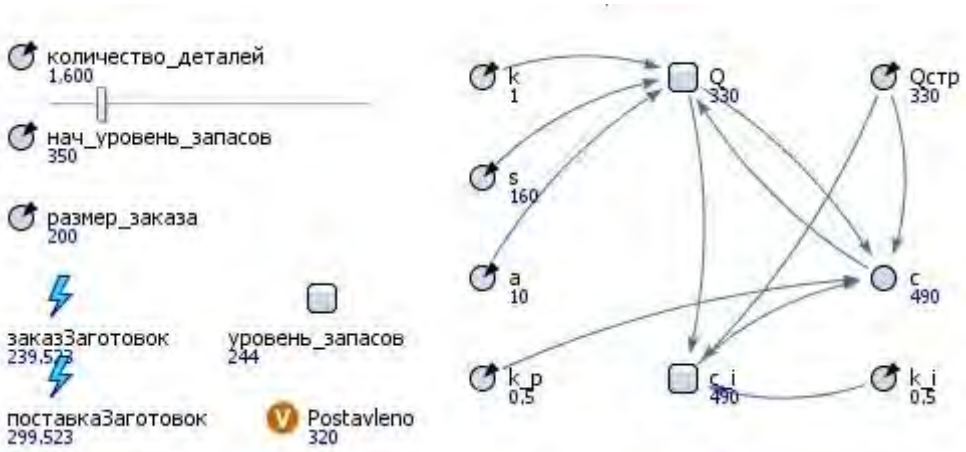


Рисунок 3.33. Значения параметров эксперимента имитационной модели в период расчета «через 4 часа»

Уровень запасов заготовок снизился до 244 шт. Значение параметра Q равно $Q_{стр.}$ Значения показателей на начало нового отчетного периода (второй день) отражены на Рисунке 3.34.

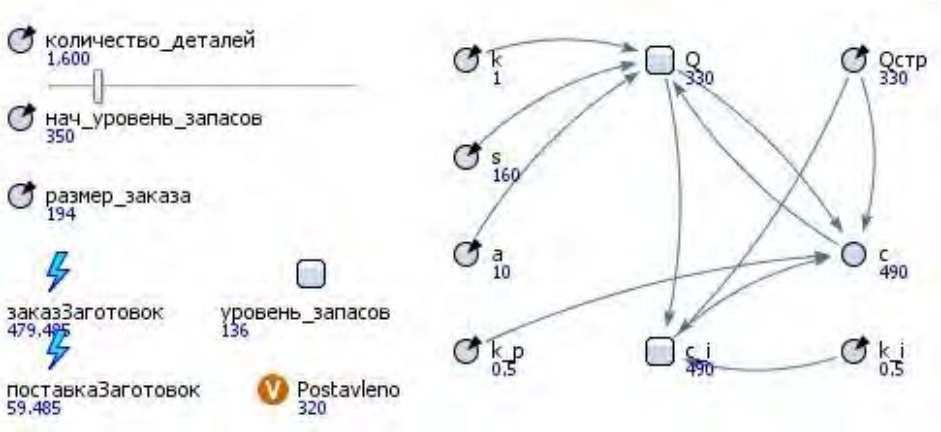


Рисунок 3.34. Значения параметров эксперимента имитационной модели на начало второго расчетного периода

Система управления запасами рассчитала требуемый размер заказа по формуле:

$$\text{размер_заказа} = \text{с} - \text{уровень_запасов} - s, \quad (3.12)$$

$$\text{размер_заказа} = 490 - 136 - 160 = 194 \text{ шт.}, \quad (3.13)$$

Передача заготовок на производство состоится через 1 час после расчета его размера (Рисунок 3.35).

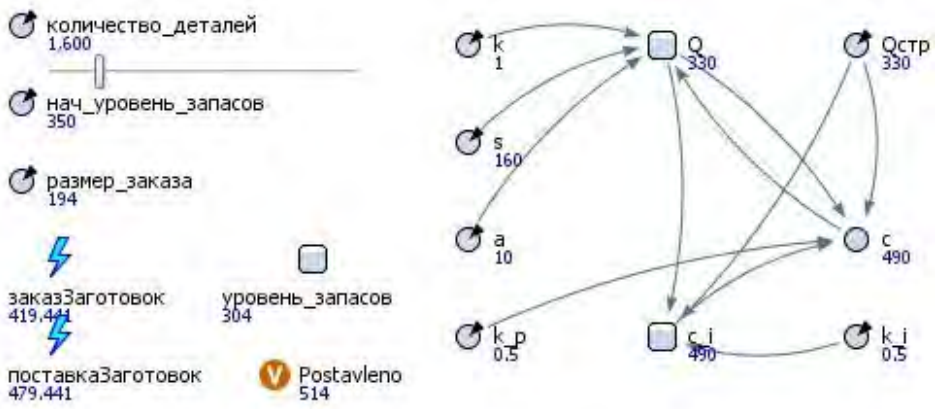


Рисунок 3.35. Значения параметров эксперимента имитационной модели после моделирования первой поставки деталей

Объем запасов увеличился и составил 304 заготовки. Размер очередного заказа будет рассчитан после окончания текущего расчетного периода.

Таким образом, в разработанную имитационную модель добавлен инструмент управления складскими запасами, который, регулируя объем

поставляемых заготовок, позволяет поддерживать количество запасов в заданных границах. При этом имитационное моделирование позволяет учитывать вероятностный характер времени передачи заготовок на производство и времени исполнения заказа, что делает результат более близким к реальной ситуации.

Значения параметров «размер_заказа» и «уровень_запасов» представлены в Таблице 8.

Таблица 8.

Значения параметров «размер_заказа» и «уровень_запасов»

День	уровень_запасов перед поставкой, шт.	размер_заказа, шт.	уровень_запасов в конце рабочего дня, шт.
1	Начальный остаток=350	0	138
2	111	192	116
3	89	214	117
4	89	213	119
5	92	211	118
6	92	212	116
7	89	208	107
8	81	0	0

Применение ПИ- регулятора позволяет построить систему управления запасами. Завершение программы производства приводит к снижению потребного заказа заготовок. С помощью ПИ-регулятора уровень запасов поддерживается на одном уровне шесть рабочих дней. На седьмой день уровень запасов снижается, т.к. заданная программа близится к завершению. На восьмой день план поставок выполняется полностью. Однако ПИ-регулятор позволяет реагировать и на изменения программы производства уже в процессе моделирования работы предприятия.

Рассмотрим поведение модели при возникновении второго заказа в размере 1600 шт. на третий день функционирования системы. Цеху

необходимо параллельно выпускать изделия для двух заказов. Более подробно ситуация на производстве представлена на диаграмме Ганта (Рисунок 3.36).

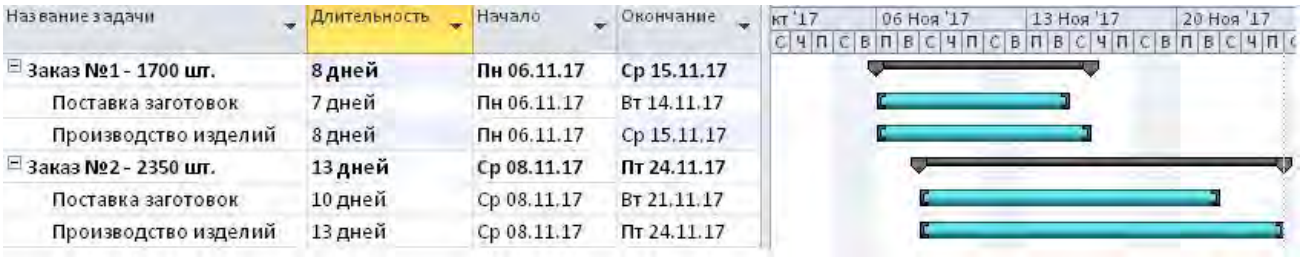


Рисунок 3.36. Диаграмма Ганта

При увеличении производственной программы ПИ-регулятор автоматически рассчитал уровень страхового запаса и рационального размера заказа заготовок (Рисунок 3.37).

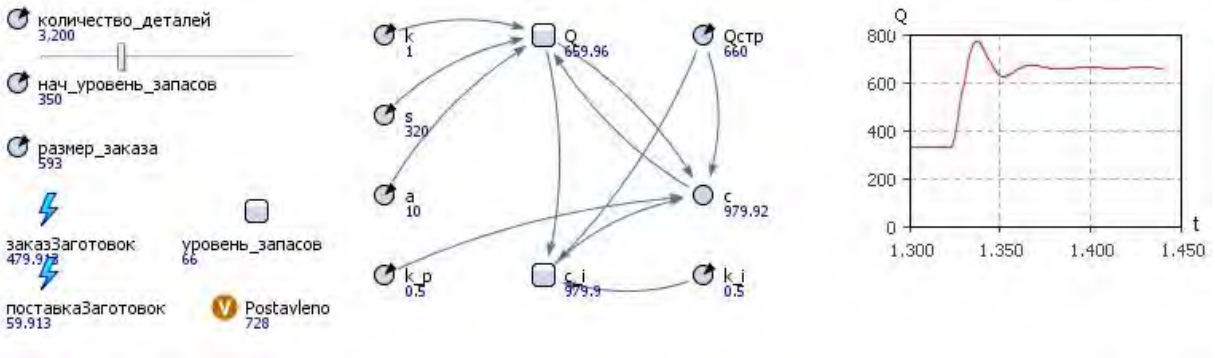


Рисунок 3.37. Увеличение страхового запаса

В целях обеспечения выполнения плана производства производственные мощности увеличены в два раза. Значения параметров «размер_заказа» и «уровень_запасов» после увеличения плана представлены в Таблице 9.

Таблица 9.

Значения параметров «размер_заказа» и «уровень_запасов» после увеличения плана до 4050 шт.

День	уровень_запасов перед поставкой, шт.	размер_заказа, шт.	уровень_запасов в конце рабочего дня, шт.
1	Начальный остаток=350	0	138
2	111	192	116
3	89	214	68
4	12	593	238
5	173	427	236
6	184	424	226
7	170	434	236
8	182	84	76
9	49	244	104
10	78	216	142
11	102	22	0

Изменения графика движения складских запасов представлены на Рисунке 3.38.

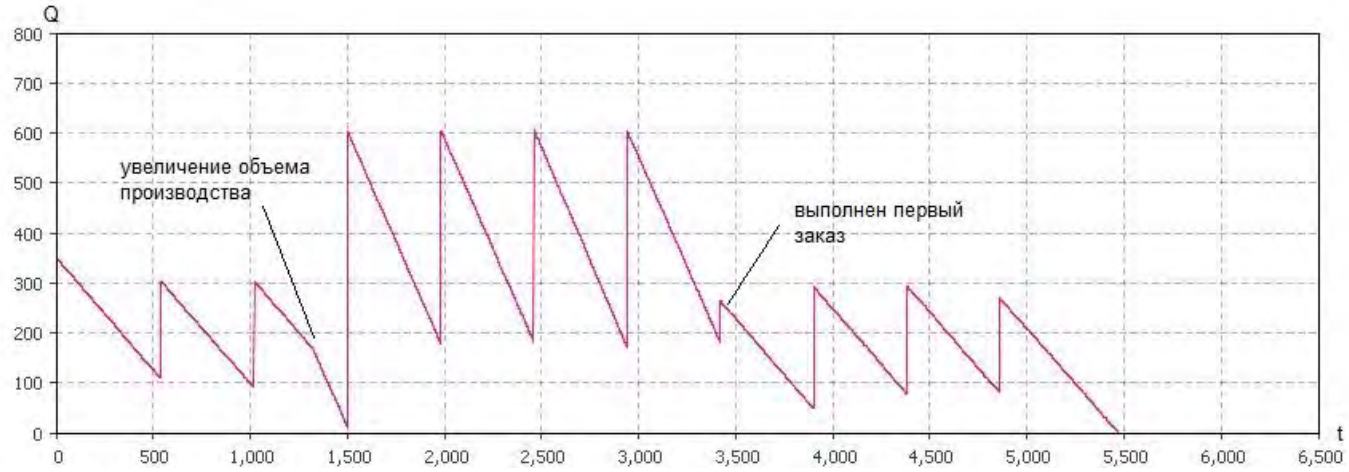


Рисунок 3.38. График движения запасов на складе после увеличения плана производства

После увеличения плана производства ПИ-регулятор автоматически обновил размер страхового запаса и рассчитал размеры заказов заготовок.

Имитационное моделирование позволяет более точно рассмотреть производственный процесс, учесть в расчетах человеческий фактор, заложить среднее, минимальное и максимальное время на выполнение операций. Например, на операции «штамповка» установлен треугольный закон распределения (Рисунок 1.6), который позволяет учесть, что время выполнения операции может варьироваться**.** Это позволяет приблизить расчет к реальному процессу. Применение имитационного моделирования на стадии проектирования производства позволяет спрогнозировать рациональные размеры заказов для разных объемов производства в короткие сроки и оптимизировать объем запасов на складе.

Вторым критерием является выражение, на основании которого производится минимизация времени ожидания продукции незавершенного производства, которое определяет основную часть оборотных средств предприятия. В СМО для расчета среднего времени пребывания заявки в системе применяют формулу Литтла [88]:

$$T_{\text{ож}} = \frac{1}{\lambda} L \rightarrow min, \qquad (3.14)$$

где λ – интенсивность потока заявок-заготовок,

L – среднее число заявок в системе.

Данная формула применима для любой СМО и любого характера движения потока заявок-заготовок.

Незавершенным производством являются затраты на продукцию, не прошедшую весь цикл производства. Данный показатель можно считать как в целом по предприятию, так и на отдельных участках всего процесса. Длительное ожидание продукции незавершенного производства очередного этапа обработки сигнализирует о наличии «узкого места» производства.

Исходя из поставленной задачи длительное ожидание продукции незавершенного производства возникает:

1. между термической и токарной обработкой, т.к. для проведения термической обработки собирается партия из 100 заготовок;

2. между токарной обработкой и зубонарезкой, т.к. длительность первого процесса меньше длительности второго процесса.

Рассмотрим подробно первый случай. Для расчета длительности ожидания добавим в разработанную модель параметр «ОжиданиеНЗП» и объект сбора статистической информации «ВремяОжидания» (Рисунок 3.39).

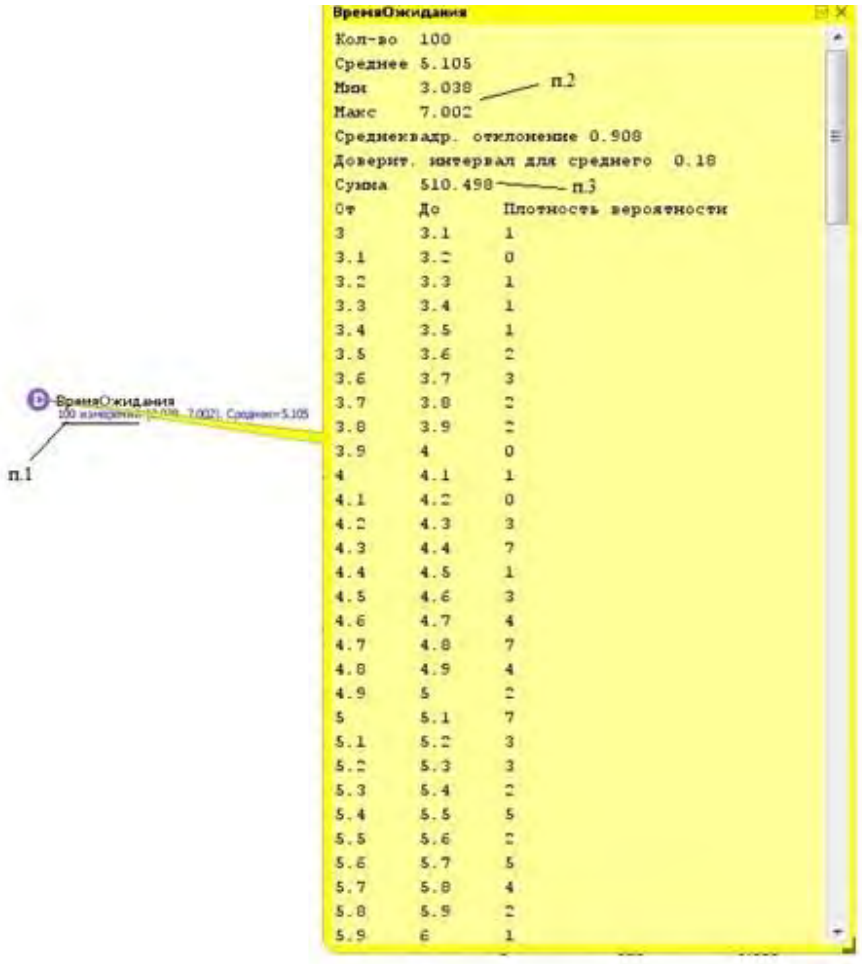


Рисунок 3.39. Статистика ожидания продукции незавершенного производства

С помощью объекта «ВремяОжидания» получены следующие статистические данные:

1. Проанализировано время ожидания перед следующим этапом для партии из 100 изделий.

2. Минимальный интервал между подачами изделий на токарную обработку – 3,04 мин., максимальный – 7 мин.

3. Переход последнего изделия из партии на токарную обработку осуществлен через 510,5 мин.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что производственный процесс выстроен неэффективно, т.к. до момента окончания термической обработки очередной партии заготовок на следующий этап не успевают перейти заготовки предыдущей партии.

Для сокращения длительности ожидания заготовок перед токарной обработкой возможны следующие меры:

1. Уменьшить размер партии изделий, отправляемых на термическую обработку.

2. Увеличить количество рабочих мест для проведения токарной обработки на следующем этапе.

Построим оптимизационный эксперимент на базе разработанной имитационной модели, позволяющий определить рациональный размер партии заготовок, помещаемых на термическую обработку, и рациональное количество рабочих мест на этапе токарной обработки (Рисунок 3.40).

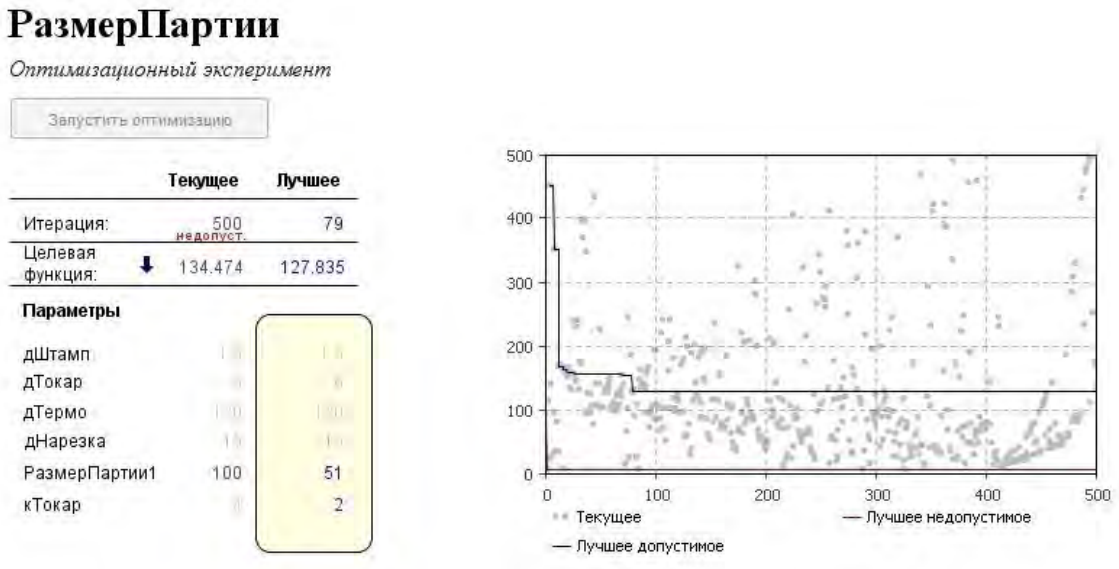


Рисунок 3.40. Оптимизационный эксперимент для поиска рационального размера партии заготовок

Целевая функция оптимизационного эксперимента представлена на Рисунке 3.41. Она ссылается на произведение среднего значения элемента «ВремяОжидания», которое необходимо минимизировать, и размер партии.

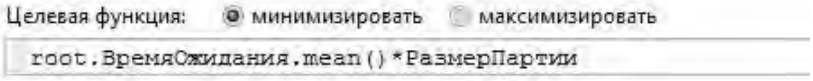


Рисунок 3.41. Целевая функция оптимизационного эксперимента

По итогам оптимизационного эксперимента рациональный размер партии заготовок равен 51 шт. при наличии двух рабочих мест на этапе токарной обработки. Рассмотрим статистические данные с помощью объекта «ВремяОжидания» для новых значений параметров (Рисунок 3.42).

Рисунок 3.42. Статистика ожидания продукции незавершенного производства с учетом оптимизации

Максимальное время ожидания заготовки в партии составляет примерно 127 минут, что соответствует решению целевой функции оптимизационного эксперимента. Этого времени достаточно на обработку одной партии заготовок, перешедших с этапа термической обработки, и подготовку очередной партии. Таким образом, «узкое место» на этапе механической обработки устранено. Аналогичным способом возможна оптимизация и на других производственных участках.

Третий критерий связан с эффективностью использования производственных мощностей (Z). Данный показатель характеризует взаимосвязи всех факторов цепочки производства и выражается функцией:

$$Z = \sum V_i * K_{zi} \rightarrow max, \quad (3.15)$$

$$K_{zi} \rightarrow max, \quad (3.16)$$

где V_i – объем произведенной продукции,

K_{zi} - коэффициент загрузки оборудования.

Ограничения целевой функции автоматически установлены в параметрах оптимизационного эксперимента на основании производственных параметров, участвующих в имитационной модели построенного производственного процесса.

Вопрос о требуемом количестве оборудования напрямую зависит от планируемого объема выпуска изделий. Для ряда предприятий характерна частая смена объемов производства в определенных пределах. Специалистам, занимающимся организацией производства, важно своевременно реагировать на изменения спроса и производственного плана.

Ранее построенная имитационная модель сборки редукторов трех типов может быть решена как оптимизационная задача с поиском максимума параметра Z. Однако, как говорилось ранее, эффективность использования производственных мощностей зависит от большого количества факторов, часть из которых не учтена в модели, поэтому решения, полученные по целевому показателю Z, следует считать рациональными, а не оптимальными. Реализация модели приводит к получению численных решений для конкретных условий входных параметров. Расчет функции с разными вариантами входных параметров занимает достаточно много времени. Средства имитационного моделирования позволяют в короткие сроки моделировать изучаемые процессы, параметры которого могут рассчитываться при различных входных данных.

Для получения рационального количества оборудования в производственном участке необходимо добавить на разработанную многоуровневую имитационную модель инструмент, который будет подсчитывать значение загрузки производственных мощностей для каждого варианта входных параметров. Для этого используется столбиковая диаграмма (Рисунок 3.43).

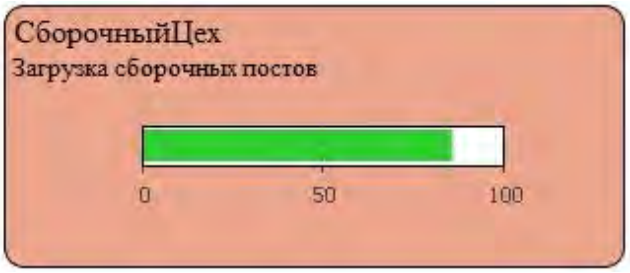


Рисунок 3.43. Столбиковая диаграмма загрузки производственных мощностей

Значение диаграммы:

*((int)(станкиСборок.getUnit(0).getUtilization()*100))*

С помощью диаграммы определяется статистическое значение использования ресурса с момента его создания до текущего момента времени. Полученные значения передаются в оптимизационный эксперимент модели. Значения параметров оптимизационного эксперимента определены в построенной имитационной модели.

С помощью построенного эксперимента вычислим рациональное количество рабочих мест при условии работы в одну смену по исходным данным Таблиц 4 – 5. При запуске оптимизационных экспериментов выбран режим, исключающий ожидания комплектации из-за возможных проблем с поставками деталей от поставщиков. Результат эксперимента представлен на Рисунке 3.44.

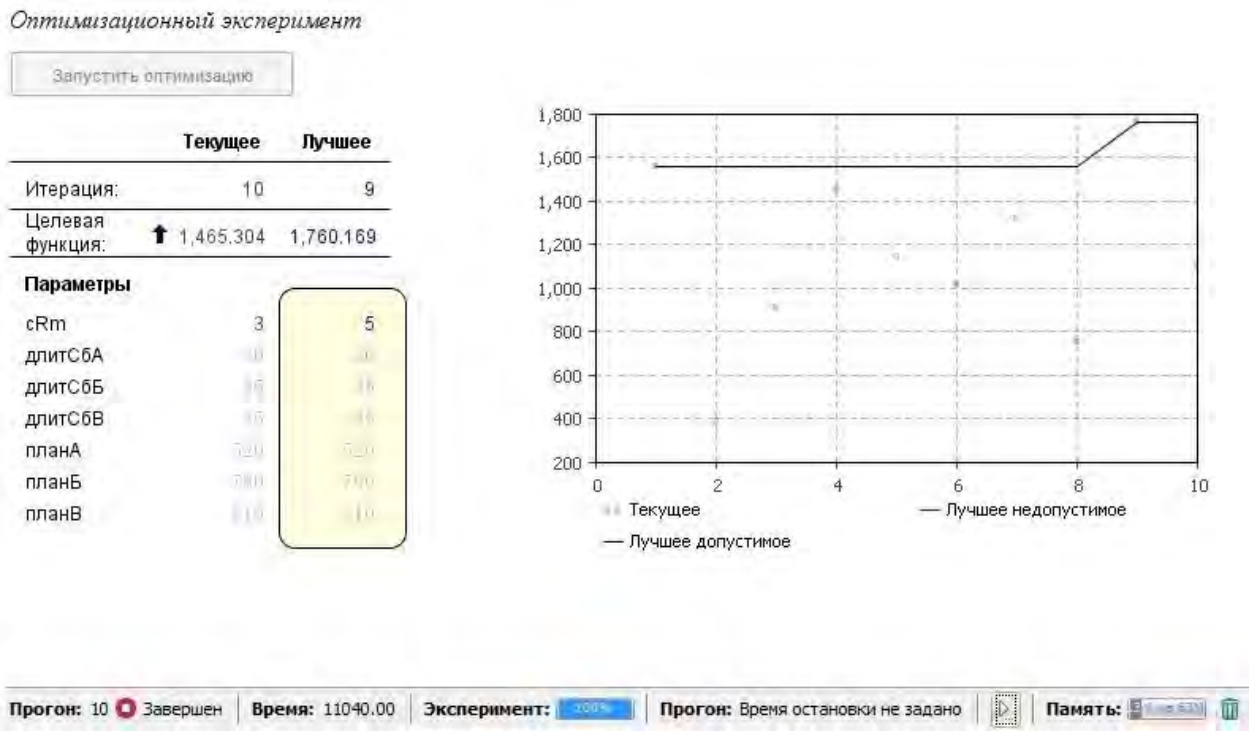


Рисунок 3.44. Результат эксперимента

Из Рисунка видно, что произведено 10 прогонов имитационной модели с варьированием количества рабочих мест. Наиболее эффективной оказалась девятая итерация, в которой задействовано 5 рабочих мест. Показатель эффективности производственных мощностей составил 1760,17 шт. Использование большего количества рабочих мест приведет к низкой загрузке и дополнительным расходам.

Разработанный эксперимент позволяет в короткие сроки определить рациональное значение параметра при различных исходных данных. Рассмотрим результат эксперимента при увеличении производственной программы (Рисунок 3.45).

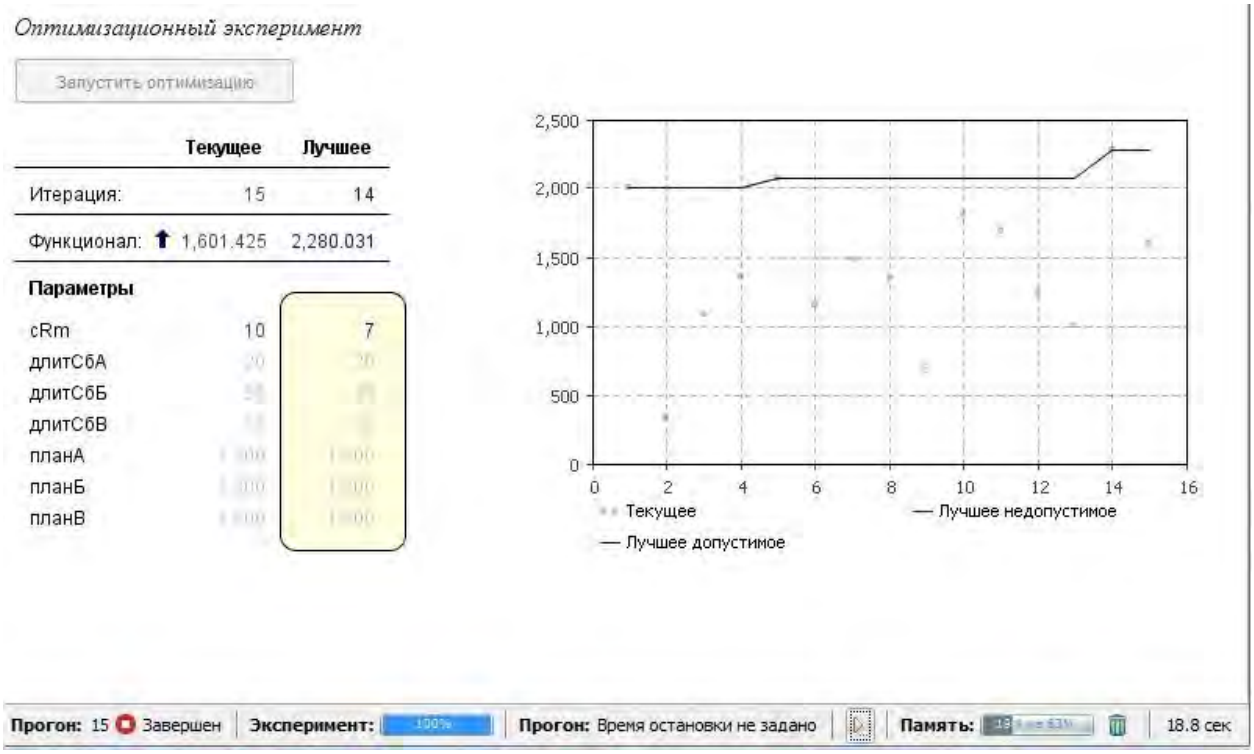


Рисунок 3.45. Результат эксперимента с увеличенной программой производства изделий.

По новой производственной программе планируется выпустить 1200 редукторов типа А, 1300 редукторов типа Б и 1500 редукторов типа В. Для рациональной загрузки оборудования требуется увеличить количество рабочих мест до 7.

Таким образом, с помощью эксперимента в имитационном моделировании можно спрогнозировать потребности в оборудовании и учесть их в организации производства участка еще на этапе подготовки производства.

Эксперимент имитационного моделирования позволяет получать численные решения для каждого варианта исходных данных. Однако, если таких вариантов большое количество, их результаты целесообразно обработать и получить общую зависимость, которая позволит для разных случаев выполнения программы без дополнительных расчетов получать выходные значения загрузки оборудования.

Совокупность сложных взаимосвязанных производственных процессов требует применения особых систем принятия управленческих решений.

Базой для таких систем может служить имитационное моделирование. Особенно это характерно для этапа подготовки производства, когда из-за отсутствия собранной статистики, слишком мало исходных данных, нет точного понимания дальнейшего развития компании, динамики изменения спроса на производимую продукцию. Системы принятия решений на базе имитационного моделирования необходимы для производственных предприятий, когда невозможно точно предсказать результат от возможных нововведений. Вероятностный подход таких систем позволяет не только рассчитать результат, но и скорректировать его в рамках заданного распределения.

Применение третьего критерия для поиска рационального количества оборудования приводит к большому количеству численных решений для каждого варианта входных параметров. В связи с этим следующая глава посвящена получению обобщенной формулы, которая позволит для разных случаев выполнения программы без дополнительных расчетов вычислять выходные значения загрузки оборудования. Таким образом, происходит переход от решения единичной задачи к определению общего решения с помощью методики планирования эксперимента.

3.5. Выводы по Главе 3

1. С помощью метода IDEF0 построена функциональная модель процесса сборки трех типов редукторов и производства шестерней по отдельной технологической цепочке. Метод IDEF0 позволил выделить отдельные подпроцессы и изучить их структуру. Анализ полученной функциональной модели определил необходимость разработки имитационной модели для создания взаимодействий между всеми стадиями процесса и поиска рациональных значений ключевых показателей.

2. На основании полученной функциональной модели построена имитационная модель. В связи со сложностью рассматриваемых производственных процессов, они разбиты на отдельные уровни: процесс

закупки и поставки покупных комплектующих изделий, склад с адресным хранением, отдельные процессы сборки редукторов трех типов, производство шестерней. Все уровни связаны между собой на основной диаграмме процесса. В отличие от функциональной модели, многоуровневая имитационная модель построена «снизу вверх», т.е. сначала на классах активного объекта построены диаграммы подпроцессов, затем на основном классе активного объекта Main построено взаимодействие всех протекающих процессов.

3. Для оценки достоверности результатов проведена верификация разработанной имитационной модели. Сравнение результатов, полученных путем имитационного моделирования и с помощью расчетов в MS Excel, показало высокую точность и адекватность построенной модели. С помощью разработанной имитационной модели рассчитан максимально возможный объем производства при наличии трех сборочных постов, который составил 1660 редукторов типа А. Ручной расчет времени, необходимого для производства данного количества изделий, показал, что на выпуск полученной программы потребуется 11066,7 мин. При $Ф_{вр}$ = 11040 мин. отклонение составляет 26,7 мин. или 0,2%. Отклонение полученных результатов не является существенным и объясняется тем, что при расчете с помощью MS Excel не учтены вероятностные характеристики производственного процесса, а имитационное моделирование позволяет варьировать время изготовления изделий по треугольному закону распределения случайных величин. Также проведен анализ времени выполнения заданной производственной программы: 321 редуктор типа А, 377 редукторов типа Б и 391 редуктор типа В. В имитационной модели требуемое время на изготовление изделий составило 11554,35 мин. Разница с расчетным значением равна 454,35 мин., что составляет 4,09% от расчетного времени. Полученная разница объясняется тем, что имитационное моделирование позволяет учитывать возможные конфликты и ожидания

производственного процесса, что отличает данный подход от стандартных инструментов планирования процессов подготовки производства.

4. Разработана критериальная система расчета производственных параметров для сокращения потерь, определенных концепцией бережливого производства. Для проверки эффективности критериального подхода применена построенная ранее имитационная модель. Первый критерий - выражение, с помощью которого производится расчет рационального объема запасов деталей на складе. Критерий реализован в имитационной модели с помощью применения ПИ-регулятора, который отслеживает движение заготовок на складе и рассчитывает размер поставки с целью поддержания расчетного уровня запасов на складе. Для реализации этого инструмента в разработанную дискретно-событийную модель внедрены элементы динамического моделирования процессом управления. Применение ПИ-регулятора наиболее эффективно в случае многократного изменения плана выпуска продукции.

5. Второй критерий – это выражение, с помощью которого производится минимизация времени ожидания продукции незавершенного производства. В построенной имитационной модели на примере производства шестерней критерий реализован с помощью встроенных объектов, за счет которых проведен статистический анализ длительности ожидания заготовок перед очередной операцией. По итогам анализа и проведенного оптимизационного эксперимента определен рациональный размер партии заготовок, который составил 51 шт. при наличии двух рабочих мест на этапе токарной обработки. В рассмотренном примере за счет оптимизации размера партии и количества рабочих мест максимальная длительность ожидания заготовок сократилась в 4 раза. Использование данного критерия в реальном производственном процессе также позволит сократить время ожидания продукции незавершенного производства, а значит, и сократить период оборачиваемости запасов.

6. Третий критерий направлен на повышение эффективности использования производственных мощностей на основном производстве – сборке редукторов трех типов. Данный показатель включает в себя взаимосвязи всех факторов цепочки производства. В рассмотренном примере для заданных исходных данных эксперимент имитационной модели показал, что наибольший эффект от производства достигается при использовании 5 рабочих мест. Показатель эффективности производственных мощностей составил 1760,17 шт. Применение третьего критерия для реального производственного процесса позволит спрогнозировать потребности в оборудовании, учесть их в организации производства проектируемого предприятия и определить при каких условиях будет необходимо увеличить или уменьшить количество оборудования.

7. Эксперимент по третьему критерию позволяет получать численные решения для каждого варианта исходных данных. Однако, при большом количестве таких вариантов, их результаты целесообразно обработать и получить общую зависимость, которая позволит для разных случаев выполнения программы без дополнительных расчетов получать выходные значения эффективности загрузки оборудования. В целях получения обобщенной формулы необходимо применить методику планирования эксперимента.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Разработанный критериальный подход к определению рационального количества рабочих мест сборочного производства, описанный в параграфе 3.4, позволяет для каждого варианта производственных параметров получить конкретное решение. Задача представлена как оптимизационная и решается численными методами. Из полученного множества численных решений для разных исходных данных необходимо определить общую зависимость, которая позволит оперативно определять требуемое количество рабочих мест для разных производственных условий. Для этого полученные с помощью оптимизационного эксперимента численные решения предлагается обработать с помощью методики планирования эксперимента.

Варьируемые параметры и интервалы варьирования представлены в Таблице 10.

Таблица 10.

Варьируемые параметры

Параметр	Минимальное значение	Среднее значение	Максимальное значение
Количество сборочных постов (cRm), шт.	5	7	9
План производства редукторов типа А (планА), шт.	500	850	1200
План производства редукторов типа Б (планБ), шт.	700	1050	1400
План производства редукторов типа В (планВ), шт.	800	1200	1600

Целевая функция оптимизационной задачи представлена формулой 3.15. Все процессы, ранее построенные в имитационной модели, оказывают влияние на результат оптимизационного эксперимента.

В теории планирования эксперимента традиционно входные параметры обозначаются как $x_1, x_2, \ldots x_n$. В связи с этим произведем изменение обозначений исследуемых показателей (Таблица 11).

Таблица 11.

Новые обозначения исследуемых показателей

Показатель	Старое обозначение	Новое обозначение
Количество сборочных постов	cRm	x_1
План производства редукторов типа А	планА	x_2
План производства редукторов типа Б	планБ	x_3
План производства редукторов типа В	планВ	x_4
Эффективность использования производственных мощностей	Z	Y

В главе 3 расчеты проводились для одного варианта. Для получения регрессионной зависимости проведен ряд оптимизационных экспериментов с целевой функцией (3.15) поиска эффективности использования производственных мощностей для всех вариантов соотношения параметров. Полученные результаты эффективности для каждого эксперимента приведены в таблице 12.

Таблица 12.

Значения эффективности использования производственных мощностей для разных значений программы выпуска изделий.

x_2	x_3	x_4	x_1		
			5	7	9
500	700	800	1625,1	1284,5	1040,3
		1200	1620,2	1326,2	1018,5
		1600	1613,9	1310,9	1038,4
	1050	800	1629	1337,2	1035,3
		1200	1634	1286,9	1016,7
		1600	1629,1	1288,4	1023,8
	1400	800	1624,9	1312	1043,8
		1200	1611,9	1301,8	1045,6
		1600	1627	1339,8	1028,9

Продолжение таблицы 12.

x_2	x_3	x_4	x_1		
850	700	800	1680	1784,8	1418,3
		1200	1673	1797,3	1399,8
		1600	1680,9	1785,2	1404
	1050	800	1675	1810,2	1408,3
		1200	1677,9	1803,8	1413
		1600	1675	1806,5	1431,7
	1400	800	1677,9	1802,6	1411,9
		1200	1673	1780,5	1390,1
		1600	1673,1	1792,1	1403,1
1200	700	800	1669,9	2336,1	1837,5
		1200	1680,9	2302,2	1812,7
		1600	1679	2335,2	1797
	1050	800	1676	2357,2	1823,7
		1200	1673	2356	1789,5
		1600	1675	2326	1825,2
	1400	800	1676	2320,6	1816,3
		1200	1676	2332,5	1798,5
		1600	1671	2333,4	1808,3

На Рисунке 4.1 изображен график эффективности использования производственных мощностей, из которого видно, что с 1 по 9 эксперимент (N) максимальный эффект производства достигается при наличии 5 рабочих мест, далее при наличии 7 рабочих мест. Использование 9 рабочих мест при рассматриваемых вариантах производственной программы нецелесообразно.

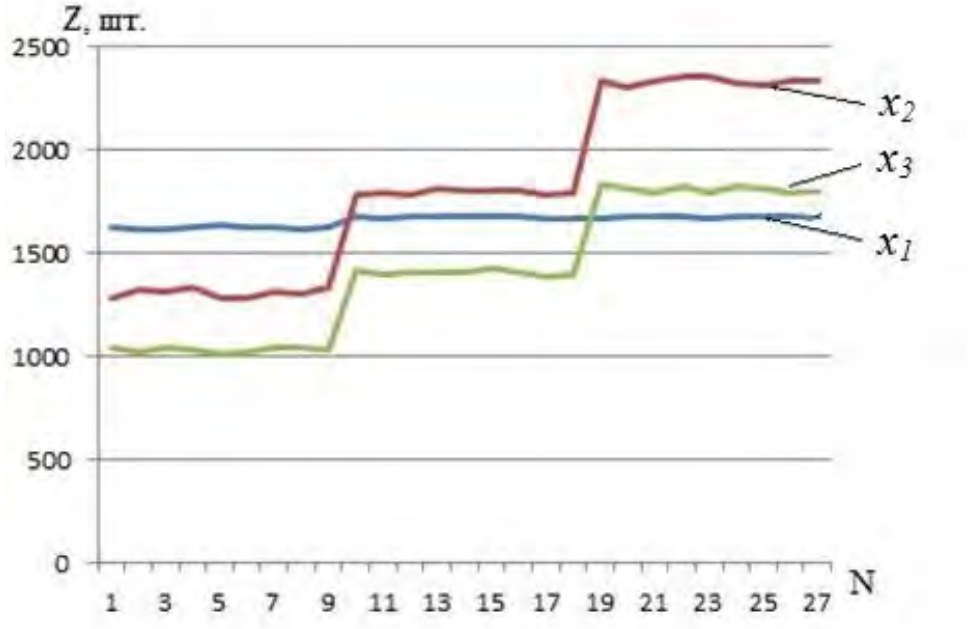


Рисунок 4.1. График эффективности использования производственных мощностей

Для проведения качественной оценки влияния производственной программы редукторов трех типов на потребность в рабочих местах проведен дисперсионный анализ, с помощью которого определяются наиболее значимые факторы. Для этого проанализированы численные значения показателя эффективности производственных мощностей, полученные с помощью оптимизационного эксперимента в области варьирования параметров.

4.1. Дисперсионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента

Методика проведения дисперсионного анализа подробно рассмотрена во второй главе. Сведения об уровнях изменения всех исследуемых факторов для дисперсионного анализа представлены в Таблице 10. Каждый фактор имеет три уровня изменений и вносит свой вклад в общую сумму квадратов отклонений при соответствующем числе степеней свободы.

Числа степеней свободы каждого фактора и их взаимодействий представлены в Таблице 13.

Таблица 13.

Числа степеней свободы

Фактор	Формула	f
x_1	$f_1 = a - 1$	2
x_2	$f_2 = b - 1$	2
x_3	$f_3 = c - 1$	2
x_4	$f_4 = d - 1$	2
$x_1 x_2$	$f_{12} = (a-1)(b-1)$	4
$x_1 x_3$	$f_{13} = (a-1)(c-1)$	4
$x_1 x_4$	$f_{14} = (a-1)(d-1)$	4
$x_2 x_3$	$f_{23} = (b-1)(c-1)$	4
$x_2 x_4$	$f_{24} = (b-1)(d-1)$	4
$x_3 x_4$	$f_{34} = (c-1)(d-1)$	4
$x_1 x_2 x_3$	$f_{123} = (a-1)(b-1)(c-1)$	8
$x_1 x_2 x_4$	$f_{124} = (a-1)(b-1)(d-1)$	8
$x_1 x_3 x_4$	$f_{134} = (a-1)(c-1)(d-1)$	8
$x_2 x_3 x_4$	$f_{234} = (b-1)(c-1)(d-1)$	8
$x_1 x_2 x_3 x_4$	$f_{1234} = (a-1)(b-1)(c-1)(d-1)$	16
	Общий эффект	80

Результаты дисперсионного анализа представлены в Таблице 14.

Таблица 14.

Дисперсионный анализ

Фактор	σ	F_i	F_T
x_1	2 141 571,08	1 070 785,54	67 221,30
x_2	5 159 118,13	2 579 559,07	161 938,42
x_3	370,71	185,36	11,64
x_4	920,11	460,05	28,88
$x_1 x_2$	2 311 740,29	577 935,07	36 281,35
$x_1 x_3$	392,80	98,20	6,16
$x_1 x_4$	544,98	136,25	8,55
$x_2 x_3$	184,51	46,13	2,90
$x_2 x_4$	63,72	15,93	1,00
$x_3 x_4$	739,46	184,87	11,61
$x_1 x_2 x_3$	1 997,59	249,70	15,68
$x_1 x_2 x_4$	335,24	41,90	2,63
$x_1 x_3 x_4$	1 194,59	149,32	9,37
$x_2 x_3 x_4$	1 151,13	143,89	9,03
$x_1 x_2 x_3 x_4$	3 485,36	217,83	13,68
$f_{общ}$	9 623 809,70	120 297,62	

Проверка результатов дисперсионного анализа показала, что сумма степеней свободы всех факторов равна 80, а суммарное значение сумм квадратов отклонений равно 9 623 809,70. Следовательно, дисперсионный анализ проведен корректно.

Графически значения критерия Фишера каждого фактора и их взаимодействий представлены на Рисунке 4.2.

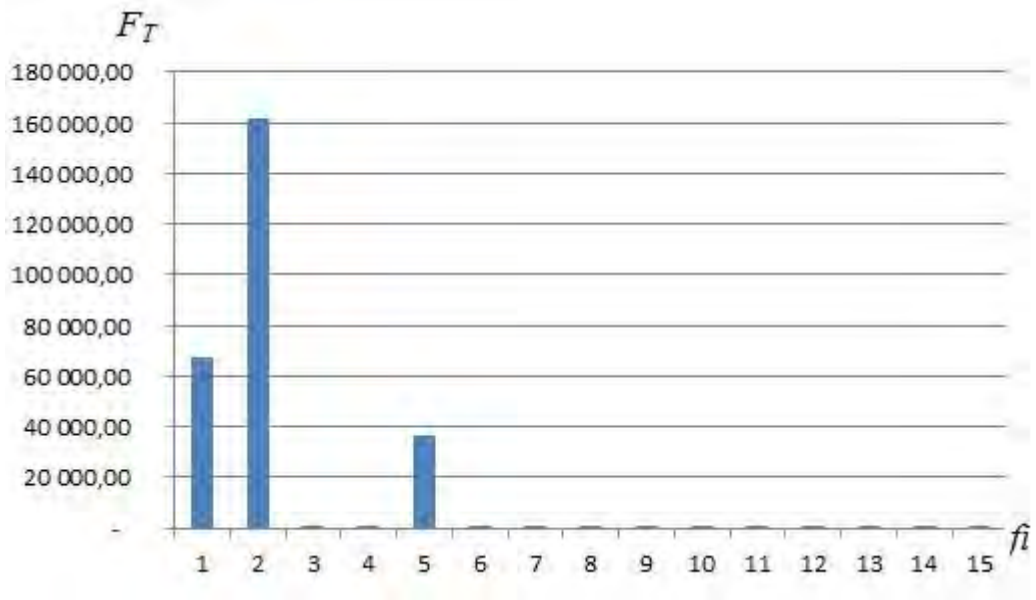


Рисунок 4.2. Значения критерия Фишера для каждого фактора и их взаимодействий

Дисперсионный анализ показывает, что при заданных условиях наибольшее значение на выходной параметр оказывают первый и второй факторы, а также их взаимодействие. Первому фактору соответствует количество рабочих мест, а второму фактору – план производства редукторов типа А.

Отсутствие влияния объемов выпуска редукторов типов Б и В обусловлено тем, что в расчете рассмотрена начальная стадия производственного процесса, т.е. изучен этап запуска производства. На начало работы на складе имелись в наличии все покупные комплектующие. При этом в состав редукторов типов Б и В входят шестерни собственного производства, изготовление которых началось параллельно со стартом сборки редукторов. До момента выпуска первой шестерни возможна сборка только редукторов типа А. Следовательно, при отсутствии хотя бы одной

детали, входящей в состав редукторов типа А, работа всех сборочных постов будет остановлена, а значит и показатель производительности будет низким.

Подобная ситуация возникает в единичных случаях, например, на начальной стадии производства, однако и её важно оценить для эффективного запуска производства. Проведем регрессионный анализ приведенных выше результатов для получения функциональной зависимости выходного параметра от входных, а затем повторим расчет для основной стадии производства.

4.2. Регрессионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента для начальной стадии производства

Регрессионный анализ является одним из основных методов установления функциональных связей между входными и выходным параметрами. Для построения уравнения регрессии использован центральный четырехфакторный композиционный план второго порядка. Согласно методике, описанной в параграфе 2.5, он состоит из трех серий:

1. Линейная.
2. В центральной точке.
3. В «звездных» точках [79, 108].

Ортогональный план 2k, использованный для построения регрессии, предполагает, что каждый из k факторов изменяется на двух уровнях: +1 и -1. Преобразуем значения факторов x_1, x_2, x_3, x_4 в относительные координаты x'_1, x'_2, x'_3, x'_4 и определим их значения в точках *-2; -1, 0, 1, 2*. Результаты преобразования исходных данных приведены в Таблице 15.

Таблица 15.

Преобразованные координаты ортогонального плана 2^k

Физические переменные	x_1	x_2	x_3	x_4
В центре эксперимента ($x'_i = 0$)	7	8,5	10,5	12
Верхний уровень ($x'_i = +2$)	9	12	14	16
Нижний уровень ($x'_i = -2$)	5	5	7	8

Продолжение таблицы 15.

Физические переменные	x_1	x_2	x_3	x_4
Верхний уровень ($x_{'i} = +1$)	8,00	10,25	12,25	14,00
Нижний уровень ($x'_i = -1$)	6,00	6,75	8,75	10,00
Δx	2	3,5	3,5	4

На основании полученных данных построена таблица первой серии и по методике, описанной в параграфе 2.5, рассчитаны коэффициенты аппроксимации для линейной модели (Таблица 16).

Таблица 16.

Расчет коэффициентов аппроксимации для первой серии экспериментов

u	x_0'	x_1'	x_2'	x_3'	x_4'	x_1x_2 / x_5'	x_1x_3 / x_6'	x_1x_4 / x_7'	x_2x_3 / x_8'	x_2x_4 / x_9'	x_3x_4 / x_{10}'	$x_1x_2x_3$ / x_{11}'	$x_1x_2x_4$ / x_{12}'	$x_2x_3x_4$ / x_{13}'	$x_1x_2x_3x_4$ / x_{14}'	Yu	Yp
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1836,88	1837,52
2	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1838,42	1837,79
3	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1832,01	1831,37
4	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1384,54	1385,18
5	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	1870,3	1869,67
6	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1840,65	1841,28
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1385,91	1385,27
8	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1873,01	1873,64
9	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1384,44	1383,81
10	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1870,43	1871,06
11	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1600,05	1599,42
12	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1381,11	1381,74
13	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1877,52	1876,89
14	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1598,07	1598,71
15	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	1600,57	1601,21
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1606,75	1606,12
ai	1673,792	-63,2969	181,1109	-0,39297	-1,3875	45,38438	1,336719	0,3625	0,144531	-1,10938	0,933594	-0,42578	-0,40937	0,502344	0,974219		

Вторая серия эксперимента проведена в центральной точке (Y_u = *1803,8*) и показала, что линейная модель недостаточно хорошо аппроксимирует полученные данные. Поэтому проведена третья серия эксперимента по рототабельному плану в звездных точках. Коэффициенты регрессии при квадратичных членах и фиктивной переменной рассчитывались по формуле 2.23 и представлены в Таблице 17.

Таблица 17.

Коэффициенты регрессии при квадратичных членах и фиктивной переменной

u	x_0,	x_1^2 / x_{15},	x_2^2 / x_{16},	x_3^2 / x_{17},	x_4^2 / x_{18},	Y_u	Y_p
1	1	1	1	1	1	1836,8875	1859,935
2	1	1	1	1	1	1838,4188	1860,202
3	1	1	1	1	1	1832,0063	1853,789
4	1	1	1	1	1	1384,5438	1407,591
5	1	1	1	1	1	1870,3	1892,083
6	1	1	1	1	1	1840,65	1863,697
7	1	1	1	1	1	1385,9063	1407,689
8	1	1	1	1	1	1873,0125	1896,06
9	1	1	1	1	1	1384,4438	1406,227
10	1	1	1	1	1	1870,4313	1893,478
11	1	1	1	1	1	1600,05	1621,833
12	1	1	1	1	1	1381,1063	1404,153
13	1	1	1	1	1	1877,5188	1899,302
14	1	1	1	1	1	1598,075	1621,122
15	1	1	1	1	1	1600,575	1623,622
16	1	1	1	1	1	1606,75	1628,533
17	1	0	0	0	0	1803,8	1803,8
18	1	4	0	0	0	1413	1374,026
19	1	4	0	0	0	1677,9	1627,214
20	1	0	4	0	0	2356	2138,842
21	1	0	4	0	0	1286,9	1414,398
22	1	0	0	4	0	1780,5	1743,284
23	1	0	0	4	0	1797,3	1744,856
24	1	0	0	0	4	1806,5	1760,745
25	1	0	0	0	4	1810,2	1766,295
a	1803,8	-75,79	-6,79	-14,93	-10,07		

Полученное уравнение регрессии выражено формулой 4.1 и проиллюстрировано графиком на Рисунке 4.3.

$$y_p = 1803{,}79 - 63{,}3x_1' + 181{,}11x_2' - 0{,}39x_3' - 1{,}39x_4' + 45{,}38x_1{}'x_2' +$$
$$+1{,}34x_1{}'x_3' + 0{,}36x_1{}'x_4' + 0{,}14x_2{}'x_3' - 1{,}11x_2{}'x_4' + 0{,}93x_3{}'x_4' -$$
$$-0{,}43x_1{}'x_2'x_3' - 0{,}41x_1'x_2'x_4' + 0{,}5x_2'x_3'x_4' + 0{,}97x_1{}'x_2{}'x_3{}'x_4' -$$
$$- 75{,}79{x_1'}^2 - 6{,}79{x_2'}^2 - 14{,}93{x_3'}^2 - 10{,}07x_4'^2, \qquad (4.1)$$

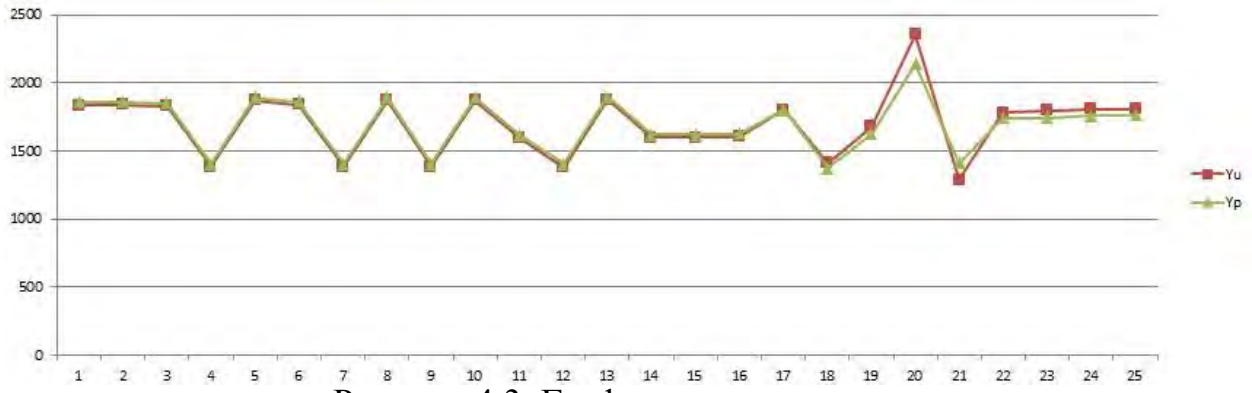


Рисунок 4.3. График уравнения регрессии

Регрессионный анализ направлен на определение функциональной взаимосвязи всех факторов. В результате выполнения регрессионного анализа получена математическая модель, которая рассчитывает значение эффективности использования производственных мощностей в зависимости от заданной программы производства. С помощью дисперсионного анализа могут быть отброшены малозначимые факторы, вследствие чего математическая модель упрощается. Данная математическая модель может применяться для выявления рационального количества производственных мощностей в зависимости от плана для начальной стадии производственного процесса.

4.3. Дисперсионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента для основной стадии производства

Результаты эффективности для каждого эксперимента для основной стадии приведены в Таблице 18.

Таблица 18.

Значения эффективности использования производственных мощностей для разных значений программы выпуска изделий для основной стадии производства.

x_2	x_3	x_4	x_1		
			5	7	9
500	700	800	1846	1589,33	1238,19
		1200	1841,06	2315,81	1811,53
		1600	1846,02	2495,72	2280,78
	1050	800	1843,07	2220,26	1729,66
		1200	1843,12	2495,6	2398,64
		1600	1842,05	2489,65	3139,4
	1400	800	1840,17	2497,73	2314,56
		1200	1842,05	2495,66	3074,75
		1600	1844,03	2492,67	3148,36
850	700	800	1894,89	2068,12	1614,03
		1200	1900,94	2640,76	2259,66
		1600	1901,08	2638,52	3015,54
	1050	800	1901	2648,62	2178,85
		1200	1902,05	2645,56	2921,98
		1600	1903	2642,7	3288,36
	1400	800	1900,97	2641,52	2820,42
		1200	1895,04	2640,71	3298,37
		1600	1893,02	2643,65	3292,3
1200	700	800	1899,05	2613,32	2029,92
		1200	1898,06	2708,59	2750,26
		1600	1896,96	2708,56	3443,28
	1050	800	1900,02	2674,58	2667,34
		1200	1898,4	2658,72	3439,17
		1600	1897,98	2658,59	3445,29
	1400	800	1903,96	2680,6	3382,53
		1200	1902,05	2654,72	3415,24
		1600	1897,95	2659,66	3416,21

На Рисунке 4.4 изображен график эффективности использования производственных мощностей, из которого видно, что для первого эксперимента наиболее эффективно использовать 5 рабочих мест, для экспериментов 2-5, 7, 10-11, 13, 19, 22 эффективно использовать 7 рабочих мест, для экспериментов 6, 8-9, 12, 14-18, 20-21, 23-27 эффективно использовать 9 рабочих мест.

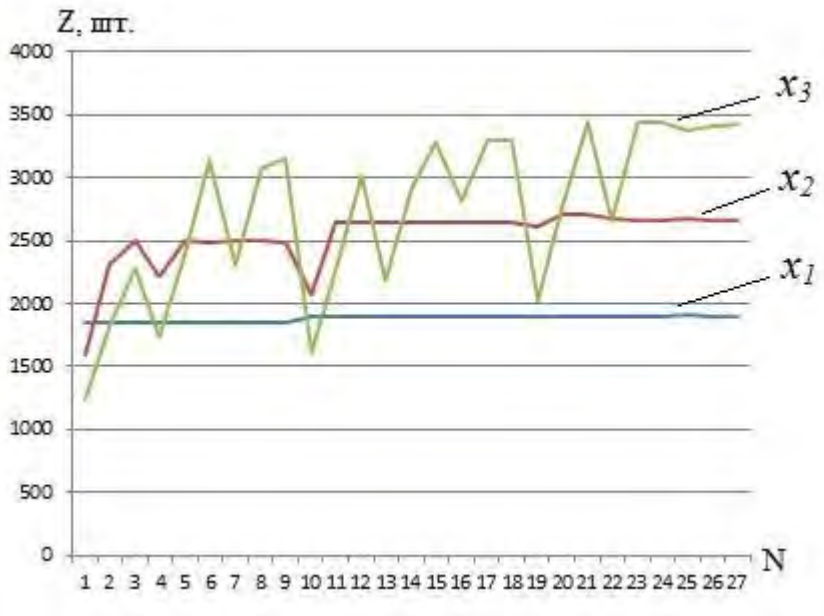


Рисунок 4.4. График эффективности использования производственных мощностей для основной стадии

Данные дисперсионного анализа для основной стадии представлены в Таблице 19.

Таблица 19.

Дисперсионный анализ для основной стадии

Фактор	σ	F_i	F_T
x1	10 727 435,30	5 363 717,65	155,13
x2	1 985 324,00	992 662,00	28,71
x3	1 668 844,25	834 422,13	24,13
x4	2 044 207,98	1 022 103,99	29,56
$x_1 x_2$	1 151 269,57	287 817,39	8,32
$x_1 x_3$	1 871 559,57	467 889,89	13,53
$x_1 x_4$	2 279 487,87	569 871,97	16,48
$x_2 x_3$	474 786,14	118 696,53	3,43
$x_2 x_4$	138 303,20	34 575,80	1,00
$x_3 x_4$	153 128,85	38 282,21	1,11
$x_1 x_2 x_3$	444 870,68	55 608,83	1,61
$x_1 x_2 x_4$	82 546,89	10 318,36	0,30
$x_1 x_3 x_4$	90 921,43	11 365,18	0,33
$x_2 x_3 x_4$	43 567,92	5 445,99	0,16
$x_1 x_2 x_3 x_4$	366 443,50	22 902,72	0,66
Общее	23 522 697,16	294 033,71	

Проверка результатов дисперсионного анализа показала, что суммарное значение сумм квадратов отклонений равно 23 522 697,16. Следовательно, дисперсионный анализ проведен корректно.

Значения критерия Фишера каждого фактора и их взаимодействий представлены на Рисунке 4.5.

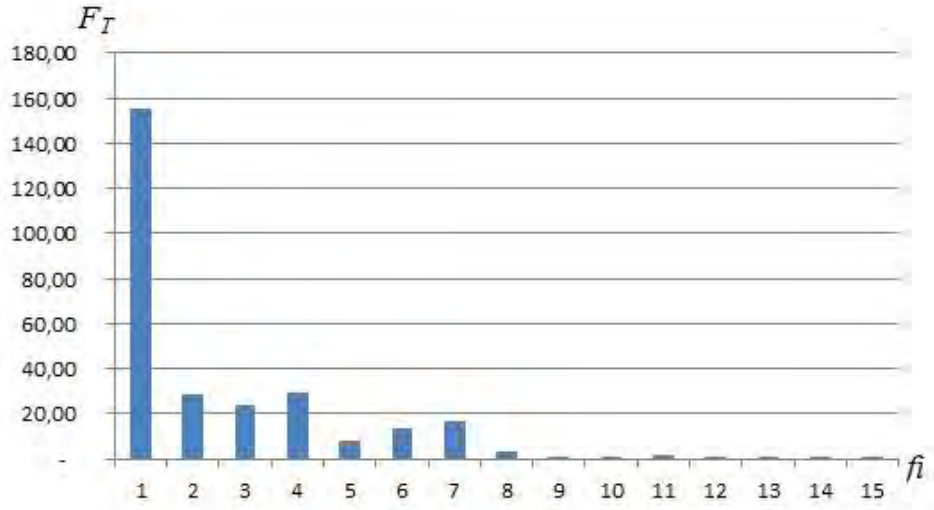


Рисунок 4.5. Значения критерия Фишера для основной стадии

Дисперсионный анализ показал, что, в отличие от начальной стадии производства, на результат оказывают влияние все 4 фактора, а также двойное взаимодействие первого фактора с остальными. Отличие основной стадии заключается в том, что при расчете принято, что редукторы типов Б и В могут изготавливаться с первой минуты расчета, т.к. собственное производство шестерней уже было начато, и имелся их запас.

Проведем регрессионный анализ для получения уравнения зависимости факторов для основной стадии.

4.4. Регрессионный анализ результатов проведенного оптимизационного эксперимента для основной стадии производства

Так же как и для начальной стадии для построения регрессии использован ортогональный план 2^k. Результаты преобразования исходных данных приведены в Таблице 20.

Таблица 20.

Расчет коэффициентов аппроксимации для первой серии экспериментов для основной стадии производства

u	x_0'	x_1'	x_2'	x_3'	x_4'	x_1x_2 / x_5'	x_1x_3 / x_6'	x_1x_4 / x_7'	x_2x_3 / x_8'	x_2x_4 / x_9'	x_3x_4 / x_{10}'	$x_1x_2x_3$ / x_{11}'	$x_1x_2x_4$ / x_{12}'	$x_2x_3x_4$ / x_{13}'	$x_1x_2x_3x_4$ / x_{14}'	Yu	Yp
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2983,58	3003,09
2	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	2835,56	2815,07
3	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	2639,58	2619,07
4	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	2819,27	2839,78
5	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	-1	2274,61	2254,10
6	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	2532,47	2552,98
7	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	1	2581,27	2560,76
8	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	2278,03	2298,54
9	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	2592,51	2572
10	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	2281,28	2301,79
11	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	2219,41	2198,90
12	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1710,82	1731,33
13	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	2030,49	2009,98
14	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	2219,23	2239,74
15	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	2208,98	2229,49
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	2187,41	2166,9
ai	2399,59	187,16	82,23	126,65	102,68	78,56	91,26	69,04	-15,78	-40	-54,96	-40,61	-68,2	28,17	57,28		

На основании полученных результатов построена таблица первой серии и по методике, описанной в параграфе 2.5, рассчитаны коэффициенты аппроксимации для линейной модели основной стадии.

Вторая серия эксперимента проведена в центральной точке (Y_u = 2645,56). Третья серия эксперимента проведена по рототабельному плану в звездных точках. Коэффициенты регрессии при квадратичных членах и фиктивной переменной рассчитывались по формуле 2.23 и представлены в Таблице 21.

Таблица 21.

Коэффициенты регрессии при квадратичных членах и фиктивной переменной для основной стадии

u	x_0'	x_1^2 / x_{15}'	x_2^2 / x_{16}'	x_3^2 / x_{17}'	x_4^2 / x_{18}'	Y_u	Y_p
1	1	1	1	1	1	2982,58	3059,52
2	1	1	1	1	1	2835,56	2871,48
3	1	1	1	1	1	2639,58	2675,50
4	1	1	1	1	1	2819,27	2896,22
5	1	1	1	1	1	2274,61	2310,53
6	1	1	1	1	1	2532,47	2609,41
7	1	1	1	1	1	2581,27	2617,19
8	1	1	1	1	1	2278,03	2354,98
9	1	1	1	1	1	2592,51	2628,43
10	1	1	1	1	1	2281,28	2358,22
11	1	1	1	1	1	2219,41	2255,33
12	1	1	1	1	1	1710,82	1787,76
13	1	1	1	1	1	2030,49	2066,41
14	1	1	1	1	1	2219,23	2296,18
15	1	1	1	1	1	2208,98	2285,92
16	1	1	1	1	1	2187,41	2223,33
17	1	0	0	0	0	2645,56	2645,56
18	1	4	0	0	0	2921,98	2673,48
19	1	4	0	0	0	1902,05	1924,82
20	1	0	4	0	0	2658,72	2628,76
21	1	0	4	0	0	2495,60	2299,83
22	1	0	0	4	0	2640,71	2781,17
23	1	0	0	4	0	2640,76	2274,57
24	1	0	0	0	4	2642,70	2738,16
25	1	0	0	0	4	2648,62	2327,43
a	2345,56	-86,6	-45,32	-29,42	-28,19		

Полученное уравнение регрессии выражено формулой 4.2 и проиллюстрировано на Рисунке 4.6.

$$y_p = 2345{,}56 + 187{,}16x_1' + 82{,}23x_2' + 126{,}65x_3' + 102{,}68x_4' +$$
$$+78{,}56x_1{}'x_2' + 91{,}26x_1{}'x_3' + 69{,}04x_1'x_4' - 15{,}78x_2'x'_3 -$$
$$-40x_2'x_4' - 54{,}96x_3'x_4' - 40{,}61x_1{}'x_2'x_3' - 68{,}2x_1{}'x_2{}'x_4' +$$
$$+28{,}17x_2{}'x_3'x_4' + 57{,}28x_1{}'x_2{}'x_3{}'x_4' - 86{,}6x_1'^2 -$$
$$- 45{,}32x_2'^2 - 29{,}42x_3'^2 - 8{,}19x_4'^2, \qquad (4.2)$$

Рисунок 4.6. График уравнения регрессии основной стадии

Полученные уравнения в дальнейшем могут быть использованы при разработке элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений.

4.5. Разработка элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений

Для определения рационального количества сборочных постов на основном производстве разработана автоматизированная система принятия управленческих решений, основанная на данных, полученных посредством имитационного моделирования. Интерфейс элемента системы выполнен с использованием стандартных средств MS Excel (Рисунок 4.7).

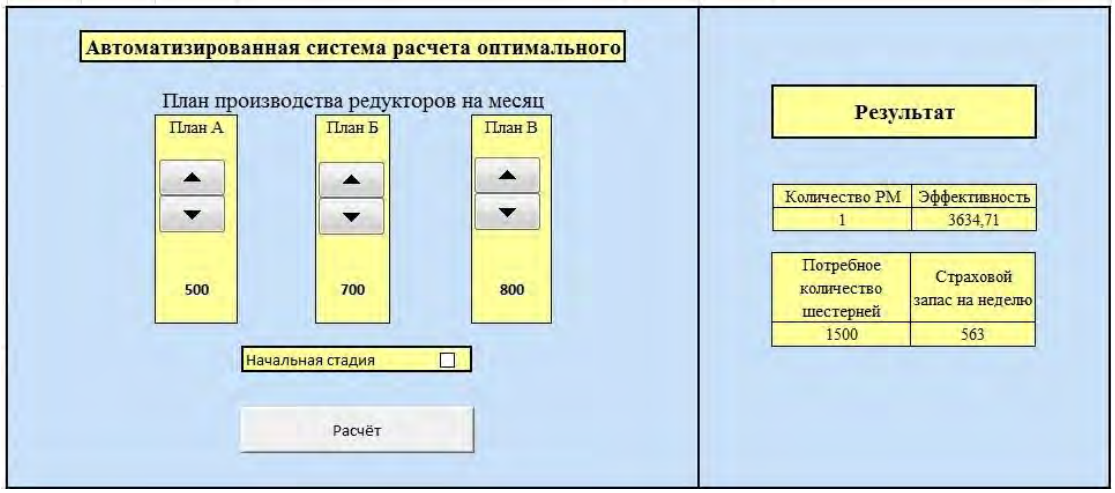


Рисунок 4.7. Интерфейс элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений

Разработанный интерфейс позволяет пользователю с помощью элементов управления формы выбрать значения плана производства редукторов трех типов на месяц и определить стадию производства: начальная или основная. После нажатия кнопки «Расчёт» на экран выводится рациональное количество сборочных постов, а также значение критерия эффективности использования производственных мощностей. Дополнительно система рассчитывает потребное количество шестерней и страховой запас заготовок на неделю.

Интерфейс автоматизированной системы принятия управленческих решений имеет простой вид, понятный пользователю и обеспечивает быстрый расчет необходимых параметров с помощью макроса.

Для разработки элемента системы принятия управленческих решений необходимо в MS Excel записать уравнения регрессии (4.1 – 4.2) для всех доступных вариантов значения x_1 *(cRm)* и заданных с помощью интерфейса значений x_2 *(планА),* x_3 *(планБ),* x_4 *(планВ)* (Рисунок 4.8). При этом необходимо преобразовать используемые значения параметров, в связи с тем, что при построении уравнения регрессии, ось координат факторов перенесена в центр эксперимента:

$$x'_i = \frac{x_i - 0{,}5(x_{i_{max}} + x_{i_{min}})}{0{,}5\Delta x_i}, \qquad (4.3)$$

	A	B	C
11			
12	x1	x'1	Y
13	1	-6	3634,72
14	2	-5	3318,27
15	3	-4	2961,74
16	4	-3	2565,14
17	5	-2	2128,47
18	6	-1	1651,72
19	7	0	1134,90
20	8	1	578,00
21	9	2	-18,97
22	10	3	-656,01
23			
24		1	3 634,71

Рисунок 4.8. Расчет значений эффективности производства (Y) для всех допустимых x_1

С помощью функций MS Excel определено максимальное значение Y (ячейка C24) и соответствующее ему x_1 (ячейка B24). Построение уравнений регрессии необходимо сделать как для начальной, так и для основной стадии производства. После выбора новых значений на интерфейсе и установки флажка «начальная стадия» (в случае необходимости) происходит пересчет значений критерия эффективности производства. При нажатии кнопки «Расчёт» с помощью макроса система проверяет, какую стадию производства выбрал пользователь, и выводит необходимые значения рационального количества сборочных постов и соответствующее ему значение критерия эффективности на интерфейс.

Расчет потребного количества шестерней производится путем сложения значений планБ и планВ. Расчет страхового запаса на неделю производится по формуле 3.7.

Результат расчетов элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений представлен в правой части Рисунка 4.7.

4.6. Рекомендации по построению элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений.

Для разработки элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений на базе имитационного моделирования и бережливого производства необходимо выполнить следующие шаги:

1. Разработать функциональную модель процесса производства изделий. При этом необходимо выделить основные задачи процесса и их подпроцессы.

2. Разработать многоуровневую имитационную модель рассматриваемого производственного процесса. Для этого требуется построить весь процесс, в обратном порядке, т.е. «снизу вверх». Путем объединения отдельных задач на основной диаграмме получается одна целостная модель. Настроить разработанную имитационную модель под конкретный процесс, т.е. внести все известные значения параметров производства и установить вероятностный закон распределения времени.

3. Для оценки достоверности провести верификацию разработанной модели. Сравнить результаты, полученные путем имитационного моделирования и с помощью расчетов в MS Excel (или в любой другой подходящей системе).

4. Внедрить элементы разработанной критериальной системы в построенный производственный процесс. Для анализа эффективности критериального подхода необходимо воспользоваться разработанной имитационной моделью. Для этого требуется сократить потери от излишних запасов деталей на складе по первому критерию. В целях реализации данного критерия необходимо в разработанную дискретно-событийную имитационную модель основного процесса добавить элементы динамического моделирования, которые позволят внедрить систему управления запасами на основе ПИ-регулятора.

5. Минимизировать время ожидания продукции незавершенного производства. Для этого необходимо провести статистический анализ всех

этапов построенного процесса и определить «узкие места». Построить оптимизационный эксперимент с функцией поиска рациоального размера партии заготовок и количества рабочих мест.

6. Применить к разработанной имитационной модели результаты первого и второго критериев. Провести оптимизационный эксперимент по третьему критерию с функцией поиска максимума эффективности использования рабочих мест сборочного производства. Определить количество сборочных постов, при котором достигается максимальная эффективность.

7. Определить возможные границы варьирования значений параметров количества сборочных постов и планов производства каждого изделия. Выбрать для каждого параметра минимальное, среднее и максимальное значение. Провести оптимизационные эксперименты для всех соотношений выбранных значений параметров как для основной, так и для начальной стадии производства.

8. Обработать полученные значения эффективности использования рабочих мест по методике планирования эксперимента. Получить уравнения зависимости параметра эффективности от входных параметров для каждой стадии производства.

9. Разработать элемент системы принятия управленческих решений, позволяющий определить рациональное количество рабочих мест и ожидаемое значение эффективности. Для этого на первом листе в MS Excel необходимо создать удобный интерфейс, в котором пользователю доступен выбор плана производства каждого изделия в заданных границах варьирования, а также выбор стадии производства. На двух других листах необходимо записать уравнения зависимости (в рассматриваемой задаче 4.1 – 4.2) для обеих рассматриваемых стадий производства. При этом значения входных параметров необходимо преобразовать по причине переноса оси координат в центр эксперимента перед построением уравнений регрессии. Уравнения зависимости необходимо записать для каждого значения

количества рабочих мест, не меняя коэффициенты регрессии и значения планов производства каждого изделия. Из полученного массива решений, с помощью средств MS Excel, необходимо выбрать максимальное значение эффективности и соответствующее ему количество рабочих мест. Дополнительно рассчитывается плановое количество второстепенных изделий и размер страхового запаса заготовок для их производства.

10. На основной интерфейс добавить кнопку, для которой назначить макрос, определяющий выбранную пользователем стадию производства, а также выводящую на экран значения, соответствующие этой стадии.

Таким образом, в результате выполненной работы разработана система критериальных выражений, позволяющая повысить эффективность работы производственного предприятия на принципах концепции бережливого производства. Представлен метод управления размером запасов деталей на основе ПИ-регулятора. Данный метод проанализирован на разработанной модели путем объединения двух подходов к имитационному моделированию. Предложена методика получения многофункциональных зависимостей рационального количества рабочих мест от программы выпуска изделий на основе построенной многоуровневой имитационной модели процесса.

4.7. Применение результатов работы в ООО «ПАКС» и в учебном процессе Московского авиационного института (национального исследовательского университета)».

Разработанная в результате проведенного исследования методика использована в ООО «ПАКС» в качестве инструмента прогнозирования производственных показателей при проектировании производственных процессов сборки компонентов для авиационной техники. Внедрение результатов диссертационной работы подтверждено соответствующим актом.

Для апробации результатов работы построены функциональная и имитационная модели производственных процессов предприятия,

учитывающие загрузку и пропускную способность этапов производства, смоделированы различные варианты загрузки сборочных постов. В ходе применения методики оптимизирован производственный процесс сборки распределительных устройств, определены возможные «узкие места» на всех этапах производства.

В силу того, что в момент апробации ООО «ПАКС» еще не начало серийное производство распределительных устройств, многие параметры получены расчетным путем с помощью имитационного моделирования и подтверждены на практике. С помощью применения предложенной методики определены показатели производственной системы, достигаемые при ранее запланированной организации процессов, такие как: длительность производственного цикла, производительность сборочных постов, а также разработаны предложения по оптимизации количества рабочих мест. В результате внедрения разработанных предложений при сборке компонентов для авиационной техники длительность производственного цикла сокращена в среднем на 20%, производительность сборочных постов увеличена на 22 %.

Также основные материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры технологий и систем автоматизированного проектирования металлургических процессов МАИ в курсах «Основы математического и имитационного моделирования» и «TSP-технологии».

4.8. Выводы по Главе 4

1. Проведены оптимизационные эксперименты для каждого соотношения входных параметров в целях получения общей зависимости, которая позволила для разных вариантов выполнения производственной программы без дополнительных расчетов получать выходные значения эффективности загрузки рабочих мест. Установлено, что на интервале с 1 по 9 эксперимент максимальный эффект производства достигается при наличии 5 рабочих мест, далее при наличии 7 рабочих местах. Использование 9

рабочих мест при рассматриваемых вариантах производственной программы неэффективно.

2. Для выявления значимых параметров проведен дисперсионный анализ, который показал, что наибольшее влияние на значение эффективности использования рабочих мест оказывают только первый (количество рабочих мест) и второй (программа выпуска редукторов типа А) параметры, а также их двойное взаимодействие. Отсутствие влияния двух других факторов объясняется тем, что при проведении оптимизационных экспериментов рассматривалась начальная стадия производства, т.е. изучен этап запуска, при котором на предприятии еще не имелся запас шестерней собственного производства, необходимый для сборки редукторов типов Б и В.

3. Проведен регрессионный анализ для начальной стадии производства в целях получения уравнения функциональной зависимости. Для получения уравнения использован центральный четырехфакторный композиционный план второго порядка. Для дальнейших расчетов значения факторов x_1, x_2, x_3, x_4 преобразованы в относительные координаты x'_1, x'_2, x'_3, x'_4, т.е. ось координат факторов перенесена в центр эксперимента. Получено уравнение регрессии, позволяющее определить рациональное количество рабочих мест в зависимости от плана производства для начальной стадии.

4. В разработанную имитационную модель внесены корректировки, позволяющие рассмотреть производственный процесс на основной стадии. Проведены оптимизационные эксперименты для тех же вариантов входных параметров, что и в случае начальной стадии производства. Установлено, что для первого эксперимента наиболее эффективно использовать 5 рабочих мест, для экспериментов 2-5, 7, 10-11, 13, 19, 22 эффективно использовать 7 рабочих мест, для экспериментов 6, 8-9, 12, 14-18, 20-21, 23-27 эффективно использовать 9 рабочих мест.

5. Дисперсионный анализ полученных результатов показал, что наибольшее влияние в случае основной стадии производства оказывают все

четыре фактора, а также двойное взаимодействие первого фактора (количество рабочих мест) с каждым из трех других (планы производства редукторов трех типов).

6. Проведен регрессионный анализ значений и получено уравнение функциональной зависимости факторов для основной стадии производства.

7. Разработан элемент автоматизированной системы принятия управленческих решений с помощью средств MS Excel. Инструмент позволяет пользователю выбрать исходные значения программы выпуска редукторов трех типов, а также установить «флажок» в случае, если рассматривается начальная стадия производства. В результате на экранную форму выводятся значения рационального количества рабочих мест, эффективность их использования, потребное количество шестерней и размер страхового запаса заготовок для изготовления шестерней.

8. Для обеспечения корректной работы элемента системы принятия управленческих решений выбранные пользователем значения факторов преобразуются в относительные координаты. Для каждого соотношения допустимых значений количества рабочих мест (от 1 до 10) прописано уравнение с постоянными значениями параметров объемов производства, которые определены пользователем. С помощью средств MS Excel производится поиск максимального значения эффективности использования производственных мощностей и соответствующего ему количеству рабочих мест. Данный расчет производится одновременно как для основной, так и для начальной стадии производства. Итоговые значения, выводимые на экранную форму, зависят от установленного «флажка» по стадии производства.

9. Даны рекомендации для разработки элемента автоматизированной системы принятия управленческих решений на базе имитационного моделирования и концепции бережливого производства. Предложенный метод является универсальным и может быть использован для различных типов производства.

10. Результаты работы внедрены в работу ООО «ПАКС» на этапе проектирования производственных процессов сборки шести комплектующих для авиационной техники. Использование предложенной методики позволило сократить длительность производственного цикла в среднем на 20%, увеличить производительность сборочных постов на 22 %. Основные материалы работы используются в учебном процессе «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» в курсах «Основы математического и имитационного моделирования» и «TSP-технологии».

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования получены следующие выводы:

1. В результате проведенного анализа литературы выявлено, что все существующие инструменты планирования производства и системы поддержки принятия управленческих решений успешно реализуются на уже функционирующих предприятиях. При этом определено, что они не могут быть использованы на этапе подготовки производства, т.к. предприятие не обладает необходимыми статистическими данными. Предложено использовать комбинированное имитационное моделирование для планирования процессов подготовки производства.

2. Построена функциональная модель производственного процесса с помощью метода IDEF0. При построении модели выделены отдельные подпроцессы и изучена их структура. На основе построенной функциональной модели разработана многоуровневая имитационная модель производственного процесса, в которой комбинируются различные подходы и эксперименты.

3. Обоснована система критериальных выражений на основе бережливого производства, устанавливающая взаимосвязь между параметрами производственного процесса. Для реализации критериального подхода проведена комбинация подходов в построенной имитационной модели.

3.1. Первый критерий - выражение, позволяющее сокращать потери от излишних запасов деталей на складе. Впервые для решения задачи управления ресурсами машиностроительного предприятия предложено применить ПИ-регулятор. Для реализации критерия в построенную дискретно-событийную модель внедрены элементы динамического моделирования процессом управления. Наибольшую эффективность

применение ПИ-регулятора достигает в случае многократного изменения плана выпуска продукции.

3.2. Второй критерий направлен на минимизацию времени ожидания продукции незавершенного производства. Для его реализации проведен статистический анализ «узкого места» процесса, определена длительность ожидания заготовкой очередного этапа. Построен оптимизационный эксперимент с функцией поиска рационального размера партии заготовок и количества рабочих мест, с помощью чего максимальная длительность ожидания заготовок сократилась в 4 раза.

3.3. После оптимизации процесса по первым двум критериям проведен эксперимент поиска рационального количества рабочих мест на производстве по третьему критерию в программе имитационного моделирования. Критерий направлен на повышение эффективности использования производственных мощностей на основном производстве. В рассматриваемой задаче показатель эффективности производственных мощностей повысился на 22% по сравнению с полученным значением при наличии трех рабочих мест.

4. Разработан элемент системы поддержки принятия управленческих решений с помощью MS Excel на основе комбинированного имитационного моделирования и концепции бережливого производства. Результатом работы системы является автоматический расчет значений рационального количества рабочих мест, эффективности их использования, потребного количества изделий собственного производства и размера страхового запаса заготовок для изготовления этих изделий. Методика, применяемая при создании инструмента, является универсальной и может быть использована для различных типов производства.

5. Разработанные в результате проведенного исследования модели и инструменты использованы в ООО «ПАКС» при проектировании производственных процессов сборки шести типов изделий авиационной техники. В результате длительность производственного цикла сокращена в

среднем на 20%, производительность сборочных постов увеличена на 22%. Также результаты работы внедрены в учебный процесс МАИ в курсы «Основы математического и имитационного моделирования» и «TSP-технологии».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

CAD - computer-aided design.

CAE - computer-aided engineering.

CALS - Continuous Acquisition and Life cycle Support.

CAM - computer-aided manufacturing.

CRP - Capacity Requirements Planning.

DSS - Decision Support Systems.

ERP - Enterprise Resource Planning.

ESS - Executive Support Systems.

GPSS - General Purpose Simulation System

MES - Manufacturing Execution System.

MIS - Management Information Systems.

MRP - Material Requirements Planning

OLAP - Online Analytic Processing.

PDM - Product Data Management

PPR - Product, Process and Resources.

TPM - Total Productive Maintenance.

TPS - Toyota Production System

ЕИП - единое информационное пространство.

ЖЦ – жизненный цикл

САПР - система автоматизированного проектирования

СМО – система массового обслуживания

ТПП - технологическая подготовка производства

ЭВМ - электронная вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков А.В. Автоматизация технологической подготовки производства для малых инновационных предприятий в машиностроении: Дис. …док. тех. наук. ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет, Брянск: 2012. 376 с.

2. ГОСТ 14.004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. М: Стандартинформ, 2005. 7 с.

3. Есаулов В.Н., Чернета С.Г. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2011. 98 с.

4. Смоляков А.М. Оперативно-производственное планирование: Конспект лекций. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. 81 с.

5. Депутатова Л.Н., Ленина В.В., Шубина Н.Н. Теория, практика, тенденции развития оперативно-производственного планирования: Учебно-методологическое пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 100 с.

6. Третьякова Е.В. Оперативное управление машиностроительным производством: Конспект лекций для студентов высших учебных заведений по специальности «Экономика и организация производства (по направлениям)». Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2011. 72 с.

7. Операционный менеджмент: Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения / С.Э. Пивоваров [и др.]. СПб.: Питер, 2011. 544 с.

8. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Издание Ленинградского государственного университета, 1939. 67 с.

9. Яблочников Е.И., Молочник В.И., Фомина Ю.Н. Реинжиниринг бизнес-процессов проектирования и производства: Учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО, 2008. 152 с.

10. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии: Монография. М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 320 с.

11. Левин А.И., Судов Е.В. Концепция развития CALS-технологий в промышленности России. М.: НИЦ CALS-технологий Прикладная логистика, 2002. 131 с.

12. Чейз Ричард Б., Эквилайн Николас Дж., Якобс Роберт Ф. Производственный и операционный менеджмент. (Изд. 8-е; Пер. с англ.). М.: Вильямс, 2003. 704 с.

13. Оладов Н. А., Питеркин С. В., Исаев Д. В. Точно вовремя для России. Практика применения ERP-систем. (Изд. 3-е.). М.: Альпина Паблишерз, 2010. 368 с.

14. Гаврилов Д.А. Управление производством на базе стандарта MRP II – СПб.: Питер, 2003. 352 с.

15. Информационные технологии в экономике и управлении: Учебник для СПО (Изд. 2-е) / Под ред. В.В. Трофимова. М.: Издательство Юрайт, 2016. 482 с.

16. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Компьютерные технологии в жизненном цикле изделия: Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 188 с.

17. Орлова Ю.А., Основы управления предприятием: Учебное пособие. Волгоград: ВГАФК, 2013. 317 с.

18. Федорова Г.Н. Информационные системы (Изд. 3-е.) М.: Академия, 2013. 208 с.

19. Бураков П.В. Информационные системы в управлении предприятием. СПб: Университет ИТМО, 2016. 57 с.

20. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009. 592 с.

21. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки: Монография / Н.А. Спирин [и др.]. Екатеринбург:УрФУ, 2011. 462 .

22. Гараева Ю., Загидуллин Р., Сун Кай Цин Российские MES-системы, или Как вернуть производству оптимизм [Электронный ресурс] - https://sapr.ru/article/14614 (дата обращения 24.04.2017)

23. Компания «Первый БИТ». 1С:ERP 2. [Электронный ресурс] - http://1solution.ru/produkty-i-uslugi/ (дата обращения 24.04.2017)

24. Кузнецов С.Д. Введение в реляционные базы данных (Изд. 2-е.). М.: Интуит, 2016. 248 с.

25. Туманов В.Е. Основы проектирования реляционных баз данных. М.: Интуит, 2016. 504 с.

26. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях: Монография. / В.А. Геловани [и др.]. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 304 с.

27. Sauter V.L. Decision Support Systems for Business Intelligence. New Jersey: Wiley, 2010. 453 c.

28. Burstein F., Holsapple C.W. Handbook on decision support systems 1. Basic themes. Leipzig: Springer, 2008. 907 p.

29. Jao C.S. Efficient Decision Support Systems - Practice and challenges from current to future. Rijeka: InTech, 2011. 566 p.

30. Devlin G. Advances in decision support systems. Rijeka: InTech, 2010, 352 p.

31. Turban E., Aronson J.E., Liang T.P. Decision support systems and intelligent systems. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 955 p.

32. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2013. 704 с.

33. Алехина Г.В. Информационные технологии в экономике и управлении. М.: Московский международный институт эконометрики, информатики, финансов и права, 2004. 236 с.

34. Компания «Интерфейс». Система CrystalInfo7.5. [Электронный ресурс] - http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/CRYSTAL/seaginfo.htm (дата обращения 27.04.2017)

35. Национальный открытый университет «Интуит». Информационные технологии в управлении: Курс лекций. [Электронный ресурс] - http://www.intuit.ru/studies/courses/1055/271/lecture/6876?page=8 (дата обращения 27.04.2017)

36. Киселева М.В. Имитационное моделирование систем в среде Anylogic: Учебно-методическое пособие. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 88 с.

37. Нохрина Г.Л. Математическое и имитационное моделирование: Курс лекций. Екатеринбург: ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет, 2014. 43 с.

38. Майер Р.В. Компьютерное моделирование: Учебно-методическое пособие. Глазов: ГГПИ, 2015. 620 с.

39. Аверина Т.А. Построение алгоритмов статистического моделирования систем со случайной структурой: Учебное пособие. Новосибирск: РИЦ НГУ, 2015. 155 с.

40. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. (Изд. 2-е.). М.: Макс Пресс, 2009. 436 с.

41. Шеннон Р. Имитационное моделирование – искусство и наука (Пер. с англ.). М.: Мир, 1978. 420 с.

42. Дрогобыцкий И.Н. Системный анализ в экономике: Учебник. М.: М. ЮНИТИ-ДАНА, 2012. 423 с.

43. Мичасова О.В. Имитационное моделирование экономических систем: проектно-ориентированный подход: Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. 186 с.

44. Lim E.W.C. Discrete event simulations: development and applications. Rijeka: InTech, 2012. 206 p.

45. Evon M.O.A.T., Asim A.E.S. Handbook of research on discrete event simulation environments: technologies and applications. New York: Information Science Reference, 2009. 585 p.

46. Conceptual modeling for discrete-event simulation. / S. Robinson [и др.]. New York: CRC Press, 2010. 530 p.

47. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания. (Изд. 4-е.). М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1963. 236 с.

48. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS WORLD: Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 368 с.

49. Алиев Т.И., Муравьева-Витковская Л.А., Соснин В.В. Моделирование: задачи, задания, тесты. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 197 с.

50. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем: Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.

51. Красс М.С., Чупрынов Б.П. Математические методы и модели для магистрантов экономики: Учебное пособие. (Изд. 2-е.). СПб.: Питер, 2010. 496 с.

52. Sterman J. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. New York: McGraw-Hill, 2000. 1008p.

53. Palm W. J. System Dynamics. (3-rd ed.). NY: McGraw-Hill, 2014. 926 p.

54. Karnopp Dean C. System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems (5-nd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 645 p.

55. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении. М.: Издательство Московского университета, 2011. 304 с.

56. Wolstenholme E. F. Qualitative vs. quantitative modelling: the evolving balance // Journal of the Operational Research Society. Volume 50, Issue 4. 1999. pp. 422–428.

57. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: Учебное пособие. М.: Инфра-М, 2012. 253 с.

58. Agent-based models of the Economy: from theories to applications / R. Boero [и др.]. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.

59. Hokamp S., Gulyás L., Koehler M., Wijesinghe S. Agent-based modeling of tax evasion: theoretical aspects and computational Simulations. Chennai: Wiley, 2018. 364 p.

60. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.

61. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование (Изд. 3-е; Пер. с англ.). СПб.; Питер, Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.

62. Маликов Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: Учебное пособие. Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. 296 с.

63. Кокарева В.В., Смелов В.Г., Шитарев И.Л. Имитационное моделирование производственных процессов в рамках концепции «Бережливого производства» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета) // Выпуск № 3-3 (34). 2012. с. 131-136

64. Дмитриев С.А., Саломатина А.А. Реинжиниринг бизнес-процессов проектирования и производства: Методические рекомендации к лабораторному практикуму / Под ред. Е. И. Яблочникова. СПб: СПбГУИТМО, 2008. 236 с.

65. Компания Siemens PLM Software. Обзор продукта Plant Simulation. [Электронный ресурс] - http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml#lightview-close (дата обращения 05.07.2017)

66. Щербаков С.М. Имитационное моделирование экономических процессов в системе Arena: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), 2012. 128 с.

67. Боев В. Д., Кирик Д. И., Сыпченко Р. П. Компьютерное моделирование: Пособие для курсового и дипломного проектирования. СПб.: ВАС, 2011. 348 с.

68. Семенычев Ф.А. Бережливое производство для руководителей. Ливны: Интернет-издательство Web-Kniga, 2014. 59 с.

69. Вялов А.В. Бережливое производство: Учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2014. 100 с.

70. Манн Д. Бережливое управление бережливым производством. (Пер. с англ.) / Под ред. В.В.Брагина. М.:РИА «Стандарты и качество», 2009. 208 с.

71. Скударь Г.М. Бережливое производство. Основные понятия. Инструменты бережливого производства: Учебное пособие. Краматорск: ЗАО «Новокраматорский машиностроительный завод», 2009. 57 с.

72. Лайкер Дж. К. Дао Тойота: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира. М.: Альпина Бизнес Бук, 2005. 402 с.

73. Вумек Дж. П., Джонс Д. Т. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. (Изд. 12-е; Пер. с англ.). М.: Альпина Паблишер, 2018. 31 с.

74. Голдрат Э.М., Кокс Дж. Цель: процесс непрерывного улучшения. (Изд. 4-е). Минск: Попурри, 2018. 400 с.

75. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уход от массового производства. М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2008. 194 с.

76. Хоббс Д. Внедрение бережливого производства. Практическое руководство по оптимизации бизнеса. Минск: Гревцов Паблишер, 2008. 352 с.

77. Салмин И.Д. Математические методы решения оптимизационных задач. М.: МИФИ, 2004. 156 с.

78. Кубланов М.С. Математическое моделирование: Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов: Учебное пособие. (Изд. 3-е). М.: МГТУ ГА, 2004. 108 с.

79. Лунев В.А. Математическое моделирование и планирование эксперимента: Учебное пособие. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2012. 153 с.

80. Шашков В.Б. Прикладной регрессионный анализ (многофакторная регрессия): Учебное пособие. Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ, 2003. 363 с.

81. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.

82. Абомелик Т.П. Методология планирования эксперимента. Часть 1: Учебное пособие. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет (УлГТУ), 2011. 38 с.

83. РД 50.1.028-2001. Методология функционального моделирования IDEF0: Руководящий документ. Издание официальное. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 75 с.

84. Integrated computer-iaded manufacturing (ICAM) architecture part 11. Volume IV - Function Modeling Manual (IDEF0) / Русская редакция стандарта по методологии IDEF0. М.: МетаТехнология, 1993. – 91 с.

85. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем: Учебное пособие. Норильск: НИИ, 2015. 135 с.

86. Мезенцев К.Н. Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1.Часть 2: Учебное пособие / Под ред. Николаева А.Б. М.: МАДИ, 2011. 103 с.

87. Боев В. Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: Монография. СПб.: ВАС, 2011. 404 с.

88. Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Теория массового обслуживания: Учебное пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2004. 228 с.

89. Шрайбфедер Д. Эффективное управление запасами. (Пер. с англ.) М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 304 с.

90. Поляков К.Ю. Теория автоматического управления для «чайников».СПб., 2008. 80 с.

91. Калинин Н.М. Разработка организационной системы управления запасами в условиях многономенклатурного производства: Дис. …канд. техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, М.: 2009. 139 с.

92. Колычев В.Д. Методы автоматизации управления конструкторско-технологической подготовкой производства на примере мелкосерийного номенклатурного производства: Дис. …канд. техн. наук. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, М.:2016. 250 с.

93. Кульга К.С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления машиностроительным производством: Дис. …док. техн. наук. Уфимский государственный авиационно-технический университет, У.:2009. 427 с.

94. Разманова Т.И. Совершенствование технологической подготовки операций для оборудования сверлильной группы в многономенклатурном производстве с учетом производственной ситуации: Дис. …канд. техн. наук. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., С.: 2012. 155 с.

95. Ламм В.А. Формирование системы управления подготовкой производства на предприятиях легкой промышленности: Дис. …канд. эконом. наук. Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности, М.: 2005. 141 с.

96. Орлов А.И., Луценко Е.В., Лойко В.И. Организационно-экономическое, математическое и программное обеспечение контроллинга,

инноваций и менеджмента: Научная монография / Под общ. ред. С. Г. Фалько. Краснодар: КубГАУ, 2016. 600 с.

97. Орлов А.И. Теория принятия решений: Учебное пособие. - М.: Издательство «Март», 2004. 656 с.

98. Баев Г.О., Орлов А.И. Проблемы управления малыми производственными предприятиями на ранних стадиях жизненного цикла // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар, 2016. №118. С. 275-304.

99. Орлов А.И. Оптимальный план управления запасами нельзя найти на основе формулы квадратного корня // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар, 2015. №106. С. 270-300.

100. Омельченко И.Н., Бром А.Е., Сидельников И. Д. Критерий эффективности цепей поставок и построение целевой функции в задачах оптимизации материально-технического снабжения для сложной техники // Организатор производства. Воронеж, 2017. № 4. С. 83-91.

101. Бром А.Е., Белоносов К.Ю. Разработка подхода к внедрению системы бережливого производства на основе метода анализа иерархий // Вестник московского государственного областного университета. Серия: экономика. М., 2017. №2. С. 46-53.

102. Мельников О.Н., Ларионов В.Г., Ганькин Н.А. Основные этапы инновационного развития организации производства с позиций динамики использования принципов бережливого производства // Вопросы инновационной экономики. М., 2016. Т.6. №3. С. 239-258.

103. Разработка средств автоматизации планирования и диспетчеризации ресурсов производственного предприятия. А.В. Олейник [и др.]. // Известия курского государственного технического университета. Курск, 2010. №4 (33). С. 38а-48.

104. Хоботов Е.Н. Задачи и методы управления многономенклатурными запасами в условиях производства продукции // Известия российской академии наук. Теория и системы управления. Москва, 2011. №6. С. 165.

105. Хоботов Е.Н. Управление многономенклатурными запасами с учетом производства продукции // Вестник московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: машиностроение. Москва, 2011. №2 (83). С. 109-127.

106. Структурно-функциональное моделирование подготовки производства механо-сборочного цеха агрегатов ПГС / И.А. Гурина [и др.] // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2015). М., 2015. С. 259-263.

107. Белова Т.А., Данилин В.Н. Технология и организация производства продукции и услуг: Учебное пособие. М.:КНОРУС, 2013. 238 с.

108. Головкина М.Г. Исследование влияния технологических параметров процесса горячей обработки металлов давлением на распределение механических свойств по объему полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: Дис. …канд. тех. наук. ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». М., 2016. 184 с.

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу Кузиной Светланы Михайловны «Разработка инструментов планирования процессов подготовки производства на основе имитационного моделирования», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.22 – Организация производства (машиностроение)

Кузина Светлана Михайловна в 2013 году с отличием окончила государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского» по специальности «Экономика и управление на предприятии (по отраслям)». По результатам учебы она был рекомендован к поступлению в аспирантуру, в которую поступила 2013г. и обучалась в ней до 2016г. За время обучения проявила себя способной и дисциплинированной студенткой и аспиранткой, склонной к научной работе. В ходе обучения ею освоены и эффективно использованы современные средства математического и имитационного моделирования.

Диссертационная работа выполнялась в МАИ (НИУ) и посвящена разработке инструментов планирования процессов на стадии подготовки производства. Для этой стадии в ERP- и MES-системах, как правило, отсутствует необходимый объем статистической информации, который требуется специалистам для планирования производственных процессов. Поэтому аспирантка приняла верное решение, предложив вместо статистических данных использовать расчетные результаты, получаемые с помощью имитационного моделирования. Предложенный подход позволяет проектировать новые предприятия, прогнозировать значения производственных параметров на стадии подготовки производства, поэтому тематика диссертационной работы Кузиной С.М. является актуальной.

В ходе выполнения диссертационной работы аспирантка при большой доли самостоятельности решила сложную научно-техническую задачу, удачно сочетая экспериментальные и расчетные методы. Ею впервые предложено применение на стадии подготовки производства комбинированного имитационного моделирования для разработки систем принятия управленческих решений. Кузиной С.М. разработана методика, основанная на критериальном подходе, позволяющая с позиций бережливого производства оптимизировать параметры производственных процессов. С помощью имитационного моделирования и методики планирования эксперимента аспирантка успешно справилась с разработкой инструментов планирования процессов подготовки производства, проявив сочетание глубоких знаний в области организации производства, моделирования с практическими навыками применения информационных технологий. Работоспособность разработанных методик подтверждена проверкой в производственных условиях. Результаты диссертации внедрены в ООО «ПАКС» и используются в учебном процессе МАИ. Это

позволяет утверждать, что работа обладает научной новизной и практической значимостью.

В процессе работы над диссертацией Кузина С.М. проявила себя, как ответственный, вдумчивый специалист способный самостоятельно ставить и решать серьезные научно-технические задачи. За время работы над диссертацией ею опубликовано десять научных работ, из которых 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Кузина С.М. в 2012 г. прошла практику в авиакомпании Lufthansa, в отделе маркетинга и ценообразования. В 2015 г. приняла участие в тренинге «Управление запасами. Оптимизация структуры оборотных активов», в 2017г. окончила курс «Бережливое производство», в 2018г. окончила курс «Управление качеством». За время обучения в аспирантуре она получила практический опыт преподавательской работы, проведя несколько лабораторных и практических работ со студентами.

В настоящее время Кузина С.М. работает в АО «Гражданские самолёты Сухого». Первоначально занимала должность ведущего специалиста в отдел планирования, затем главного специалиста. С 2018 г. работает начальником отдела стоимостного анализа Департамента анализа, планирования и контроля закупок.

Заключение. Диссертант Кузина С.М. решила актуальную научно-техническую задачу по разработке инструментов планирования процессов подготовки производства на основе имитационного моделирования. Решенная задача имеет существенное значение для теории и практики организации производства. Диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Кузина Светлана Михайловна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.22 – Организация производства (машиностроение).

Научный руководитель,
профессор, д.т.н.
профессор кафедры ТиСАПРМП Галкин В.И.

Подпись д.т.н., профессора кафедры ТиСАПРМП Галкина В.И. удостоверяю.
Директор института №11 МАИ
к.т.н., профессор Беспалов А.В.

Галкин Виктор Иванович
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
Москва, 121552, ул. Оршанская, 3., тел. 499-1419495, e-mail: galkin@mai.ru

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
к.т.н., доцент
_____ Д.А. Козорез
«25» _____ 10 _____ 2018 г.

АКТ
об использовании результатов диссертационного исследования

Настоящий акт составлен в том, что разработанные Кузиной С.М. элементы системы поддержки принятия управленческих решений используются в учебном процессе «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» в курсах «Основы математического и имитационного моделирования» и «TSP-технологии».

Предложенная методика разработки системы принятия управленческих решений на базе имитационного моделирования и многофункциональных зависимостей успешно используется в практических занятиях студентов кафедры «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов».

Директор института материаловедения
и технологий материалов,
кандидат технических наук,
доцент А.В. Беспалов

ООО «ПАКС»
Россия, 115230, Москва, Варшавское шоссе, д. 47, корп. 4, комната 22-д
Тел.: +7 (495) 825 – 82 – 20; E-mail: PACS@itelma.su;
Филиал в г. Костроме: Россия, 156019, г. Кострома, ул. Петра Щербины, д. 23; E-mail:bks@pegas.kmtn.ru

УТВЕРЖДАЮ
Исполнительный директор ООО «ПАКС»
_____ А.О. Белориха
«15» 11 2021

ООО "ПАКС"

АКТ
о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Кузиной Светланы Михайловны представлены в виде:

1. Процедуры планирования производственного процесса на этапе подготовки производства, учитывающей загрузку и пропускную способность процессов, способствующей оптимальной производительности и обеспечению выполнения производственной программы изготовления продукции.
2. Инструментов прогнозирования и управления производством, обеспечивающей эффективное взаимодействие процессов производственной системы.
3. Инструмента опережающего выявления «узких мест» производственных процессов.

Результаты диссертационного исследования применены при проектировании производственных процессов изготовления комплектующих для авиационной техники и позволили выявить возможные отклонения запланированных производственных показателей, в соответствии с которыми определено рациональное количество сборочных постов.

Результатом применения предложенных методик является улучшение показателей производственной системы: сокращение длительности производственного цикла, в среднем на 20%; увеличение производительности сборочных постов, в среднем на 22%.