

## Содержание

Введение .....	2
1 Автоматизация производственного планирования .....	4
1.1 Развитие систем управления и планирования предприятием	4
1.2 Функции систем управления и планирование предприятием	5
1.3 Источники роста эффективности.....	6
1.4 Обзор существующих решений .....	7
1.5 Обзор методов планирования производственных процессов..	15
1.6 Обзор подходов к имитационному моделированию .....	17
2 Система планирования производства .....	20
2.1 Архитектура системы планирования .....	20
2.2 Организация системы имитационного моделирования .....	21
2.3 Частные оптимизационные модели .....	24
2.4 Выбор технологии реализации .....	25
3 Система имитационного моделирования.....	27
3.1 Архитектура подсистемы имитационного моделирования....	27
3.2 Входные и выходные данные .....	28
3.3 Этапы имитационного моделирования .....	29
3.4 Результаты работы имитационной модели.....	40
4 Балансировка линии сборочных производств.....	42
4.1 Назначение и условия применения алгоритмов ПРТ .....	42
4.2 Балансировка сборочной линии .....	45
4.3 Обзоры методов решения проблем балансировки линии.....	49
Заключение .....	55
Список использованных источников .....	56

## Введение

Современные системы автоматизации производств глубоко интегрируются в реальные процессы. При этом интегрируются на уровне SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition — диспетчерское управление и сбор данных) систем, на уровне сбора первичных данных, если система производства слабо автоматизирована, то интеграция происходит на уровне носимых устройств, систем распределения задач, а также систем исполнения процессов.

Разрабатываемая система цифрового двойника, глубоко интегрированная в производственные процессы, представляет из себя не что иное, как кибер-физическую систему, которая на основе обратной связи относительно физического объекта принимает решение, анализирует его поведение и формирует управляющие воздействия. Более того, разрабатываемый модуль ориентирован на то, чтобы быть встроенным в качестве главного узла принятия решений в системе автоматизированного производства.

Глобальная цель такого рода разработок направлено на то, чтобы исключить менеджмент среднего уровня, заменив его алгоритмами. Оставить только менеджеров высокого уровня, которые будут принимать общие решения относительно в какое направление развивать производство, руководствуясь данными цифровых двойников для того, чтобы принятие решения не сводилась к персональным оценкам, а в них была объективность

**Актуальность темы исследования.** Создание цифрового двойника производства зарекомендовала себя, как безопасный способ получения желаемого результата от реального объекта, не прибегая к тестированию на реальном производстве. Методы моделирования и, в частности имитационного, постоянно модернизируются, чтобы достичь максимальной точности по отношению к моделируемым объектам.

**Степень теоретической разработанности темы.** Так как проблема актуальна, по данной тематике существуют большое количество публикаций. Данные публикации в целом сосредоточены на разработке новых подходов к моделированию производств, но также есть и обзорные исследования.

**Целью работы** является разработка гибридной имитационной модели, а также методов оптимизации поиска оперативного плана.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) обзор систем имитационного моделирования, подходов к реализации;
- 2) разработка алгоритмов и методов имитационного моделирования;
- 3) алгоритмы оптимизации оперативного плана, построенного на основе имитационной модели;
- 4) алгоритмы оптимизации планирования конвейеризированных процессов.

## 1 Автоматизация производственного планирования

### 1.1 Развитие систем управления и планирования предприятием

На сегодняшний день, в условиях серьезной конкуренции очень важно следить за всеми новинками технологического прогресса и своевременно внедрять в структуру производства. Так организация предприятия напрямую влияет на эффективность производства. Основным направлением организацией предприятием в последнее время относят системы ИСУП, которые позволяют достичь следующих задач: выполнение планов производства, оптимизация производственного процесса, снижение издержек и повышение эффективности производства.

Данные системы начали появляться с развитием компьютерных технологий в начале 80-х годов. Одной из главных причин появления данных систем является нехватка административного, бухгалтерского и технического персонала, который обладал бы достаточной квалификацией для обработки информации предприятия, также стало понятно, что предприятия не могут позволять себе большие объемы материального запаса для производства продукции. Это привело к появлению систем планирования потребности в ресурсах. Первым шагом в этом направлении был MRP (Materials Resource Planning), который включал только материалы планирования для производства [1].

Основной концепция MRP заключается в минимизации затрат связанных с запасами, а также расчет сколько и в какие сроки необходимо произвести конечный продукт.

Недостатками данной системы является, то что при расчете потребностей в материалах не учитываются производственные мощности, их загрузки, трудозатраты и т.д.

Логическим продолжением MRP системы стала система MRP 2, которая в отличие от предшественника учитывала финансовую составляющую предприятия, а также охватывала более широкий охват ресурсов. Это позволило компаниям иметь более интегрированную бизнес-систему, которая выводила требования к материалам и мощ-

ности, связанные с желаемым планом операций, позволяла вводить подробные данные о деятельности, переводить все это в финансовый отчет и предложить план действий для решения тех вопросов, которые были не в соответствии с желаемым планом.

К началу 1990-х годов постоянные улучшения в технологии позволили расширить MRP II, включив в него все планирование ресурсов для всего предприятия. Такие области, как дизайн продукта, хранение информации, планирование мощностей, системы связи, управление персоналом, финансы и управление проектами, теперь могут быть включены в план. Отсюда и термин ERP (Enterprise Resource Planning). И ERP можно использовать не только в производственных компаниях, но и в любой компании, которая хочет повысить конкурентоспособность путем наиболее эффективного использования всех своих активов, включая информацию [2] [23,25].

Разрабатываемое программное обеспечение принадлежит к классу ERP-систем. Многие современные ERP-системы разработаны по модульному принципу, поэтому существует возможность выбирать и внедрять только те модули, которые необходимы клиенту.

В данной работе рассматривается одна из частей ERP систем, отвечающая за сопоставление конструкторских и технологических спецификаций, определяющих состав конечного продукта и ресурсов предприятия. На основании данного сопоставления построение плана производственного процесса, учитывающие ограничения предприятия, а также реализация частных математических моделей. Математические модели призваны оптимизировать производственный процесс в зависимости от специфики<sup>1</sup> предприятия.

## 1.2 Функции систем управления и планирование предприятием

Информационно - управляющая система предприятием (ИСУП) способна эффективно поддерживать производство в соответствии с

---

<sup>1</sup>Примером такой специфики является конвейеризованное предприятие.

расписанием посредством анализа данных и простой интеграции на предприятии. Хотя система не может самостоятельно управлять производственным оборудованием, она все же способна поддерживать постоянный поток материалов по всей цепочке поставок с помощью возможностей принятия решений. Различные функции системы ИСУП включают в себя следующее:

- высокая точность соблюдения сроков (и поставка заданных количеств);
- оптимальная загрузка производственных мощностей;
- короткие производственные циклы;
- минимальный уровень капиталовложения;
- поддержание необходимого уровня складских запасов и материалов на производстве;
- высокая гибкость;
- минимизация расходов.

В следующем разделе приведены источники роста эффективности, используемые ИСУП для достижения оптимального результата.

### 1.3 Источники роста эффективности

В промышленности есть огромные неиспользованные резервы роста производительности труда. Они могут быть подразделены на резервы снижения трудоемкости продукции и резервы рабочего времени. (см. рисунок 1.1)

Резервы снижения трудоемкости выявляются и реализуются в виде экономии рабочего времени, затрачиваемого непосредственно на выполнение рабочих операций.

Резервы фонда рабочего времени реализуются путем повышения эффективности использования рабочего процесса для данного коллектива в течение определенного планового периода [3].



Рисунок 1.1 — Резервы роста производительности труда

Исходя из информации представленной на рисунке 1.1, можно сделать вывод, что повышение эффективности производства может быть достигнуто, как и грамотной организацией резервов рабочего времени, так и путем пересмотра техники выполнения рабочих операций, но не все резервы повышения производительности можно решить в рамках ИУС. К таким резервам относится конструктивные особенности изделия, так как требуют изменения исходной конструкции продукта, что не является задачей ИУС.

#### 1.4 Обзор существующих решений

Сегодня, чтобы сохранять конкурентоспособность, предприятиям необходимо развивать и внедрять системы управления и планирования производственных процессов. Актуальным направлением, ориентированным на решение этой задачи, является разработка СПП, которая должна обеспечивать решение следующих задач: исполнения планов производства и целевых показателей, оптимизации операционной деятельности, снижения затрат и повышения эффективности производства.

Производственное планирование — это систематический, структурированный, направленный на достижение поставленной задачи про-

цесс планирования промышленного предприятия, состоящий из отдельных, иерархически распределенных этапов, осуществляемый с помощью специальных методов и инструментов, начиная с момента появления замысла и заканчивая запуском производства [4]. Производственное планирование может также включать в себя корректирующие мероприятия в процессе эксплуатации. Планирование промышленного предприятия может основываться на различных целях и задачах, охватывать самые разные проектные ситуации.

В процессе планирования используется ряд инструментов и программных компонент, которые поддерживают реализацию метода планирования [5]. Говоря в общем, это программные средства (прикладные программы), которые применяются пользователями на персональных компьютерах в различных фазах планирования жизненного цикла промышленного предприятия. К основным инструментам планирования относятся: APS/SCM; CAP; АСУП. Ниже даны подробные описания данных инструментариев [6].

APS/SCM (системы синхронного планирования, системы управления логической цепочкой) поддерживают расчеты, эксплуатацию и оптимизацию логистических цепочек. Особые свойства логистической цепочки получаются благодаря взаимодействию участников. Важная роль отводится структуре логистических цепочек, соответствующих рынку, а также координации и интеграции всех индивидуальных действий.

CAP (система автоматизированного регулирования) характеризует область компьютеризованного планирования работы. При этом используется система электронной обработки данных для создания рабочего графика, выбора эксплуатационных средств, создания указаний по изготовлению и монтажу, а также программирования для ЧПУ.

АСУП (САМ — автоматическая система управления производством) включает в себя компьютерное техническое управление и контроль над производственными линиями и эксплуатационными средствами при проведении производства, т.е. прямое управление обрабатывающими и перерабатывающими машинами, устройствами манипуля-



ции, транспортировки, перегрузки и хранения, а кратко — техническое управление всеми устройствами потоковых систем [7].

Наиболее распространенными программными продуктами, предназначенными для планирования производственных процессов являются «1С:Предприятие» и «SAP R/3»: первый является наиболее распространенным на российском рынке, второй, в свою очередь, широко используется за рубежом. На примере этих, зарекомендовавших себя с положительной стороны, продуктов проведем анализ системных компонент и сравним их место в архитектуре систем.

#### 1.4.1 «1С: Предприятие 8.0»

Комплекс программ «1С: Предприятие 8.0» состоит из технологической платформы и прикладных компонентов, которые создаются на основе платформы и предназначены для автоматизации деятельности предприятий. Технологическая платформа не является готовым программным продуктом, предназначенным для внедрения на предприятие, вместо нее обычно применяют одну или несколько компонентов, разработанных на этой платформе. Данное решение делает возможным автоматизировать различные виды деятельности, применяя единую основную технологическую платформу. Система «1С: Предприятие 8.0» использует следующие основные компоненты:

- «Управление торговлей»;
- «Управление персоналом»;
- «Управление производственным предприятием»;
- «Управление складом»;
- «Управленческий учет и расчет себестоимости».

Наиболее интересными для рассмотрения являются компоненты «Управление персоналом» и «Управление производственным предприятием», поскольку их реализация является ключевой с точки зрения планирования деятельности предприятия и не имеет сегодня строгой

математической формализации, чем отличаются компоненты, связанные с экономическим анализом деятельности.

Компонент «1С: Предприятие 8.0. Управление персоналом» позволяет эффективно управлять кадровыми процессами в следующих областях: планирование потребностей в персонале; обеспечение организации новыми кадрами; эффективное планирование занятости персонала; кадровый учет и анализ персонала; управление персоналом.

Компонент «Управление производственным предприятием» предназначена для автоматизации процессов управления и учета производственном предприятии. Это позволяет создать единую информационную систему для управления различными сторонами деятельности предприятия.

В платформе «1С: Предприятие 8.0» заложен ряд подходов, которые формируют основную концепцию разработки типовых компонентов. Эти подходы предназначены для максимального сближения технологических возможностей с бизнес-процессами разработки и интеграции прикладных решений. Важными моментами, которые следует отметить, являются: изоляция разработчика от технологических деталей, алгоритмическое программирование конкретной бизнес-логики приложения, использование собственной модели базы данных и гибкость прикладных решений без их доработки.

Механизм обмена данными, используемый в технологической платформе «1С: Предприятие 8.0», позволяет создавать территориально распределенные информационные системы на основе баз данных «1С: Предприятия 8.0», и использовать другие информационных систем, не относящиеся к «1С: Предприятию 8.0». Например, можно организовать работу главного офиса, филиалов и складов предприятия в одной базе данных, или обеспечить взаимодействие базы данных «1С: Предприятия 8.0» с существующей базой данных «Oracle».

Технологическая платформа «1С: Предприятие 8.0» предоставляет средства разработки, с помощью которых создаются новые или модифицируют существующие прикладные решения. Этот инструмент разработки называется «конфигуратор». Благодаря тому, что он постав-

ляется со стандартным пакетом «1С: Предприятия 8.0», то пользователь может свободно разработать или модифицировать прикладное решение (адаптировать его под себя), возможно, с привлечением сторонних специалистов.

Среди преимуществ данной системы можно выделить:

- открытость системы;
- регулярные программные обновления;
- широкие функциональные возможности системы.

Однако необходимо отметить, что подходы «1С: Предприятия» ориентированы на решение проблем автоматизации бухгалтерского и организационного управления предприятием. Использование проблемно-ориентированных объектов позволяет разработчику решать задачи по складского, бухгалтерского, управленческого учета, расчетам заработной платы, анализа данных и управлению бизнес-процессами. Однако области экономического и бухгалтерское учета характеризуются высокой степенью математического формализма и их реализация происходит с относительно малыми трудозатратами, тогда как компоненты планирования и производственного расписания сегодня являются актуальными направлением для исследований и прикладной разработки.

#### 1.4.2 «SAP R/3»

Система «SAP R/3» предоставляет собой набор разноплановых инструментов, направленных на повышение эффективности производственного процесса, увеличение экономической стабильности, автоматизацию процессов планирования. Она дает возможность интегрировать инновационные подходы централизованного планирования и управления, и повысить качество управления на разных организационных уровнях предприятий.

«SAP R/3» является многомодульной системой, где каждый отдельный модуль предназначен, для решения специализированной задачи процесса предприятия, взаимодействие между ними происходит

в режиме реального времени. Наибольший интерес для рассмотрения снова представляют компоненты, не имеющие прямого отношения к бухгалтерской и экономической деятельности предприятия - модуль PP; модуль HR; модуль BC.

Модуль PP (планирование производства) дает возможность организовать управление и планирование производством предприятием. Модуль PP реализует следующие функции: формирование спецификаций, создание технологических карт, управление производственными площадками, планирование сбыта, планирование потребности в материалах, управление производственными заказами, планирование затрат на изготовление изделия, учет затрат производственных процессов, планирование производственной деятельностью, управление серийным производством, систему, планирование автоматизированного производства.

Модуль HR (управление персоналом) решает задачи планирования и управления работой персонала. Ключевые элементы: администрирование персонала, расчет данных для вычисления заработной платы, сбор и анализ данных о рабочем времени, учет командировочных расходов, создание информационной модели внутренней структуры компании.

Модуль BC (базовый модуль) предназначен для интеграции в систему «SAP R/3» всех отдельных прикладных модулей и обеспечивает независимость от аппаратной платформы. Модуль BC позволяет организовать работу с многоуровневой распределенной архитектуре клиент-сервер. Система «SAP R/3» работает на серверах UNIX, AS/400, Windows NT, S/390 и с различными СУБД (Informix, Oracle, Microsoft SQL Server, DB2). Пользователи могут работать в среде Windows, OSF/Motif, OS/2 или Macintosh [8].

На данный момент система «SAP R/3» является наиболее распространенной системой управления предприятием. Благодаря тому, что она является модульной системой, ее можно настроить в соответствии с конкретными потребностями отдельного предприятия. Степень технического уровня системы определяется возможностью ее перена-

стройки без необходимости переписывать программный код. Эта опция «SAP R/3» также позволяет занимать ведущее место в мире в системе управления.

С помощью инструментов управления, включенных в систему «SAP R/3», можно реализовывать задачи мониторинга и анализа, без дополнительного программирования, следующие способы:

- мониторинг БД;
- мониторинг операционной системы сервера;
- мониторинг коммуникаций;
- мониторинг и управление сервером приложений:
  - формирование и запуск новой конфигурация ядра R/3;
  - снятие и редактирование текущей конфигурации ядра R/3;
  - формирование временного графика в зависимости от нагрузки (например, в ночное время можно увеличивать количество процессов, отвечающих за фоновые задания);
- управление системой архивирования;
- управление текущими пользователями, процессами.

Многоуровневая клиент-серверная архитектура позволяет разделять задачи, ориентированные на пользователя задачи управления данными. В версии 3.0 системы «SAP R/3» SAP AG были расширены возможности решения для взаимодействия с другими приложениями и расширены возможности распределения операций «SAP R/3» в масштабируемой компьютерной структуре. Технология внедрения «SAP R/3» основана на многоуровневой архитектуре с использованием программного обеспечения среднего уровня. Между тем, промежуточное ПО отделяет пользовательские приложения от аппаратного и программного обеспечения, с другой стороны, решает проблему взаимодействия программных приложений и аппаратным обеспечением. В «SAP R/3» SAP Basis функционирует как промежуточное программное обеспечение [8].

Основные данные — это информация, которая хранится в базе данных, достаточно долгий промежуток времени. К ним относятся такие данные как: информация о кредиторов, поставщиках, материалах и счета. Основные данные создаются централизованно и доступны для всех приложений. Например, они включают данные клиента, которые используются в заявках, поставках, выставления счетов и платежей. Запись основных данных клиента может быть присвоена следующим организационным единицам: балансовая единица, сбытовая организация, канал сбыта, сектор.

Основная запись материала является центральным объектом данных системы «SAP R/3». Она включает в себя: сырье; оборудование; расходные материалы; полуфабрикаты; продукты; вспомогательное производственное оборудование и инструменты. Она является главным источником данных предприятия и используется всеми компонентами логистической системы SAP. Благодаря объединению всех данных материалов в единый объект базы данных устраняются проблемы избыточности данных. Сохранённые данные могут использоваться во всех областях, такими как закупки, контроль запасов, планирование потребностей в материалах, проверка счетов.

Данные, хранящиеся в основной записи материала необходимы логистическому модулю системы для решения следующих задач: обработки запасов на поставку; обновления движения материалов и инвентаризационной обработки; проводки счетов; обработки клиентских заказов; планирования потребностей и календарного планирования. Структурная логика поставщика и клиента также применяется к основной записи материала. При оформлении заказа для клиентов необходимо учитывать: согласование о перевозки, условия доставки, оплаты и т.д. Данные, необходимые для таких операций, дублируются из основной записи делового партнера, чтобы исключить необходимость повторного ввода информации о каждой транзакции. В основной записи материала могут одновременно храниться данные, обработанные во время ввода заказа, например, цену за единицу цены товара, запасы на другом складе и т.д. Этот принцип полезен для обработки данных в

каждой основной записи, связанной с выполнением операции.

Для каждой транзакции необходимо присваивать соответствующую организационную единицу. Присвоение структуре предприятия в документе генерируется в дополнение к данным, доступным по клиенту и материалу. Поэтому документ, созданный при помощи транзакции, содержит все основные данные из организационных единиц [9].

Среди достоинств данной системы можно выделить:

- прозрачность деятельности предприятия;
- повышение оборотов товарно-материальных запасов;
- сокращение персонала управления;
- единые стандарты управления.

К недостаткам относятся:

- требуется высокий уровень подготовки персонала;
- сложность интеграции;
- большие финансовые вложения.

## 1.5 Обзор методов планирования производственных процессов.

В данном разделе приведен перечень методов моделирования объектов и процессов.

### Математический

**Описание.** Составление математического эквивалента процесса или объекта, отражающий его основные свойства.

**Область применения.** Любые процессы и объекты, поддающиеся математическому описанию.

**Достоинства метода.** Широкая область применения.

**Недостатки метода.** Достаточно сложно построить модель, адекватно учитывающую все факторы.

## Статический

**Описание.** Модель основывается на выявленных статических закономерностях.

**Область применения.** Процессы, по которым можно собрать массив статических данных.

**Достоинства метода.** При наличии качественных данных метод точен и, при использовании специализированного ПО, прост в применении.

**Недостатки метода.** Большие требования к статическим данным.

## Экономико-математический

**Описание.** Раздел включает в себя методы для решения экономических задач.

**Область применения.** Экономические процессы.

**Достоинства метода.** Метод способен моделировать экономические процессы.

## Имитационный

**Описание.** Изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, с ней проводятся эксперименты с целью получения информации.

**Область применения.** Метод используется когда дорого или невозможно использовать реальную модель и/или аналитическую модель.

**Достоинства метода.** Создается максимально приближенная модель, можно управлять временем системы и другими её характеристиками.



**Недостатки метода.** Сложность описания всех условий и требования вычислительной мощности.

#### Физический

**Описание.** Экспериментальное моделирование, основанное на физическом подобии уменьшенной в размерах модели.

**Область применения.** Применяется при невозможности применения аналитического метода или воспроизведения в реальном размере.

**Достоинства метода.** Область применения, недоступная другим методам.

**Недостатки метода.** Метод может дать надёжные результаты лишь при соблюдении физического подобия модели.

Для задач моделирования сложных, сборочных производств больше всего подходит метод имитационного моделирования, так как экспериментировать с реальным объектом экономически нецелесообразно, а также невозможно учесть все зависимости, что усложняет процесс аналитического моделирования.

### 1.6 Обзор подходов к имитационному моделированию

В прошлом производственные инструменты моделирования классифицировались как языки или симуляторы. [10] Языки были очень гибкими инструментами, но довольно сложными в использовании менеджерами и слишком трудоемкими. Симуляторы были более удобными для пользователя, но они шли с довольно жесткими шаблонами, которые недостаточно адаптировались к быстро меняющимся технологиям производства. В настоящее время доступно программное обеспечение, которое сочетает в себе гибкость и удобство для обоих, но все же некоторые авторы сообщают, что использование этого моделирования для проектирования и оптимизации производственных процессов является относительно низким. [11] [12]

Одним из наиболее часто используемых методов разработчиками производственных систем является моделирование дискретных событий. [13] Этот тип моделирования позволяет оценить производительность системы путем статистического и вероятностного воспроизведения взаимодействий всех ее компонентов в течение определенного периода времени. В некоторых случаях моделирование производственных систем требует непрерывного подхода к моделированию. [14] Это те случаи, когда состояния системы постоянно меняются, как, например, при движении жидкостей на нефтеперерабатывающих или химических заводах. Поскольку непрерывное моделирование не может быть смоделировано цифровыми компьютерами, оно выполняется небольшими дискретными шагами. Это полезная функция, поскольку во многих случаях необходимо комбинировать как непрерывное, так и дискретное моделирование. Это называется гибридным моделированием [15], которое необходимо во многих отраслях, например в пищевой промышленности. [11]

На данный момент существует большое количество подходов к имитационному моделированию. Ниже приведена таблица 1.1 общих применений моделирования в производстве [16]:

Таблица 1.1 — Задачи и методы моделирования производства

Задача	Подход	Описание области задачи
Балансировка сборочной линии	Дискретно-событийное моделирование(ДСМ)	Проектирование и балансировка сборочной линии
Планирование мощности	Системная динамика(СД), Метод Монте-Карло(МК), ДСМ	Неопределенность из-за изменения уровней мощности, увеличения текущих ресурсов, улучшения текущих операций для увеличения мощности
Управление запасами	ДСМ, МК	Стоимость имущества, уровни запасов, пополнение, определение размеров партии
Just-in-time	ДСМ	Проектирование систем Канбан
Планирование	ДСМ	Пропускная способность, надежность доставки, последовательность операций, планирование производства, минимизация времени простоя, спрос, готовность заказа
Система управления цепями поставок	ДСМ, СД, Агентное моделирование (АГ), Сети Петри (СП),	Нестабильность в цепочке поставок, системах инвентаризации / распределения
Распределение ресурсов	ДСМ	Выделение оборудования для улучшения технологических процессов, сырья для заводов, выбора ресурсов
Планирование производства и управление запасами	ДСМ, АГ,	Страховой запас, размер партии, узкие места, правила прогнозирования и планирования
Прогнозирование	Гибридные технологии	Сравнение разных моделей прогнозирования

Как видно из таблицы 1.1 по результатам исследования [16] было выявлено, что наиболее используемый метод моделирования производственного планирования является дискретно-событийная модель.

## 2 Система планирования производства

### 2.1 Архитектура системы планирования



Рисунок 2.1 — Архитектура ПО

На рисунке 2.1 представлена архитектуры программного обеспечения. Данная архитектура содержит следующие элементы:

- пользовательский интерфейс для взаимодействия с системой, который также позволяет получать информацию о работе системы в виде диаграмм, или графиков;
- система управления планирования взаимодействует со всеми элементами системы и является главным распорядителем задач;
- база данных хранит всю информацию о производстве и результаты планирования;

- основная задача имитационной модели заключается в построении расписания, в котором указаны все операции, время их начала и окончания, время начала и окончания участия производственных ресурсов в выполнении операций;
- календарь обрабатывает абсолютные значения, используемые при планировании, и привязывает их к конкретным датам;
- частные оптимизационные модели работают с уже сформировавшимся планом, который получен в результате имитационного моделирования. К данному плану применяются алгоритмы оптимизации, зависящие от конкретных целей. Таким целями могут быть: задачи упорядочивания, задачи согласования, задачи распределения, задачи с суммарными критериями оптимизации, задачи с минимаксимальными критериями оптимизации;
- модель оценки фондов работает с производственными мощностями и дают поверхностную оценку осуществимости заданной цеховой последовательности выпуска.

## 2.2 Организация системы имитационного моделирования

### 2.2.1 Формализация предметной области

Для того, чтобы разрабатывать алгоритмы планирования в первую очередь необходимо формализовать предметную область. В данном случае формализуется сборочный цех со значимыми внутренними особенностями.

Как правило на любом предприятии имеется специальный документ – технологическая карта, детально описывающая весь перечень операций по достижению которых воспроизводится единица продукции. Технологическая карта хранит информацию о зависимостях между операциями, привязках ресурсов к операциям, трудоёмкостях операций, периодичность операций, результат каждой операции.

Далее важно учесть ресурсы предприятия. В рамках сборочного производства такими ресурсами могут быть: персонал, оборудование, организация конвейерной производственной линии.

Последним пунктом для построения модели производства является производственный план. То есть перечень продукции в составе заказа и срок реализации данного заказа. На рисунке 2.2 представлен пример взаимодействия перечисленных выше моделей.



Рисунок 2.2 — Модель производства

### 2.2.2 Математическое моделирование производственных процессов

Для формализации процесса планирования в работе используются системы неравенств. Пример системы неравенств представлена на рисунке 2.3. Система неравенств состоит из двух частей: статическую и динамическую. Статическая по своей сути копирует последовательность

операций, описываемых в технологической карте. Динамическая накладывает дополнительные ограничения на систему неравенств, которая складывается из ресурсных зависимостей. Ресурсными зависимостями являются связи между операциями и фондом предприятия[3].

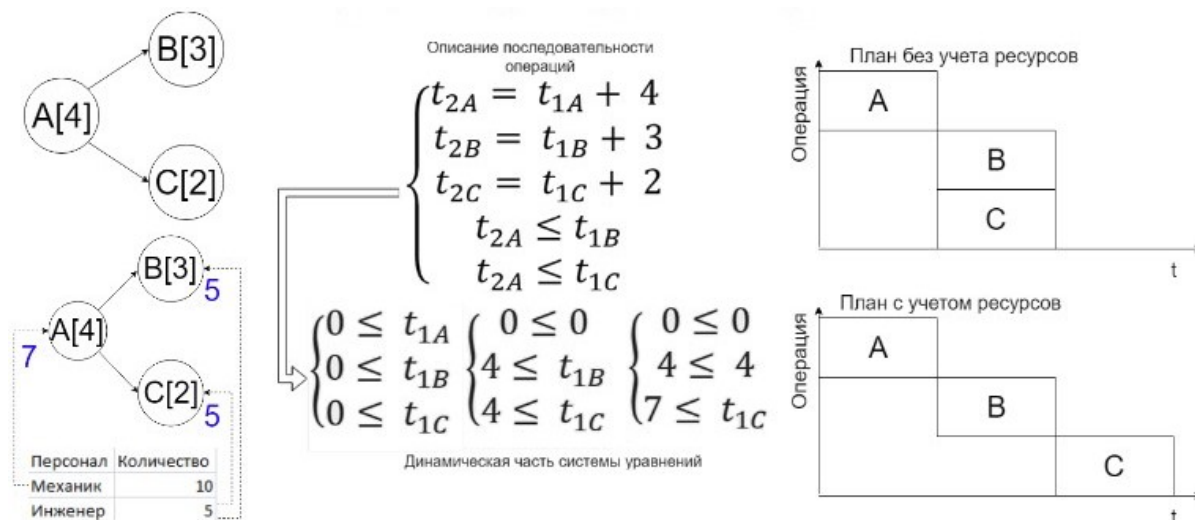


Рисунок 2.3 — Система неравенств

Таким образом планирование делится на шаги, каждый раз при этом формируются новые ограничения вводимые ресурсами.

По результатам анализа работы [16], была составлена градация подходов к имитационному планированию представленная на рисунке 2.4.

Решение задачи планирования аналитическим подходом возможно, при этом основная проблема заключается в сложности описания всех зависимостей, что делает данный подход сложным в исполнении.

Второй крайностью решения задач имитационного моделирования является объектно-ориентированный подход. Одним из примеров реализации данной идеи является Siemens Plant Simulation.

Система, разрабатываемая в рамках НИР, является гибридной моделью. Данный подход призван перенять лучшее у двух крайностей. Там, где задачу можно решить аналитически использоваться данный подход, где задача приобретает большое количество зависимостей задача решается посредством алгоритмов. На рисунке 2.3 приведен

пример, того, как выглядит математическая модель производственных процессов, где аналитически выведена статическая часть системы неравенств и посредством алгоритмов генерируется динамическая система неравенств.

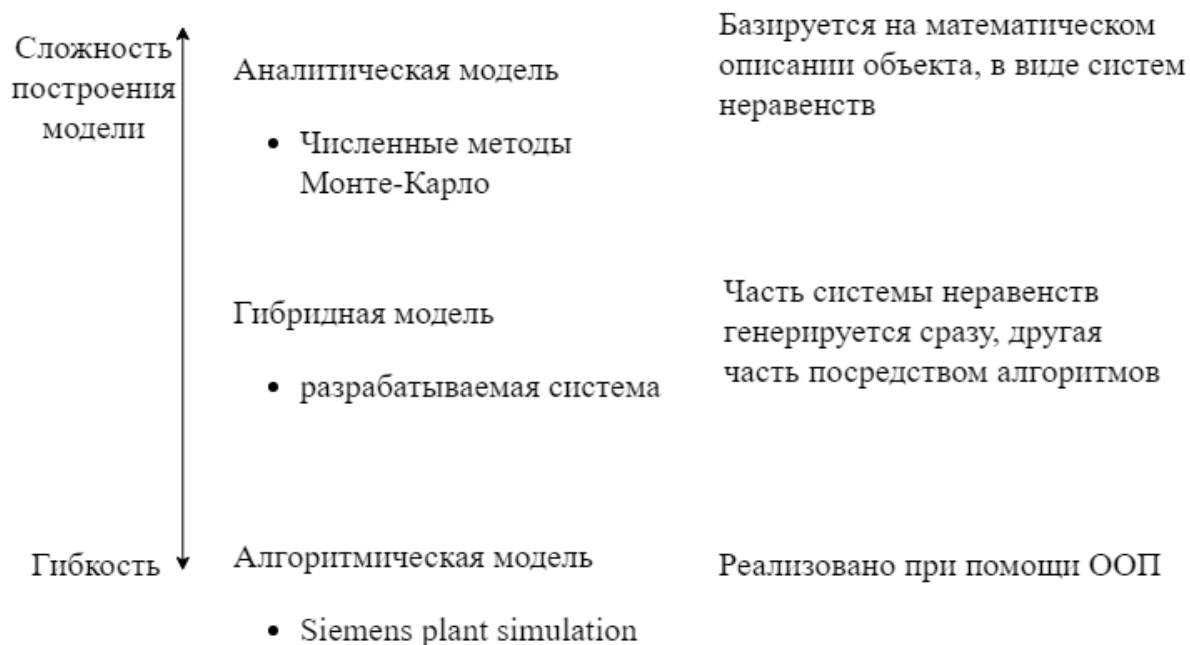


Рисунок 2.4 — Градация подходов к имитационному моделированию

### 2.3 Частные оптимизационные модели

В данном разделе приведено описание частных оптимизационных моделей. Необходимость применения данных моделей возникла, с появлением задач оптимизации на специфичных производствах. Данная специфика характеризуется уникальным для каждого предприятия структуры, где стандартные методы оптимизации будут не эффективны, либо не будут давать результата.

На текущий момент представлена одна частная оптимизационная модель, задача которой оптимизация сборочных производств. Сборочные производства характеризуются сборочными линиями, где на разных этапах установлены рабочие станции. Рабочий процесс на таком производстве выглядит следующим образом, заготовка переме-



щается от станции к станции, при этом на каждой станции ведется своя независимая работа.

Целью оптимизации является равномерная загрузка всех станций на линии, чтобы избежать простоя производства. Для достижения данной цели были созданы модели необходимые для описания сборочного производства. Такими моделями являются ресурс рабочих, а также модель конвейера. Также разработаны методы оптимизации описанные в главе 4.

## 2.4 Выбор технологии реализации

Планированию как вычислительному процессу необходимо большое количество вычислительных ресурсов и их грамотное использование. Это связано с тем фактом, что при планировании перебираются множество возможных вариантов и выбирается только один - лучший (в данном случае имеются в виду алгоритмы оптимального поиска). Когда речь идет о возможности распараллеливания вычислительных ресурсов, требуется технология предоставляющая данную возможность. На данный момент практически все языки программирования имеют функцию распараллеливания, но языки, где это реализовано удобно и без изъянов, немного. Для построения ядра моделирования был выбран многопоточный, компилируемый язык программирования - `golang`.

Язык программирования `golang` предоставляет следующие возможности:

- 1) Скорость обучения. Часто бывает, что разработчики имеют разный уровень подготовки, поэтому необходим язык который позволяет уменьшить затраты на изучения синтаксиса и как можно быстрее сосредоточиться на разработке.

- 2) Производительность. `Golang` компилируемый язык.

- 3) Эффективность и возможность многопоточности. В `Go` есть горуты. Горутами называют функцию, которая выполняется с другими

гортинами в едином адресном пространстве. Основными преимуществами горутин являются: низкое потребление памяти(4,5 кб), минимум накладных ресурсов на организацию, а также простота использования.

#### 4) Встроенный сборщик мусора.

Язык программирования `golang` выбрал преимущества низкоуровневых языков(сразу компилируется в двоичный код), а также высокоуровневых(имеет сборщик мусора для распределения и удаление объектов). Так как главный акцент, при выборе языка программирования, делался на производительность и поддержку многопоточности, `golang` является лучшим вариантом для создания ядра моделирования производственного плана.

Данный акцент на скорости и многопоточности был сделан не случайно. Как будет видно далее, в вопросах поиска оптимальных решений данные особенности `golang` будут очень востребованы.

### 3 Система имитационного моделирования.

#### 3.1 Архитектура подсистемы имитационного моделирования

В данном разделе будут рассмотрено внутреннее устройство элемента архитектуры ПО (2.1), отвечающего за имитационное моделирование. Работа имитационной модели состоит из следующих этапов:

1) Создание шаблона продуктов. Шаблон представляет из себя структуру данных, являющийся отображением технологической карты одной единицы продукции.

2) Создание заказа. Заказ представляет из себя список структур данных, включающим в себя шаблон продукта и необходимое количество.

3) Следующим этапом является развертывание единого плана на основе заказа. Производственный план описывает совокупность операций<sup>1</sup> и состояние ресурсов.

4) Пошаговая реализация плана с учетом ресурсных ограничений, где каждый раз при расчете операции обновляется информации о состоянии ресурсов.

Работа имитационного моделирования представлена на рисунке 3.1

---

<sup>1</sup>Так как технологическая карта описывается набором операций, а заказ описывается перечнем технологических карт и их количеством, появилась возможность описать план совокупностью операций.

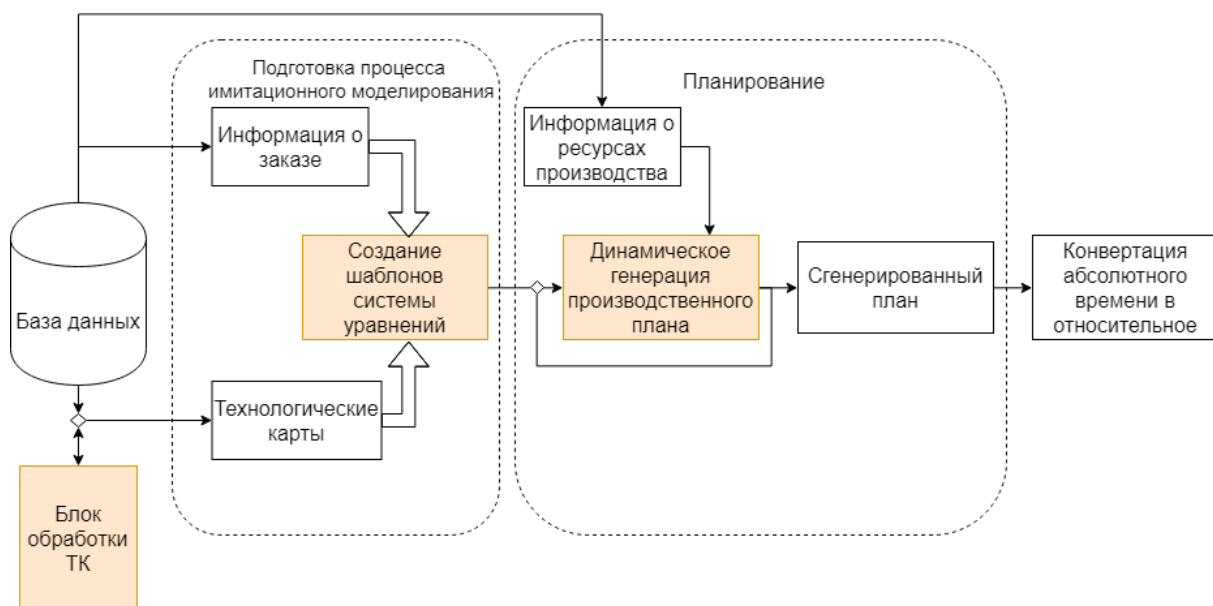


Рисунок 3.1 — Визуализация работы имитационного моделирования

## 3.2 Входные и выходные данные

### 3.2.1 Входные данные

В данном разделе приведены входные данные для имитационной модели. Благодаря модульности данного элемента ПО, в перечень включены данные не учтенные в текущей реализации, добавление данных планируется в будущем. Эти данные *помечены курсивом*.

— ЦПВ - цеховая последовательность выпуска (выпуск продукции осуществляется в порядке, в котором они записаны в ЦПВ):

- а) наименование продукции;
- б) количество единиц продукции;
- в) технологическая карта.

— Технологические карты, подробнее смотри (4.1.2).

— Производственные ресурсы;

— *Трафик доступности ресурсов;*

— *Структура цеха;*

- *Минимальное время участия ресурса в операции;*
- *Штрафы за переключение ресурса с одной операции на другую.*

### 3.2.2 Выходные данные

- Расчетные данные:
  - а) перечень всех операций для всех единиц продукции ЦПВ;
  - б) время начала всех операций;
  - в) время окончания всех операций;
  - г) *производственные ресурсы, привлекаемые к выполнению операции;*
  - д) *время начала и конца участия ресурса в операции;*
  - е) *загрузка производственных ресурсов.*
- Визуализация данных пользователю:
  - а) расписания для производственных ресурсов;
  - б) диаграммы Ганта выпуска разных видов продукции;
  - в) визуализация загрузки производственных ресурсов.

### 3.3 Этапы имитационного моделирования

В данном разделе подробно описаны все этапы имитационного моделирования. На изображении (3.2) приведена диаграмма потоков данных.



Рисунок 3.2 — Data flow imcore

### 3.3.1 Предобработка технологических карт

#### Входные данные

Входными данными для данного элемента ПО является технологическая карта с конфигурациями ресурсов<sup>1</sup>.

#### Выходные данные

Выходными данными являются технологическая карта с зафиксированными значениями.

<sup>1</sup>Примером конфигурации ресурса может являться вычисление длительности операции на основе количества персонала, привязанного к операции.

## Процесс предобработки

Одним из первых этапов работы алгоритма имитационного моделирования является подготовка входных данных, полученных из базы данных.

На текущий момент реализована небольшая часть функционала отвечающую за предварительную обработку. Одной из таких функций является расчет длительности операций. Так как длительность операций является переменной величиной, зависимой от трудоемкости и количества людей выполняющих операцию, существует четыре настройки ресурса:

1) минимальная, при этом на операцию назначается минимальное количество людей, отсюда и длительность операции становится максимальной;

2) максимальная, при этом на операцию назначается максимальное количество людей, отсюда и длительность операции становится минимальной;

3) средняя при этом на операцию назначается среднее количество людей, отсюда и длительность операции становится средней;

4) случайная, при этом количество персонала на операцию выбирается случайным образом.

Также одной из возможностей предварительной настройки является алгоритм выбора операции<sup>1</sup>. На данный момент существует две конфигурации:

1) стандартная, при которой выбор осуществляется строго по порядку расположения в структурах данных

2) случайная, при этом случайным образом выбирается одна из возможных операций, которые доступны в данный момент

---

<sup>1</sup>В тех случаях, когда на этапе планирования есть независимые операции

Возможность менять входные данные являются важным этапом обработки входных данных полученных из базы данных, позволяя при этом подготовить данные для дальнейшей обработки, а также гибко менять параметризуемые величины, чем и достигается большая вариативность необходимая для поиска оптимального значения.

### 3.3.2 Создание шаблона продукта

#### Входные данные

Входными данными для данного элемента имитационной модели является технологическая карта с фиксированными значения (прошедшая обработку после базы данных).

#### Выходные данные

Выходными данными являются структура данных, включающая в себя набор событий и привязок ресурсов к каждому событию.

#### Описание реализации

Для начала необходимо определить для чего нужны события. Как говорилось ранее любая технологическая карта состоит из перечня операций. В процессе работы было принято решение разделить операцию на события. Операция определяется двумя событиями: началом и концом. Такое разделение не случайно и вызвано необходимостью раздельной работы с началом и концом операций. Примером, когда это необходимо, является занятие и освобождение ресурса предприятия. При начальном событии алгоритм учитывает, то что данная операция потребляет ресурсы, при этом основным индикатором является начальное состояние. При конченом событии, когда ресурсы на операции использованы, происходит процесс высвобождения ресурсов, состояние ресурсов обновляется.



Основной задачей процесса создания шаблона продукта является подготовка необходимых структур данных для дальнейшей работы имитационной модели. На диаграмме потоков данных (3.2) данный процесс именуется, как - `mkProductTemplate()`. В результате работы, `mkProductTemplate()` создает шаблон продукта необходимый для структуры описывающий заказ.

### 3.3.3 Создание заказа

#### Входные данные

Входными данными является перечень продуктов и количество каждого продукта из этого перечня.

#### Выходные данные

Выходными данными является список структур описываемых в разделе 3.3.2, то есть шаблон и количество данного продукта.

#### Описание реализации

На диаграмме потоков данных 3.2 процесс создания заказа называется - `generateProductionTasks()`. Основной задачей функции заказа является генерация шаблонов продуктов в зависимости от их количества, при этом каждый однотипный шаблон имеет уникальный идентификатор (серийный номер).

### 3.3.4 Планирование

#### Входные данные

Входными данными для функции планирования является производственное задание на одну единицу продукции, полученное из списка сформировавшемся на этапе создания заказа (3.3.3).

## Выходные данные

Выходными данными является производственный план, состоящий из событий, операций и состояния ресурсов.

## Описание реализации

Основной задачей этапа планирования заключается в составлении плана, согласно которому выполняется привязка каждой операции для каждой единицы продукции к временным интервалам, конкретному работнику и конкретным производственным средствам. Результирующая блок-схема подсистемы имитационного моделирования изображена на рисунке 3.3.

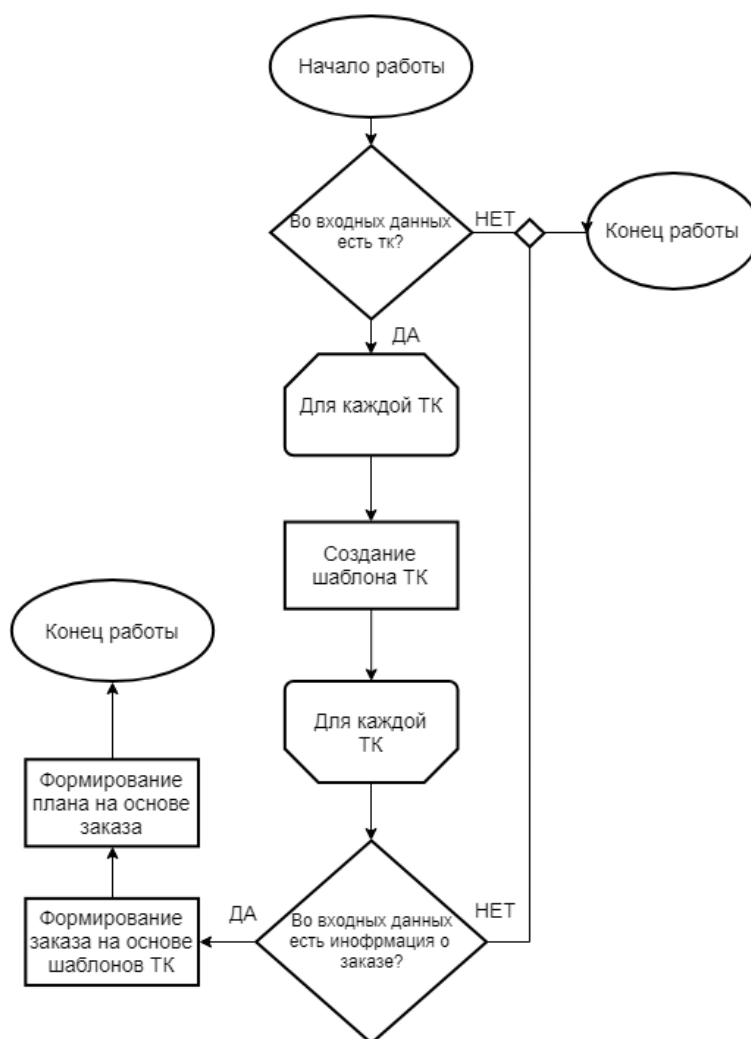


Рисунок 3.3 — Схема работы ядра имитационного моделирования

### 3.3.5 Алгоритм модели ресурсов

В процессе создания оперативного плана, для получения корректной оценки времени выполнения операции или набора операций СПП необходимо ввести систему ограничений, которая будет отражать как ресурс, участвующий в операции может влиять на её время выполнения. Это привело к созданию модели ресурсов накладывающей ограничения на выбор операции для расчета ядром имитационного моделирования. Под ресурсом подразумевается любое устройство, деталь, инструмент или средство, за исключением сырьевого материала и промежуточного продукта, находящиеся в распоряжении предприятия для производства товаров и услуг. В соответствии с данным определением к ресурсам относятся в том числе и человеческие ресурсы, которые в данной системе не рассматриваются с точки зрения поведения или других аспектов человеческой жизни, а лишь с точки зрения возможности выполнить конкретную задачу. Также необходимо обозначить, что в данном разделе под моделью ресурса будет пониматься упрощенная модель реального ресурса, отражающая его основные (в рамках выполняемых операций) характеристики.

Каждая модель ресурса представляет из себя структуру данных, которая должна реализовывать три метода:

- метод привязки операции к модели ресурса;
- метод, осуществляющий проверку возможности выполнения данной операции моделью ресурса;
- метод, осуществляющий логику работы и в котором происходит изменение состояния данной модели.

Под привязкой операции к модели подразумевается добавление операции в очередь на выполнение и, если это первая привязанная для данного продукта операция, то добавление продукта в очередь на распределение. Привязка осуществляется в начале работы системы, что позволяет ресурсам манипулировать ядром имитационного моделирования разрешая или запрещая выбирать привязанные к ним операции для

расчета, что может повлечь за собой изменение последовательности выполнения операций и, соответственно, расчетного времени выполнения карты технологического процесса.

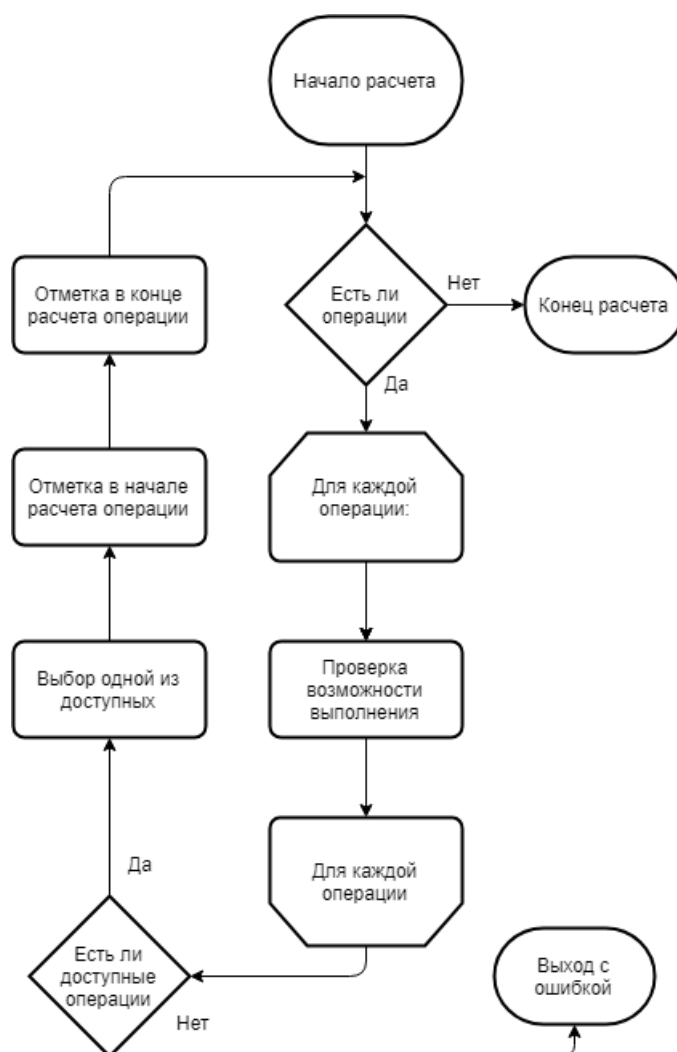


Рисунок 3.4 — Схема работы ядра моделирования с ресурсами в процессе расчета оперативного плана

Проверка производится во время работы системы и именно здесь происходит отбор операций в соответствии с внутренним состоянием модели.

Логика осуществляется при выборке операции ядром и для каждой вызывается два раза: чтобы отметить состояние модели в начале и в конце расчета операции (см. 3.4).

### 3.3.6 Оптимизация на уровне имитационного моделирования

Как упоминалось ранее, в разделе посвященном предобработке технологической карты 3.3.1, исходная ТК предполагает вариативность конфигурации, отсюда следует, что потенциально имитационная модель может сгенерировать большое количество разных оперативных планов.

На рисунке 3.5 приведена зависимость сгенерированного оперативного плана от выбранного критерия оптимальности.

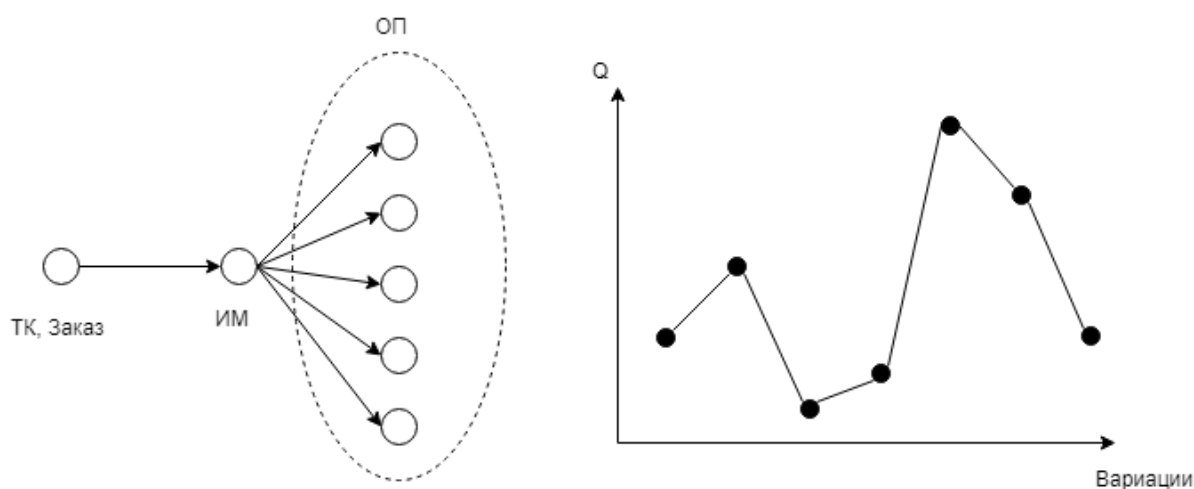


Рисунок 3.5 — Процесс формирования оперативных планов и оценка их качества

В следующем разделе приведены методы, которые позволяют подсистеме оптимизации (рис.3.6) на уровне имитационной модели, найти оптимальную последовательность операций. Критерием оптимальности в данном случае является минимальное время работы линии.

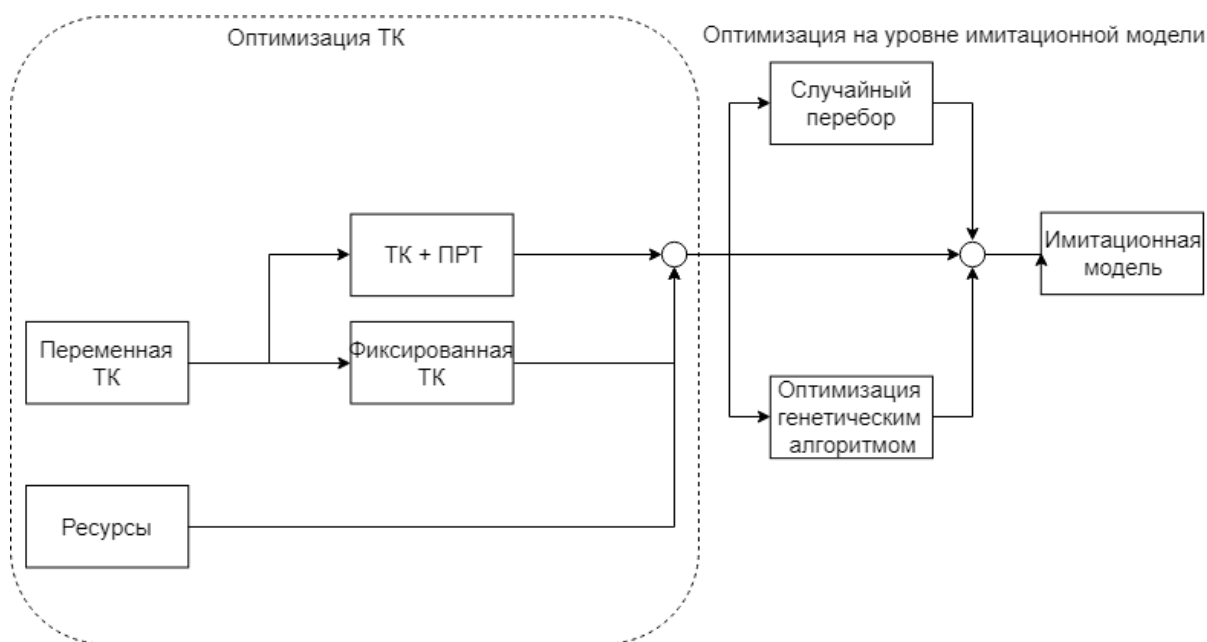


Рисунок 3.6 — Подсистема оптимизации

### Метод случайного перебора

Примером оптимизации может служить случайный выбор следующей операции при планировании, данный выбор возможен только в случаях одновременного выполнения нескольких независимых операций. Таким образом достигается вариативность при котором из разных реализаций, выбирается наилучший вариант. На рисунке 3.7 изображены технологическая карта продукта и два плана, который были построены в результате случайного выбора операций.

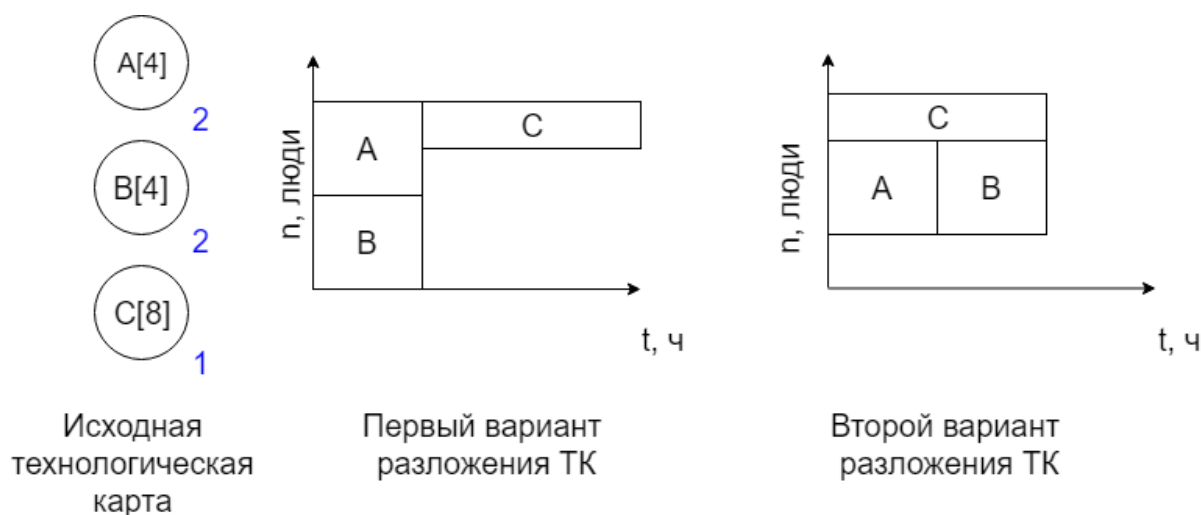


Рисунок 3.7 — Два плана, полученные путем перебора исходной технологической карты

Пример на рисунке 3.7 демонстрирует важность правильного выбора последовательности операций, обрабатываемой имитационной моделью.

### Генетические алгоритмы

Основной задачей данного подхода является поиск оптимального значения путем смешивания и введения небольших правок (мутаций) в выборку наилучших решений. Идеей такого рода алгоритмов является направленность поиска, которая позволяет преодолеть плато решений, при которых не происходит изменений в лучшую сторону.

### Эксперименты эффективности оптимизации

Результаты экспериментов показали, что эффективность оптимизации во многом зависит от размера и состава входных данных.

Так на входных данных полученных от реального производства, оптимизация случайным перебором показала себя не эффективно. В первую очередь это связано с размером входных данных<sup>1</sup>. В вторых это связано со сложностью алгоритма планирования, так как сам

<sup>1</sup>325 операций в одной технологической карте.

случайный перебор является его частью, что делает его зависимым от реализации имитационной модели.

Также стоит отметить проблемы, связанные с входными данными. Данные проблемы заключаются в вариативности данных. На уровне имитационной модели метод случайного перебора может оперировать только выбором следующей операции на обработку. Таким образом, если операции на выбор только одна, в случае когда последовательность операций в технологической карте задана строгим образом и такая связь задана для большинства операций, то количество вариантов стремится к минимуму, а значит и целесообразность применения метода ставится под вопросом.

В результате эксперимента были сделаны следующие выводы. Метод случайного перебора зависит от размера входных данных, при этом важно оценивать входные данные на предмет вариативности. Также стоит отметить, что сложность задачи определяется пользователем на этапе конфигурации перебора<sup>1</sup>, что еще сильнее повышает ценность предварительной оценки технологической карты.

### 3.4 Результаты работы имитационной модели

Проведение экспериментов над имитационной моделью показали следующие результаты.

Во первых при большом объеме входных данных имитационная модель работает не эффективно, что обусловлено исполнением алгоритмов, которые имеют большую вычислительную сложность. Данная проблема частично решилась благодаря использованию возможностей языка программирования `golang`, при этом задача имитационного моделирования разделась на потоки, что позволяло одновременно обрабатывать несколько входных технологических карт.

Во вторых, выяснилось, что потенциально основной проблемой в будущем может оказаться доступность реальных данных для ра-

---

<sup>1</sup>Имеется ввиду количество итераций случайного перебора.



боты имитационной модели. В рамках дипломной работы проверка имитационной модели проверялась на реальных технологических картах, при этом возник закономерный вопрос о сложности получения и организации данных о предприятии.

Таким образом, задачу поставленную в рамках дипломной работы по созданию имитационной модели производственных процессов считаю выполненной. При этом возникли новые, связанные задачи, которые будут предметом для следующих исследований.

## 4 Балансировка линии сборочных производств

### 4.1 Назначение и условия применения алгоритмов ПРТ

#### 4.1.1 Назначение ПРТ

На рисунке 3.6 приведена подсистема оптимизации. В предыдущем разделе были рассмотрены методы оптимизации на уровне имитационной модели, в данном разделе будут рассмотрены методы оптимизации на уровне входных данных, то есть предобработка технологической карты.

В связи с тем, что одной из основных целей проделанной работы является оптимизация производственного процесса, в рамках имитационной модели были реализованы оптимизационные задачи. Но как было замечено ранее, подходы к оптимизации не всегда эффективно справлялись со своей задачей, ввиду примитивной, но рабочей реализации (ввиду специфичности данных, с которыми работает имитационная модель). Основная проблема заключалась в сложности исходной задачи, где время работы алгоритмов случайного перебора определяется факториальным временем. Таким образом необходимо знать размер входных данных, и исходя из этого принимать решение о целесообразности применения полного перебора.

Для того, чтобы уменьшить влияние входных данных были разработаны разные вариации алгоритмов составления плана работы на такт. Назначение ПРТ является обеспечение максимизации загрузки ресурсов, что приведет к повышению экономической эффективности производства. ПРТ представляет из себя оперативный план на один такт сборочного производства, включающего в себя линии и посты, при полной его загрузке - заготовки находятся на каждом посту каждой линии.

#### 4.1.2 Входные данные

Некоторые из приведённых данных могут рассчитываться, что зависит от конкретного сценария использования. В таком случае - *они выделены таким образом.*

1) Технологическая карта включает:

- операции и их причинно-следственные связи;
- рабочие места на заготовке, макс. кол-во работников на рабочем месте;
- задействованные ресурсы для каждой операции:
  - а) работники соответствующих профессий (min, max, трудоёмкость, диапазон ожидаемого отклонения трудоёмкости<sup>1</sup>);
  - б) рабочее место на заготовке;
  - в) *номер поста для операции;*

2) Параметры производства включают:

- организация производства:
  - а) кол-во линий;
  - б) *кол-во постов;*
  - в) доступность/недоступность рабочих мест на заготовках на постах<sup>2</sup>;
  - г) *такт производства;*
- персонал:
  - а) *макс. кол-во работников в цеху;*
  - б) *кол-во работников каждой профессии;*

---

<sup>1</sup>Позволяет учитывать при планировании ожидаемые отклонения по оптимистическому/пессимистическому/случайному сценарию.

<sup>2</sup>К примеру, работы на крыше являются высотными и требуют специальных ограждений.

в) привязка работников к посту/линии;

г) сменный график по профессиям;

3) Настройки расчёта (*опционально*):

— изменение числа работников в процессе работы над операцией:

а) возможность изменение числа исполнителей операции;

б) минимальное время участия – не имеет смысла привлекать работника на очень короткий промежуток времени, так как больше на включение в операцию потратит.

в) временные потери на смену рабочего места, включение в выполняющуюся операцию;

— выравнивание сменного графика, производственного такта и операций (по смене, по  $1/2$ , по  $1/4$ , ...);

— синхронизация работы линий:

а) задается максимально допустимое время отклонения сборки на одном посту между линиями.

б) задается допустимый временной сдвиг между линиями.

4) Оценка качества варианта:

— настройка отклонения длительности работы от производственного такта ( $-0.1$ ,  $+0.01$ );

— настройки максимальной / минимальной загрузки персонала (0 - особый случай);

4.1.3 Выходные данные

Выходными данными является ПРТ, что включает:

1) время начала и конца операции (длительность);

2) кол-во работников на операцию;

- 3) расписание занятости ресурсов во времени, загрузка;
- 4) временные потери на перемещение персонала (в случае изменения числа работников в процессе работы над операцией).

#### 4.2 Балансировка сборочной линии

Производственная сборочная линия была впервые представлена Генри Фордом в начале 1900-х годов. Она была разработана с целью повышения эффективности, производительности изготовления конкретного продукта. Базовая сборочная линия состоит из нескольких рабочих станций, расположенных последовательно, где каждая станция соединена погрузочно-разгрузочным устройством. Движение материала или заготовки по сборочной линии начинается всегда с первой станции, оно осуществляется с заданной скоростью – она определяется тактом производственной линии. Станцией может считаться любая точка конвейера, на которой выполняется обработка заготовки – машинами, роботами и или людьми. Как только заготовка поступает на станцию начинается выполнение соответствующей операции (определяемой технологической картой), после окончания работ она подается на следующую станцию. Время, необходимое для выполнения операции на каждой станции, называется временем процесса [17]. Цикл производственной линии представляет собой общее время прохождения заготовкой всех станций конвейера с учетом простоев между операциями. Длительность цикла сборочной линии определяется желаемой производительностью. Этот уровень производства устанавливается таким образом, чтобы желаемое количество конечного продукта было произведено в течение определенного периода времени [18]. Для того чтобы сборочная линия поддерживала определенную производительность, такт производственной линии (время самой длительной операции конвейера) не должен превышать среднюю длительность процессов на станциях. Если время обработки на некоторой станции превышает среднюю длительность операции конвейера, говорят, что на этой станции присутствует простой. Одним из основных вопросов, касающихся

организации сборочной линии, является порядок выполнения задач. Проблема балансировки сборочной линии (ALBP) возникла вскоре после широкого распространения сборочных линий в промышленности. Хельгесон и др. [19] были первыми, кто предложил рассмотрение ALBP, как проблемы, требующей исследований, тогда как Сальвесон [20] был первым, кто опубликовал предложенную математическую формализацию проблемы. Однако в течение первых сорока лет существования сборочной линии для балансировки линий использовались только методы проб и ошибок. С тех пор было разработано множество методов для решения различных форм ALBP. Сальвесон [20] сделал первую математическую попытку, решив задачу в виде линейной программы. Гутьяр и Немхаузер [21] показали, что проблема ALBP относится к классу NP-сложных задач комбинаторной оптимизации. Это означает, что оптимальное решение не гарантируется для задач значительных размеров. Поэтому эвристические методы стали наиболее популярными методами решения проблемы.

Задачи балансировки линии:

- уменьшение количества рабочих станций при заданном цикле;
- уменьшение цикла при заданном количестве рабочих станций;
- уменьшение общего времени простоя;
- уменьшение общего объекта или длины линии.

Классификация проблемы ALB основана главным образом на целевых функциях и структуре сборочной линии. Различные версии проблем ALB представлены на рисунке 4.1.

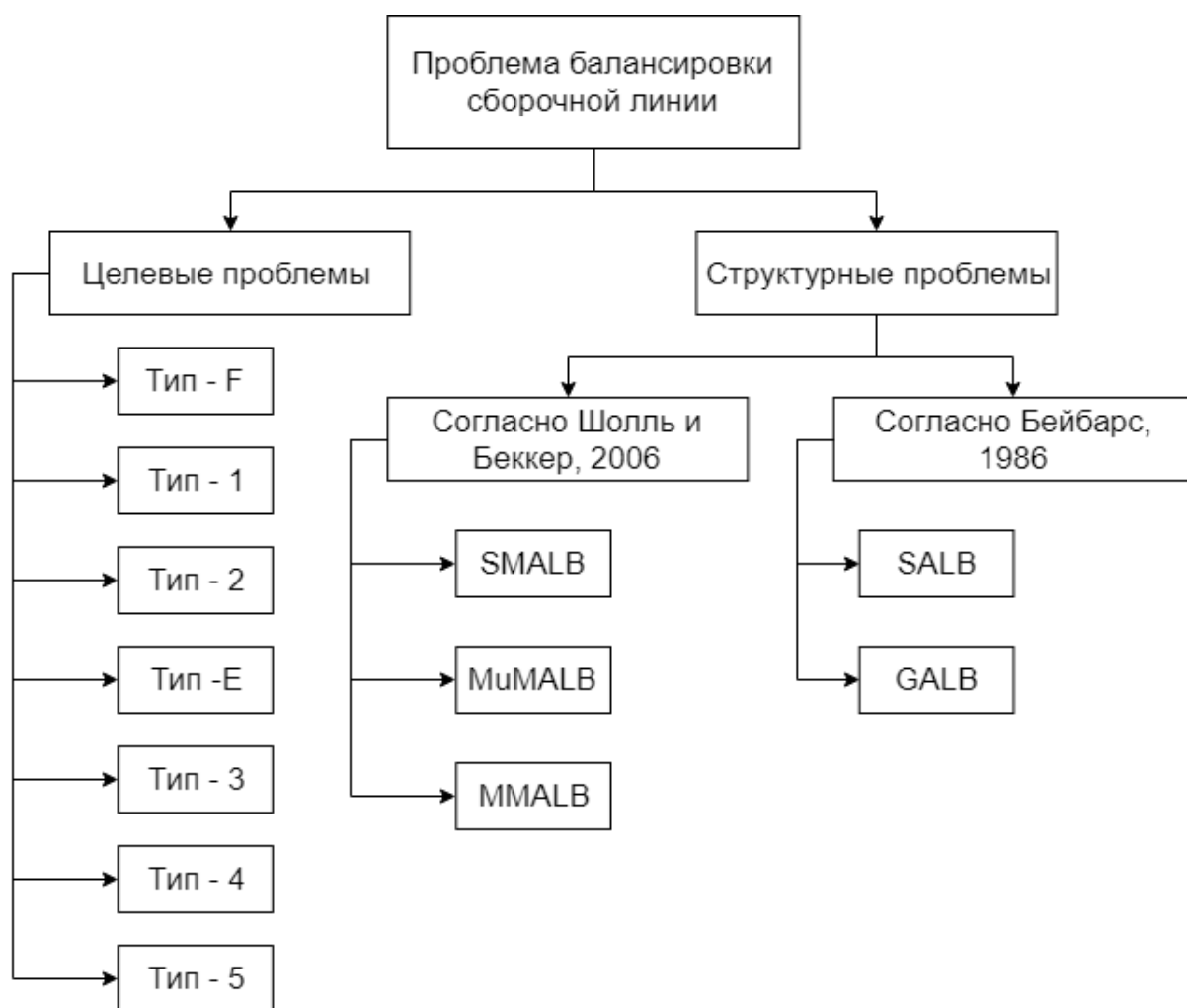


Рисунок 4.1 — Классификация ALBP

#### 4.2.1 Проблемы базирующиеся на целевых функциях

В данном подразделе рассматриваются целевые задачи балансировки линии. Далее перечисленные все обозримые проблемы приведенные на классификации 4.1 и представленно их краткое описание.

— Тип F: Рассматривает возможность создание линии при заданном количестве рабочих станций и цикле.

— Тип 1: Рассматривает задачу уменьшения количества рабочих станций, при фиксированном времени цикла.

— Тип 2: Рассматривает задачу уменьшения времени цикла, при фиксированном количестве рабочих станций.

— Тип Е: Данный тип является самой общей версией ПРТ и рассматривает получение максимальной эффективности линии при минимальном цикле и количестве станций.

— Тип 3: Рассматривает задачу увеличение плавности рабочей нагрузки.

— Тип 4: Рассматривают увеличение синхронности работы, используется в тех случаях, когда нужно производить быстро однотипный продукт.

— Тип 5: Рассматривает типы 3 и 4 для нескольких продуктов.

В рамках данной работы рассматривается функция повышения эффективности загрузки. Эффективность сборочной линии подразумевает равную загрузку всех рабочих станций на сборочной линии.

#### 4.2.2 Проблемы основывающиеся на структуре линии

В данном разделе рассматриваются структурные задачи балансировки линии. Далее перечислены структурные проблемы приведенные на рисунке 4.1 и их описание.

— SMALB: Данная проблема затрагивает структуру, когда на линии производится один тип продукта.

— MuMALBP: Затрагивает проблемы производства более одного типа продукта партиями на одной линии.

— MMALBP: Затрагивает производство разных типов продуктов на одной линии в любом порядке, без времени переключения (имеется ввиду время необходимое для переоснастки рабочих мест на линии для производства нового типа продукта).



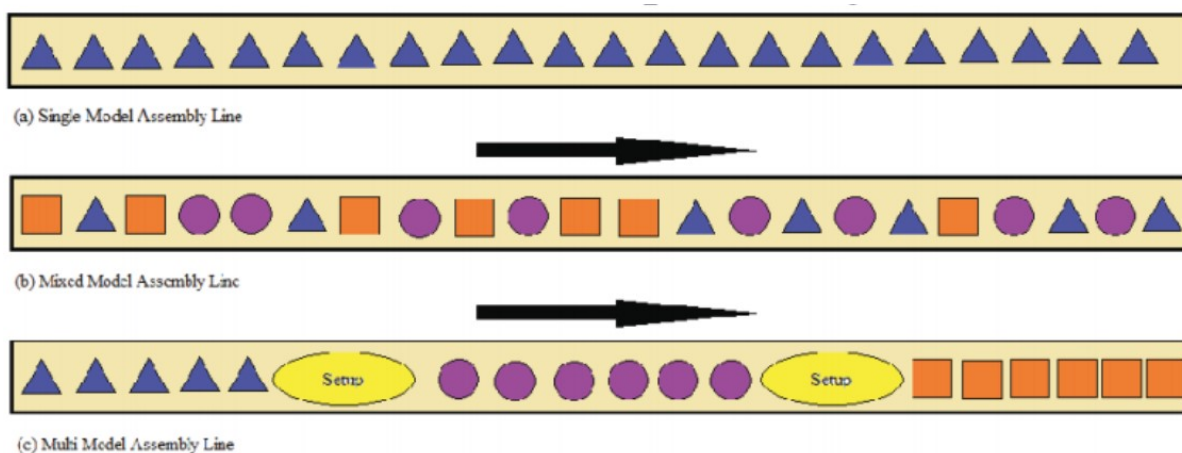


Рисунок 4.2 — Структура линий из классификации, изображенной на рисунке 4.1

Созданная имитационная модель позволяет игнорировать структурные особенности линии. Основные ограничения, которые невозможно игнорировать включены в технологическую карту.

#### 4.3 Обзоры методов решения проблем балансировки линии

На текущий момент известны множество подходов решения проблемы балансировки линии. Наиболее популярные подходы и методы приведены на рисунке (4.3).

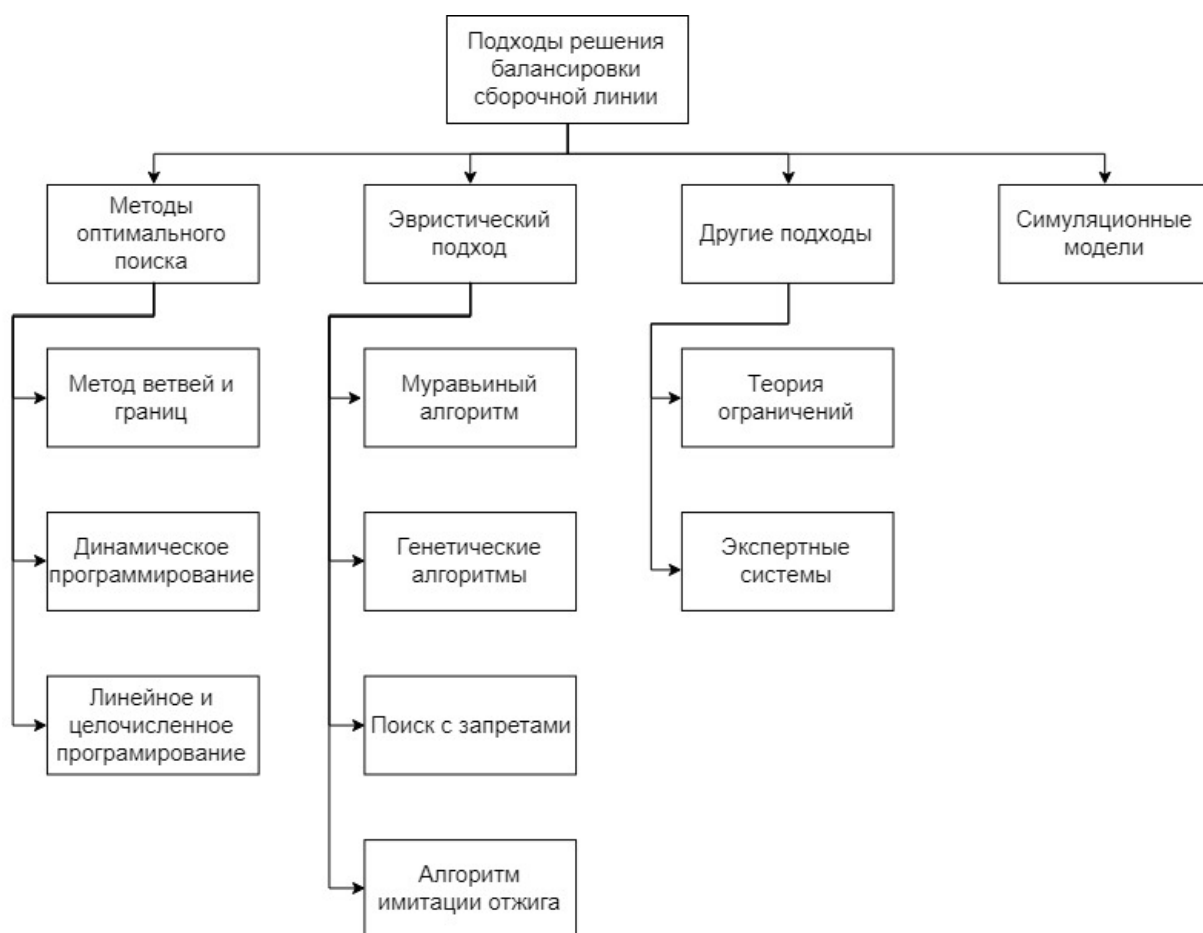


Рисунок 4.3 — Различные процедуры решения для ALB

#### 4.3.1 Методы оптимального поиска

Методы оптимального поиска основаны на математических подходах и позволяют найти из множества объектов оптимальный, который соответствует заданным критериям. Одной из основных проблем данного подхода является вычислительная сложность, что в контексте поиска наилучшей конфигурации конвейера, приводит к существенному ограничению использования методов оптимального поиска. В следующем подразделе будет рассмотрен метод оптимизации полного перебора, который может существенно снизить вычислительную сложность алгоритма.

## Метод ветвей и границ

В общем случае метод ветвей и границ позволяет отсеять подмножество допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений. Поиск оптимизируемого подмножества сводится к поиску станции на которой время выполнения всех операций является максимальным из возможных.

В контексте балансировки линии задача будет сформулирована следующим образом:

1) Из всех возможных станций выбор наиболее загруженной с целью полного перебора всех возможных вариантов последовательностей и поиск оптимального решения. В результате может быть два возможных варианта, либо перетасовка операций действительно позволила использовать неиспользуемые ресурсы, либо перетасовка ни к чему не привела. На рисунке 3.7 продемонстрированы два варианта разложения технологических карт.

В первом варианте разложения технологической карты две независимые операции А и В выполняются параллельно при этом задействованы все ресурсы в промежутке от нуля до четырех часов. Далее выполняется операция С, которая требует для выполнения одного работника, при этом трое рабочих остаются без работы на протяжении восьми часов.

Во втором варианте операция С выполняется параллельно с операциями А и В при этом общее выполнения всех операций сократилось до восьми часов и на протяжении 8 часов один незадействованный рабочий.

Данный пример демонстрирует один из возможных способов оптимизации путем перетасовки операций, опирающийся на причинно-следственную связь операций. Где из всех возможных множеств, выбирается только одно подмножество, которое с большой вероятностью содержит приближенный к оптимальному результат.

2) В тех случаях, когда оптимизация перетасовки операций не принесла результатов, используется подход основанный на изменении привязок ресурсов к операциям. Так как длительность операции не задается, а рассчитывается на основе входных данных, изменение этих данных позволяет гибко менять длительности операций, и таким образом влиять на загрузку ресурсов.

#### 4.3.2 Эвристический подход

Методы эвристики позволяют избежать проблемы комбинаторной сложности задачи, но при этом результат не всегда будет являться самым оптимальным из возможных. Также эффективность работы алгоритмов эвристики во многом зависят от подхода. На рисунке 4.3 приведены пять различных эвристических алгоритмов, которые использовались для решения проблемы балансировки линии. Одним из наиболее эффективных показал себя генетический алгоритм поиска. Рассмотрим подробно, как работает генетический алгоритм в контексте балансировки линии.

##### Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы хорошо подходят для решения задач планирования производства, потому что в отличие от эвристических методов генетические алгоритмы работают на совокупности решений, а не на одном решении. В производственном планировании эта совокупность решений состоит из множества ответов, которые могут иметь разные, иногда противоречивые цели. Например, в одном решении оптимизировать производственный процесс, который будет завершен за минимальное время. В другом решении оптимизировать для минимального количества дефектов.

По мере того как увеличиваются количество целей, которые пытаемся достичь, также увеличивается количество ограничений на проблему и аналогичным образом увеличиваем сложность. Генетиче-

ские алгоритмы идеальны для задач такого типа, когда пространство поиска велико, а количество возможных решений мало.

Чтобы применить генетический алгоритм к задаче планирования, необходимо сначала представить каким образом обозначить геном. Одним из способов представления генома планирования является определение последовательности задач и времени начала этих задач относительно друг друга. Каждое задание и соответствующее время его запуска представляют собой ген.

Определенная последовательность задач и времени начала (гены) представляет один ген в нашей популяции. Чтобы убедиться, что геном является возможным решением, надо чтобы он соответствовал ограничениям приоритета. Далее генерируется начальная популяция, используя случайные времена начала в пределах ограничений предшествования. С помощью генетических алгоритмов берется начальная популяция и скрещивается, комбинируя гены с небольшим количеством случайности (мутации). Потомки этой комбинации выбираются на основе функции приспособленности<sup>1</sup>, которая включает одно или много наших ограничений, таких как минимизация времени и минимизация дефектов. Данный процесс продолжаться либо в течение заранее выделенного времени, либо до тех пор, пока не найдется решение, которое соответствует минимальным критериям. В целом каждое последующее поколение будет иметь более высокую среднюю пригодность, то есть займет меньше времени с более высоким качеством, чем предыдущие поколения. Также может потребоваться добавить дополнительные значения пригодности, такие как минимизация затрат; однако каждое добавляемое ограничение значительно увеличивает пространство поиска и уменьшает количество подходящих решений.

---

<sup>1</sup>Функция приспособленности — вещественная или целочисленная функция одной или нескольких переменных, подлежащая оптимизации в результате работы генетического алгоритма, направляет эволюцию в сторону оптимального решения. Является одним из частных случаев целевой функции

### 4.3.3 Результаты экспериментов оптимизации ПРТ

Оптимизация плана работы на такт, в отличие от оптимизации на уровне имитационной модели, работает над входными данными. Данное отношение подходов можно увидеть на рисунке 3.6, демонстрирующей подсистему оптимизации.

Результаты работы алгоритмов ПРТ, как и в разделе 3.3.6, были протестированы на реальных данных. Полученные результаты ничего не показали. Это связано с тем, что в привязках к операциям полностью отсутствовала вариативность, число рабочих на операции было строго фиксировано. Таким образом протестировать эффективность алгоритмов ПРТ на реальных данных оказалось невозможным, поэтому для тестирования была создана искусственная ТК.

Основной целью алгоритмов ПРТ была оптимизация конвейеризованных производств. Для этого были разработаны и протестированы два подхода. Первый подход заключался в оптимальном поиске случайным перебором. Методом оптимизации случайного перебора был выбран метод ветвей и границ, который значительно уменьшал размер входных данных. На тестовой ТК алгоритм оптимального поиска показал себя эффективным ввиду небольшого размера исходной задачи. При этом генетический алгоритм показал подобный результат, при этом была выдвинуто предположение о том, что при большом размере входных данных будет большая разница в эффективности данных подходов в пользу генетических алгоритмов.

## Заключение

В рамках данной работы рассматривались задачи построения цифрового двойника производства, имитирующего производственные процессы, а также рассматривались методы поиска оптимального оперативного плана производства.

В рамках создания цифрового двойника были достигнуты следующие результаты:

- 1) создана архитектура подсистемы имитационного моделирования;
- 2) разработаны алгоритмы генерации расписания производства.

В ходе работ также были исследованы области оптимизации планирования на производстве и достигнуты следующие результаты:

- 1) создана архитектура подсистемы оптимизации;
- 2) разработаны алгоритмы оптимизации на уровне имитационной модели;
- 3) разработаны алгоритмы оптимизации плана работы на такт для конвейеризированных производств;
- 4) проведено тестирование функционирования методов оптимизации в различных режимах работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д.А. Гаврилов. Управление производством на базе стандарта MRP II. Спб Питер, 2003.
2. Ptak C. A., Schragenheim E. ERP: tools, techniques, and applications for integrating the supply chain. St. Lucie Press, 2004.
3. Разумов И.М., Степанов А.П., Смирнов С.В. Научная организация и нормирование труда в машиностроении. Учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 1975.
4. Э. Мюллер, М. Шенк, З. Вирт. Планирование и эксплуатация промышленных предприятий: Рабочие методики для адаптивного, сетевого и ресурсосберегающего предприятия. 2017.
5. Дж. Лодон, К. Лодон. Управление информационными системами. 2005.
6. Д. О'Лири. ERP системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия. Выбор, внедрение и эксплуатация. 2004.
7. Гибсон, Дж.Л. Организации: поведение, структура, процессы. 2000.
8. Маззулло Джим, Уитли Питер. SAP R/3 для каждого. Пошаговые инструкции, практические рекомендации, советы и подсказки. 2008.
9. Герхард Келлер, Томас Дикерсбах Йорг. Планирование и управление производством с помощью решений SAP ERP. 2011.
10. E. Velazco Enio. Simulation of manufacturing systems // International Journal of Continuing Engineering Education and Life-Long Learnin. 1994. 12. Т. 4. С. 80–92.
11. Benedettini Ornella, Tjahjono Benny. Towards an improved tool to facilitate simulation modelling of complex manufacturing systems //



International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. 07. T. 43. C. 191–199.

12. G. Holst Lars, Bolmsjö Gunnar. Simulation integration in manufacturing system development: A study of Japanese industry // Industrial Management and Data Systems. 2001. 10. T. 101. C. 339–356.

13. B Detty Richard, C Yingling Jon. Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: A case study // International Journal of Production Research. 2010. 11. T. 38.

14. Robinson Stewart. Simulation: The Practice of Model Development and Use, 2nd edition. 2014. 04.

15. Venkateswaran Jayendran, Son Young-Jun, Jones Al. Hierarchical Production Planning Using a Hybrid System Dynamic-Discrete Event Simulation Architecture. T. 2. 2005. 01. C. 1094–1102 vol.2.

16. Simulation in manufacturing and business: A review / Mohsen Jahangirian, Tillal Eldabi, Aisha Naseer [и др.] // European Journal of Operational Research. 2010. 05. T. 203. C. 1–13.

17. J. SURY R. Aspects of assembly line balancing // THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH. 1971. 01. Vol. 9. P. 501–512.

18. Baybars I. A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem // Management Science. 1986. 08. Vol. 32. P. 909–932.

19. Helgeson W., Birnie D. Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weighting Technique. // Journal of Industrial Engineering. 1961. Vol. 12. P. 394–398.

20. Salveson M. The assembly line balancing problem // Journal of Industrial Engineering. 1955. 01. Vol. 6. P. 18–25.

21. L. Gutjahr A., Nemhauser G. An Algorithm for the Line Balancing Problem // Management Science. 1964. 11. Vol. 11. P. 308–315.