

На правах рукописи



Никитин Николай Сергеевич

**Модели и методы разработки мультиагентных систем в
планировании и диспетчеризации производства**

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор экономических наук, профессор
Ильин Игорь Васильевич

Официальные оппоненты: **Скобелев Петр Олегович**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, главный научный сотрудник
федерального государственного бюджетного
учреждения науки Самарский федеральный
исследовательский центр Российской
академии наук, г. Самара

Луценко Евгений Вениаминович

доктор экономических наук, профессор
кафедры компьютерных технологий и систем
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Кубанский аграрный
университет им. И. Т. Трубилина», г.
Краснодар

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт экономики и
организации промышленного производства
Сибирского отделения Российской академии
наук, г. Новосибирск

Защита состоится «30» июня 2025 года в 14:00 на заседании диссертационного
совета У.5.2.2.51 федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Новороссийская,
50, корпус 50, аудитория 2405).

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат экономических наук



А.С. Дубгорн

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Изменяющаяся природа глобализационных процессов в контексте новых геоэкономических вызовов и стремительно растущий уровень цифровизации общества привели к существенному обострению конкуренции на товарных, финансовых, энергетических и других рынках, что побуждает менеджмент предприятий искать новые методы управления, которые бы позволили достичь им отвечающего современным реалиям уровня качества обслуживания клиентов. CRM (Customer Relationship Management) и ERP (Enterprise Resource Planning) системы сегодня применяются бизнесом повсеместно, однако самого факта использования таких систем становится недостаточно для получения конкурентных преимуществ. ERP системы позволяют хранить, систематизировать и анализировать огромные объемы информации, что помогает менеджменту предприятий принимать эффективные управленческие решения, а также своевременно корректировать стратегию развития компании, однако системы такого класса не имеют средств для своевременной идентификации ресурсных потребностей и возможностей предприятия, которые позволяли бы оперативно перестраивать работу внутренних подразделений под меняющиеся условия внешней среды. Развитие искусственного интеллекта как научной дисциплины открывает новые возможности для бизнеса, позволяющие повысить экономическую эффективность и обеспечить своевременность управленческих решений. Исследования в области применимости различного рода направлений искусственного интеллекта для решения бизнес-задач на сегодняшний день носят ключевой характер во многих исследовательских центрах и институтах. Одним из направлений таких исследований являются мультиагентные системы, позволяющие решать сложные экономические задачи и задачи управления.

Одной из наиболее сложных с точки зрения объема информации и требований к скорости принятия решений является сфера производства. Любой производственный процесс реализуется в рамках ресурсных, временных и технических ограничений, что накладывает свои требования к его планированию и управлению над ним. Оперативное планирование и диспетчеризация производства представляют собой сложный управленческий процесс, что обуславливается высокой динамичностью внешней среды, неопределенностью входных данных, множественностью стохастических факторов и нелинейностью экономических взаимосвязей. Данные обстоятельства требуют от хозяйствующих субъектов внедрения специализированных инструментов управления, способных обеспечивать принятие решений в режиме реального времени, снижение влияние фактора человеческой ошибки, достижение высокого уровня адаптивности к внешней среде. Децентрализованные интеллектуальные системы, которые учитывают противоречивость интересов различных участников и нелинейность экономических процессов, сегодня начинают активно развиваться и получают широкое распространение, однако значительная часть исследований в данной области, а также разрабатываемые модели, носят преимущественно имитационный характер, что подразумевает воспроизведение процессов или явлений без полного учета всех факторов реальной среды. Исследования и разработки в области мультиагентного моделирования для решения задач планирования производства нуждаются в теоретическом обосновании и практической проработке.

Проблема, решаемая в работе, состоит в следующем: рассматриваемым классам производственных предприятий с одной стороны требуется строить оперативные планы производства, которые обеспечивают достижение определенных критериев эффективности, а с другой стороны, находить решения за сжатое время, адаптируясь к различного рода внешним

и внутренним факторам. Достижение баланса между этими двумя противоречивыми требованиями в условиях неопределенности вкупе с большим объемом данных представляет собой сложную задачу, решить которую традиционными методами за сжатое время не представляется возможным.

Степень разработанности темы. В диссертации рассмотрены подходы к планированию производства в целом и особенности использования применения мультиагентного подхода, в частности. Данным вопросам посвящены труды отечественных и зарубежных ученых, изучающих методы и алгоритмы мультиагентного моделирования, математико-экономические модели планирования производственных процессов, модели кооперации агентов. Большой вклад в эти исследования и разработки внесли такие ученые, как: Бахтизин А.Р., Варшавский В.И., Граничин О.Н., Девятков В. В., Зайцев И. Б., Ильин И. В., Луценко Е. В., Макаров В.Л., Симонова Е.В., Скобелев П.О., Тарасов В.Б. и другие. Среди зарубежных ученых можно назвать следующих: Corkill D.D., Joseph B., Lenat D.B., Lesser V.R., Shoham Y., Wooldridge M.J. и других. Общий вывод по анализу научных источников свидетельствует о достаточной степени проработанности вопросов, связанных со спецификой планирования производственных процессов и с моделированием социально-экономических процессов. Можно отметить, что, несмотря на значительный вклад исследователей в развитие мультиагентных технологий, их применение для оптимизации процессов производственных предприятий, в том числе в задачах планирования и диспетчеризации производства, требует дальнейшего изучения и развития. Исходя из вышесказанного была сформирована цель и задачи настоящего исследования.

Цель диссертационной работы заключается в разработке конструктивных моделей, методов и алгоритмов оперативного планирования и диспетчеризации производства для промышленных предприятий серийного, дискретного и единичного типа с применением мультиагентных технологий, направленных на повышение экономической эффективности предприятий за счет оптимизации использования производственных ресурсов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Исследовать существующие методы решения задачи оперативного планирования производства, провести их сравнительный анализ и предложить комбинированный подход, обеспечивающий баланс между вычислительной сложностью и качеством получаемых расписаний в соответствии с заданными критериями оптимальности.
2. Исследовать современные методы проектирования мультиагентных систем, провести их сравнительный анализ и предложить подход к проектированию, учитывающий специфику задач оперативного планирования и диспетчеризации производства.
3. Разработать мультиагентную модель планирования заказов для производственных предприятий непоточного типа, направленную на повышение их экономической эффективности за счет усовершенствованного управления портфелем заказов и производственными ресурсами в сравнении с традиционными методами.
4. Разработать конструктивные методы и алгоритмы мультиагентного моделирования производственных процессов, минимизирующие избыточную коммуникацию агентов, совершенствующие подходы к принятию решений агентами и оптимизирующие распределение вычислительных ресурсов между агентами для обеспечения устойчивых состояний моделируемой системы
5. Разработать концептуальную модель системы поддержки принятия решений на базе мультиагентной модели планирования заказов на производствах непоточного типа.

Объектом диссертационной работы являются производственные предприятия серийного, дискретного и единичного типа, осуществляющие планирование и диспетчирование производственной программы.

Предметом диссертационной работы являются модели, алгоритмы и методы оперативного планирования производства, в том числе с использованием мультиагентных технологий.

Теоретической основой исследования является теория расписаний, исследования и разработки в области мультиагентных технологий, разработки в области эвристических и мета эвристических алгоритмов решения NP задач, а также результаты, изложенные в трудах ведущих мировых специалистов в сфере искусственного интеллекта, теории расписаний и планирования производства.

Методологической основой исследования являются общенаучные методы познания: анализ, синтез, формализация и моделирование. В качестве средств моделирования использовалась программная платформа .NET, система Preactor, а также язык программирования Python.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами: 4. «Разработка и развитие математических и компьютерных моделей и инструментов анализа и оптимизации процессов принятия решений в экономических системах.», 13. «Агентно-ориентированное моделирование сложных экономических систем» и 18. «Развитие и применение инструментария проектирования, разработки и сопровождения информационных систем в интересах субъектов экономической деятельности» паспорта специальности 5.2.2 – Математические, статистические и инструментальные методы экономики.

Научная новизна работы раскрывается в **основных положениях, выносимых на защиту**:

- Разработан жадный рандомизированный адаптивный алгоритм поиска допустимых распределений технологических операций по рабочим центрам, удовлетворяющим заданным критериям эффективности, развивающий существующие подходы к решению задач теории расписаний в целом и задач оперативного планирования производства в частности.
- Разработан гибридный метод проектирования мультиагентных информационных систем, основанный на исследовании и синтезе существующих методов и отличающийся адаптированностью для решения задач оперативного планирования производства.
- Разработана мультиагентная модель планирования производственных процессов, применение которой в отличие от существующих позволяет в необходимые сроки идентифицировать ресурсные возможности и потребности предприятия для выполнения плана производства, что развивает существующие подходы к мультиагентному моделированию в контексте оперативного планирования производства.
- Предложена концептуальная модель системы поддержки принятия решений (далее – СППР) на базе мультиагентной модели планирования производственных процессов, совершенствующая существующие подходы к разработке СППР для промышленных предприятий

- Предложен подход к минимизации затрат единичных, серийных и дискретных производств за счет снижения количества операций переналадки, основанный на комплексе авторских методов и моделей, позволяющий снизить себестоимость выпускаемых изделий, а также увеличить ритмичность производства.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что был проведен анализ вычислительных возможностей существующих алгоритмов планирования операций по рабочим центрам и архитектурных особенностей методов мультиагентного моделирования, приведена классификация алгоритмов и методов, выделены их сильные и слабые стороны. Также была разработана модель мультиагентного планирования производственных процессов, сделаны заключения и выводы, полученные в результате проведения исследования, что позволяет использовать полученные результаты в научных работах, связанных с исследованиями в области планирования производственных процессов.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке алгоритма, позволяющего в сжатые сроки находить допустимые решения задачи распределения операций по рабочим центрам (по заданному критерию оптимизации), которые могут приближаться к оптимальному решению, а также в разработке методов и алгоритмов, необходимых для реализации мультиагентной модели планирования производства.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации обеспечивается корректным выбором исходных данных, основных допущений и ограничений при постановке научной задачи, использованием системного подхода и апробированного экономико-математического аппарата ее решения. Научные положения и выводы, представленные в диссертационной работе, базируются на современной теоретико-методологической базе исследования, включая труды отечественных и зарубежных ученых в области планирования производства и мультиагентных систем. Достоверность научных положений также подтверждается достаточной степенью релевантности полученных результатов с практикой принятия решений при оперативном планировании единичного, дискретного и серийного производства.

Апробация и реализация результатов исследования. Результаты работы обсуждались на семинарах и конференциях:

- Международный онлайн-семинар «Искусственные общества и информационные технологии» ЦЭМИ РАН
- 33-я международная конференция IBIMA Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020 (Гранада, 2019 г.).
- Семинары Высшей школы бизнес-инжиниринга

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК. Материалы диссертационного исследования отображены достаточно полно.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Во введении сформулирована проблематика исследования, описаны пункты новизны, представлены цель и задачи исследования. В первой главе рассмотрены существующие методы планирования и диспетчеризации производства, выявлены преимущества и недостатки существующих подходов и методов, представлен исторический экскурс развития мультиагентного подхода как одного из методов, используемых для решения экономических задач. Также рассмотрен мультиагентный подход в разрезе его применения в

сфере оперативного планирования производства. Было проанализировано современное состояние изученности вопроса применения мультиагентного подхода для решения задачи оперативного планирования производства. Во второй главе рассмотрены методы проектирования мультиагентных систем, разработан жадный рандомизированный адаптивный алгоритм поиска допустимых распределений технологических операций по рабочим центрам, разработан гибридный метод проектирования для возможности применения агентного подхода в сфере производства. Проанализированы существующие методы проектирования архитектуры интеллектуальных агентов, представлена модель архитектуры интеллектуального агента для возможности разработки агентов в рамках решения задачи оперативного планирования производства. В Третьей главе представлена концептуальная модель системы поддержки принятия решений на базе разработанной мультиагентной модели оперативного планирования производства. На основании входных данных был осуществлен процесс моделирования, получены результаты, отражающие релевантность полученных данных реальному производству, продемонстрирован экономический эффект, получаемый предприятием при использовании мультиагентной модели.

Объем диссертации составляет 202 страницы, включая 48 рисунков, 11 таблиц, а также 5 приложений. Список литературы содержит 123 наименования.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработан жадный рандомизированный адаптивный алгоритм поиска допустимых распределений технологических операций по рабочим центрам, удовлетворяющим заданным критериям эффективности, развивающий существующие подходы к решению задач теории расписаний в целом и задач оперативного планирования производства в частности.

Оперативное планирование производства является сложной задачей, что обуславливается требованиями к высокой детализации плана, который используется системами управления производства (MES) для выпуска сменно-суточных заданий. Широкая номенклатура выпускаемой продукции, большое количество технологических процессов, необходимость синхронизации работы цехов и пр. требуют от информационных систем серьезных вычислительных ресурсов, посредством которых составляется набор оперативных планов. Данная задача является задачей дискретной оптимизации и подвидом стандартной задачи назначения из теории расписаний. Задача (как и задача о назначениях) является NP-трудной, что в том числе обуславливается временным ограничением, накладываемым на поиск оптимального решения. Рассмотрим данную задачу подробнее, упростив ее в части возможных вариантов технологических процессов: пусть задано множество ресурсов $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, каждый из которых обладает определённой мощностью m и имеет собственное расписание, состоящее из r временных интервалов фиксированной длины. Положим, что ресурсы функционируют без перерывов, однако временной горизонт планирования ограничен количеством интервалов r . На данных ресурсах необходимо распределить множество заказов, представленных в виде операций $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$. Каждая операция O_i имеет длительность, равную длине одного временного интервала на любом ресурсе, и может быть выполнена на любом ресурсе из множества M . Существует строгая последовательность выполнения операций в рамках одного заказа, при этом параллельное выполнение операций не допускается. Целью является поиск оптимального (по набору критериев) распределения операций по рабочим центрам. Формально, возможное количество решений описывается

функцией от количества операций n , количества ресурсов k и числа временных интервалов r следующим образом (1):

$$f(n, r, m) = \frac{n!}{r!(n-r)!} \cdot m^r \quad (1)$$

где:

- $\frac{n!}{r!(n-r)!} = C(n, r)$ — количество способов выбрать r строго увеличивающихся интервалов из n доступных интервалов;
- n — общее количество временных интервалов на каждом ресурсе;
- r — количество операций, которые необходимо выполнить;
- m — количество доступных ресурсов.

На Рисунке 1 продемонстрировано, как возрастает количество возможных вариантов распределений операций по ресурсам с ростом количества доступных временных интервалов и ресурсов при фиксированном количестве операций.

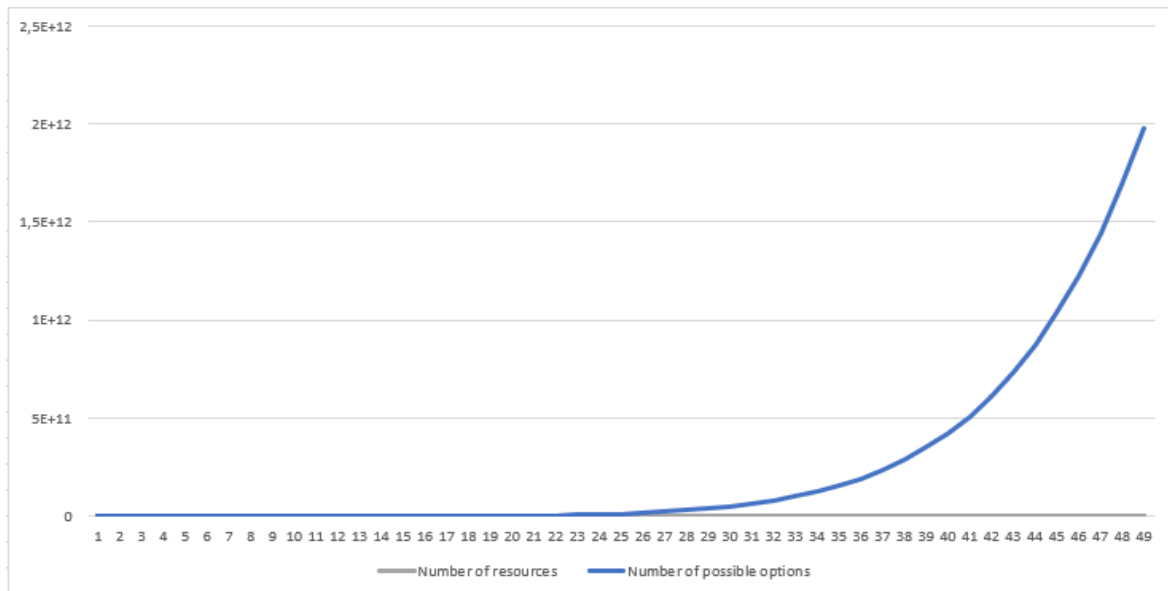


Рисунок 1 - Влияние увеличения временных интервалов ресурсов и количества ресурсов на количество возможных вариантов распределений

Совместное увеличение n и m приводит к полиномиально-экспоненциальному росту количества вариантов, что затрудняет применение точных методов. Для решения задачи предложено взять за основу алгоритм GRASP (жадный рандомизированный адаптивный алгоритм) подход. Данный подход, разработанный Т.А. Фео (Feo) и М.Г.К. Ресенде (Resende), сочетает в себе элементы жадного выбора и стохастической рандомизации, что позволяет диверсифицировать поиск и повысить вероятность нахождения глобального оптимума.

Алгоритм графически представлен на Рисунке 2:

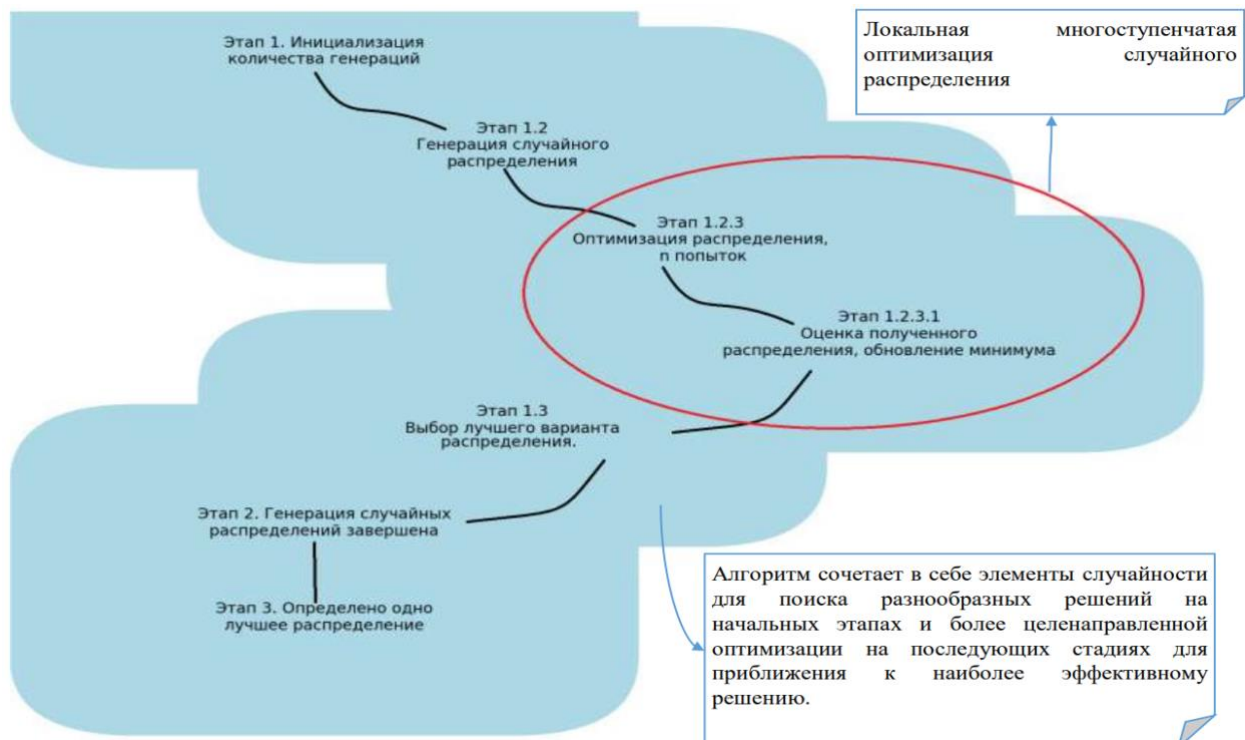


Рисунок 2 - Авторский жадный алгоритм поиска допустимых распределений технологических операций по рабочим центрам

Укрупненно алгоритм выглядит следующим образом:

1. Инициализация данных:

- Получение списка заказов и ресурсов.
- Инициализация переменных для хранения лучшего распределения и генератора случайных чисел.

2. Генерация начального расписания:

- Цикл из n итераций для генерации случайных расписаний.
- Создание начального случайного расписания.

3. Построение начального расписания:

Для каждого заказа и каждой операции в заказе:

- Случайный выбор ресурса
- Поиск свободного момента времени на выбранном ресурсе
- Если момент найден, операция планируется на этот момент
- Если операция не может быть запланирована, она пропускается
- Проверка корректности расписания и расчет суммарной стоимости реализации распределения.

4. Оптимизация расписания:

- Цикл из m итераций для оптимизации расписания:

- Поиск худшей пары операций по заданным критериям
- Определение границ для обмена операций
- Поиск моментов, которые можно обменять.
- Выполнение обмена операций и обновление расписания, если стоимость улучшается.

5. Проверка корректности расписания:

- Проверка, что все операции в заказах расположены в правильном порядке.
- Проверка уникальности интервалов на каждом ресурсе.

Для верификации гипотезы о том, что адаптированный алгоритм GRASP обеспечивает приемлемое соотношение качества решений и вычислительной сложности в рамках задачи оперативного планирования производства, проведено его сравнение с другими методами, основанными на различных подходах к поиску решений. Для проверки гипотезы использовался один критерий – минимизация переналадочных операций.

Результаты представлены на Рисунке 3 и 4.

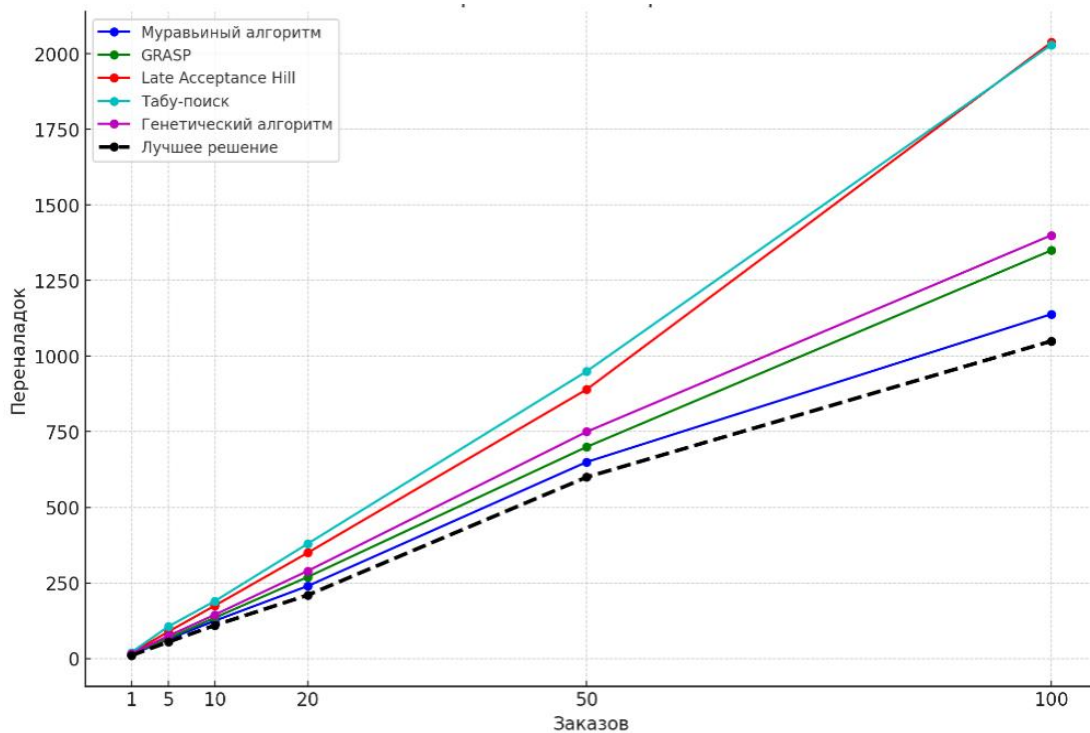


Рисунок 3 - Результаты решения задачи разными алгоритмами

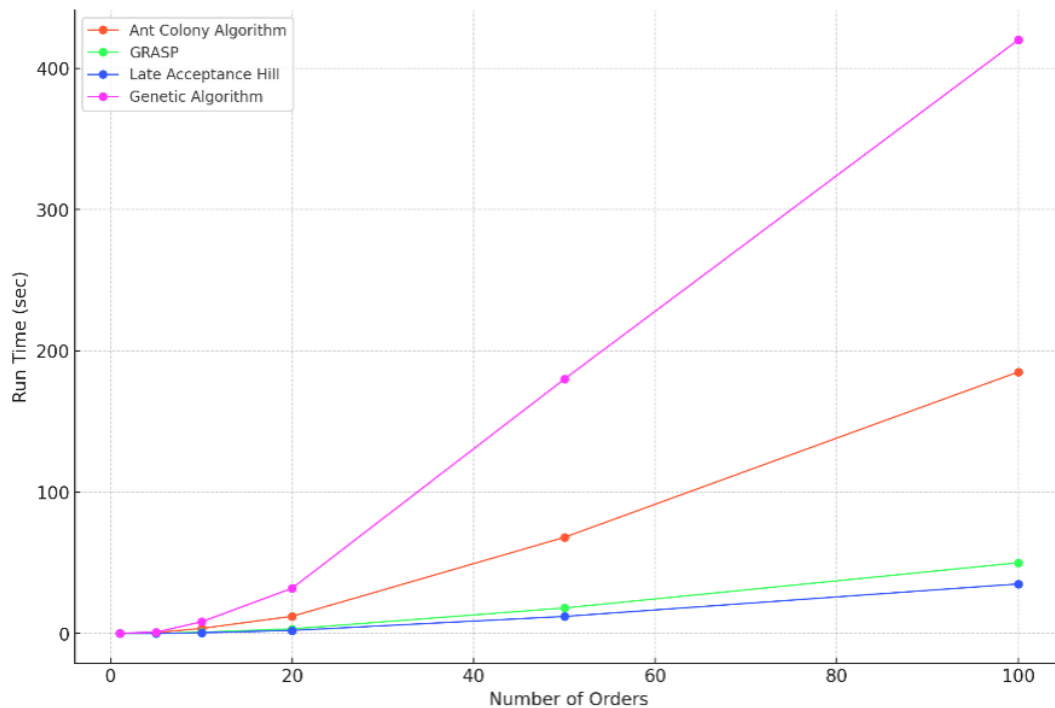


Рисунок 4 - Время, затраченное разными алгоритмами на поиск решения

Согласно результатам, наиболее близкие к лучшим решениям были найдены муравьиным алгоритмом, при этом быстрее всего решение было найдено алгоритмом Late Acceptance Hill Climbing. В то же время, в соотношении качества решения и времени, затраченного на поиск, алгоритм GRASP показал лучшие результаты, что позволяет говорить о том, что данный метод может быть использован для решения поставленной задачи. Поиск с запретами был исключен из графика сравнения затраченного времени, так как после планирования 20 заказов затраченное время начинает расти экспоненциально и дальнейший анализ не имеет смысла. Разработанный GRASP алгоритм за сжатые сроки позволяет находить приемлемые решения, удаленные от оптимального незначительно (зависит от размерности задачи).

2. Разработан гибридный метод проектирования мультиагентных информационных систем, основанный на исследовании и синтезе существующих методов и отличающийся адаптированностью для решения задач оперативного планирования производства.

Мультиагентная среда существует над вычислительной сетью, задействуя все доступные ей вычислительные узлы. На сегодняшний день существует ряд методологий для проектирования агентной среды, однако ключевыми являются: MAS-Common KADS, Gaia, INGENIAS, PASSI и Prometheus. Для проектирования был выдвинут ряд требований.

Таблица 1 - Сравнительный анализ методов проектирования агентной среды

Требование/Метод	MAS-Common KADS	Gaia	INGENIAS	PASS I	Prometheus
Проектирование стохастической агентной среды	+	-	-	-	+
Проектирование детерминированной агентной среды	-	+	+	+	+
Итеративность процесса проектирования	+	+	+	-	+
Макро и Микропроектирование	-	+	+	+	+
Простота проектирования	+	+	+	-	-
Формализованное проектирование	-	-	+	-	+
Непротиворечивость описания проектов	-	+	-	-	-

В Таблице 1 представлено сравнение методов проектирования агентных сред в разрезе выдвинутых требований к проектированию. Моделирование производства представляет собой процесс последовательного описания номенклатуры изготавливаемых изделий, технологических процессов, оборудования, его режима работы и прочих элементов производственного процесса. Анализ существующих методов на предмет возможности их применения для проектирования агентной среды производства показал, что ни один из них не удовлетворяет всем требованиям. В связи с этим, необходима проработка гибридного метода, который может быть применен для решения задачи проектирования агентной среды. На этапе анализа предлагается применение этапов из метода Gaia:

- Определение роли и построение модели ролей;
- Определение протоколов и формирование модели взаимодействия;

Этап анализа из метода Gaia позволяет в общем виде описать все необходимые роли и взаимодействия, что может быть использовано в дальнейшем для этапа проектирования в рамках любой методологии. Сам этап проектирования автор предлагает проводить, используя метод MAS-Common KADS, так как ее применение позволяет проектировать недетерминированные мультиагентные среды, а также обеспечивает простоту и итеративность процесса. Анализ и проектирование на стыке данных методов позволяет получать непротиворечивые и полные результаты, что является необходимым в рамках процесса имитационного моделирования.

3. Разработана мультиагентная модель планирования производственных процессов, применение которой в отличие от существующих позволяет в необходимые сроки идентифицировать ресурсные возможности и потребности предприятия для выполнения плана производства, что развивает существующие подходы к мультиагентному моделированию в контексте оперативного планирования производства.

В рамках разработки мультиагентной модели планирования производственных процессов было выполнено следующее:

- 1) **Предложена архитектура мультиагентной среды**, определена ролевая модель и как результат формализован протокол взаимодействия агентов. Протокол представлен в Таблице 2.

Таблица 2 - Протокол взаимодействия агентов

Событие	Инициатор	Получатель	Действие инициатора	Действие получателя
Начало новой смены	Агент ресурса	Доска	Информирование о появлении нового агента в системе	Регистрация нового агента и добавление информации об агенте в необходимые структуры данных
Появление в системе нового заказа	Агент заказа	Доска	Информирование о появлении нового агента в системе	Регистрация нового агента и добавление информации об агенте в необходимые структуры данных
Запрос на бронирование	Агент заказа	Агент ресурса	Запрос на бронирование заданного интервала времени	Ответ с возможностью бронирования, стоимостью и необходимым депозитом
Подтверждение бронирования	Агент заказа	Агент ресурса	Подтверждение или отказ от условий бронирования	Временное бронирование на указанный период
Фиксация интервала	Агент заказа	Агент ресурса	Сигнал о выкупе интервала, внесение остатка ДС	Проверка, фиксация и пометка интервала как занятого
Отказ от бронирования	Агент заказа	Агент ресурса	Сигнал об отказе	Учет депозита, освобождение интервала
Запрос на переуступку интервала	Агент заказа	Агент заказа	Запрос переуступки с указанием интересующего интервала	Проверка возможности переуступки, расчет депозита и стоимости
Подтверждение бронирования	Агент заказа	Агент заказа	Подтверждение или отказ от условий переуступки	Временное бронирование, освобождение текущего интервала
Фиксация интервала	Агент заказа	Агент заказа	Сигнал о выкупе интервала	Проверка, фиксация и пометка интервала как занятого
Отказ от бронирования	Агент заказа	Агент заказа	Сигнал об отказе	Учет депозита, освобождение интервала
Уведомление о невозможности выполнения операции	Агент ресурса	Агент заказа	Уведомление с указанием операции	Поиск нового размещения

- 2) **Разработана архитектура агента заказа** и необходимые для ее обслуживания алгоритмы. Время существования агента в системе можно разделить на 3 этапа:

- Появление нового заказа и его первичное планирование
- Оптимизация текущего бронирования, взаимодействие с другими агентами и доской
- Фиксация результатов работы агента после наступления времени работ

Агент появляется в системе в тот момент, когда появляется новый заказ. Агент взаимодействует с доской с целью первичного планирования технологических операций, определенных согласно технологическому процессу производства изделия, для реализации заказа с учетом его параметров и ограничений. После первичного планирования агент переходит в режим поиска более оптимального размещения технологических операций, а также находится в состоянии ожидания поступления уведомлений, например о невозможности выполнить подконтрольную технологическую операцию или запроса другого агента заказа о возможности осуществить перебронирование с получением премии. После наступления срока сдачи заказа агент заказа информируется доской об успешной реализации заказа, фиксирует результаты своей деятельности и уничтожается.

Ключевыми навыками агента заказа в рамках модели являются следующие:

- Способность искать удовлетворяющий заданным ограничениям маршрут и улучшать его в будущем
- Способность договариваться с другими агентами заказа о возможности перебронирования.

Для удовлетворения данных требований была разработана архитектура агента заказа и набор алгоритмов, позволяющих осуществлять поиск новых размещений для технологических операций в рамках заказа. Совокупность свободных временных интервалов рабочего центра на каждом из технологических этапов формирует множество возможных вариантов планирования заказа или маршрутов. Представим множество возможностей в виде направленного ациклического графа (V^n, C^n) , где вершинами являются временные интервалы, в рамках которых возможно выполнить заданную технологическую операцию определенного этапа, а ребрами – связи между ними. Количество уровней вершин соответствует количеству технологических операций в рамках технологического процесса, а количество вершин внутри одного уровня – множеству возможностей для реализации определенной операции. Требуется из множества возможностей найти такой технологический маршрут, при котором (2):

$$\Phi = \sum_{k=1}^m w_k \cdot C_k - w_B \cdot B \rightarrow \max \quad (2)$$

При ограничениях (3, 4):

$$\sum_{k=1}^m w_k + w_B = 1 \quad (3)$$

$$B \geq \sum_{i=0}^i D_i + e \quad (4)$$

Где Φ – целевая функция, m – количество критериев эффективности, w_k – вес k -го критерия эффективности, C_k – k -ый критерий эффективности, w_B – вес при учете свободного бюджета агента в целевой функции, B – текущий бюджет агента. Критерии, принимающие участие в целевой функции, могут быть различными, с учетом особенностей производства. Каждый критерий должен быть нормализован, то есть приведен к задаче максимизации (для случаев, когда критерий по своей природе минимизируется) путем обратного преобразования или линейного преобразования.

Ограничения:

1. Сумма весов критериев и веса влияния бюджета на целевую функцию должны равняться единице (5)

$$\sum_{k=1}^m w_k + w_B = 1 \quad (5)$$

2. Текущий бюджет агента должен быть больше, чем сумма всех сделанных депозитов при бронировании интервалов времени с учетом минимального резервного бюджета e (6)

$$B \geq \sum_{i=0}^i D_i + e \quad (6)$$

Данную задачу можно представить как задачу поиска оптимального пути на взвешенном графе, где вершинами являются временные интервалы рабочих центров (на которых размещаются операции), ребрами – допустимые согласно технологическому процессу связи между интервалами, а весами ребер является локальная оценка при переходе от i операции к последующей k -ой операции. Особенности данной задачи в указанной постановке являются следующие факторы:

- 1) Граф может иметь большое количество вершин, что затрудняет поиск, используя алгоритмы, основанные на последовательном переборе вершин.
- 2) Длина маршрута заказа характеризуется множеством критериев эффективности
- 3) Веса ребер заранее не определены, что связано с большим количеством вычислений, необходимых для их установления.
- 4) Вследствие многокритериальности задачи не существует одного “лучшего” маршрута

Для решения поставленной задачи предложен подход, основанный на многокритериальном принятии решений на базе подготовленных данных. Агент заказа характеризуется собственным жизненным циклом и представляется множеством возможных состояний агента в момент времени t , определяемым следующим перечислением: $\{new; optimizes, sleep\}$. Каждый из элементов перечисления представляет собой текущий статус агента. В момент появления агент имеет статус *new*. После осуществления первичного бронирования (с использованием GRASP или без него) операций агент переходит в статус *optimizes*. После превышения заданного количества попыток проведения оптимизации текущего размещения агент переходит в состояние *sleep*. Каждое действие агента инициируется доской. В рамках определения действия происходит определение текущего состояния и действия, которые необходимо выполнить в рамках текущей итерации. При нахождении агентом в состоянии *optimizes* выполняется поиск нового размещения агента, которое соотносится с базисным. Поиск нового размещения заключается

в запуске основного алгоритма поиска маршрута реализации заказа со сдвинутой датой старта первичной операции в рамках технологического процесса. Значительно укрупненная схема работы агента заказа представлена на Рисунке 5. Полная схема представлена в диссертации в приложении Д.

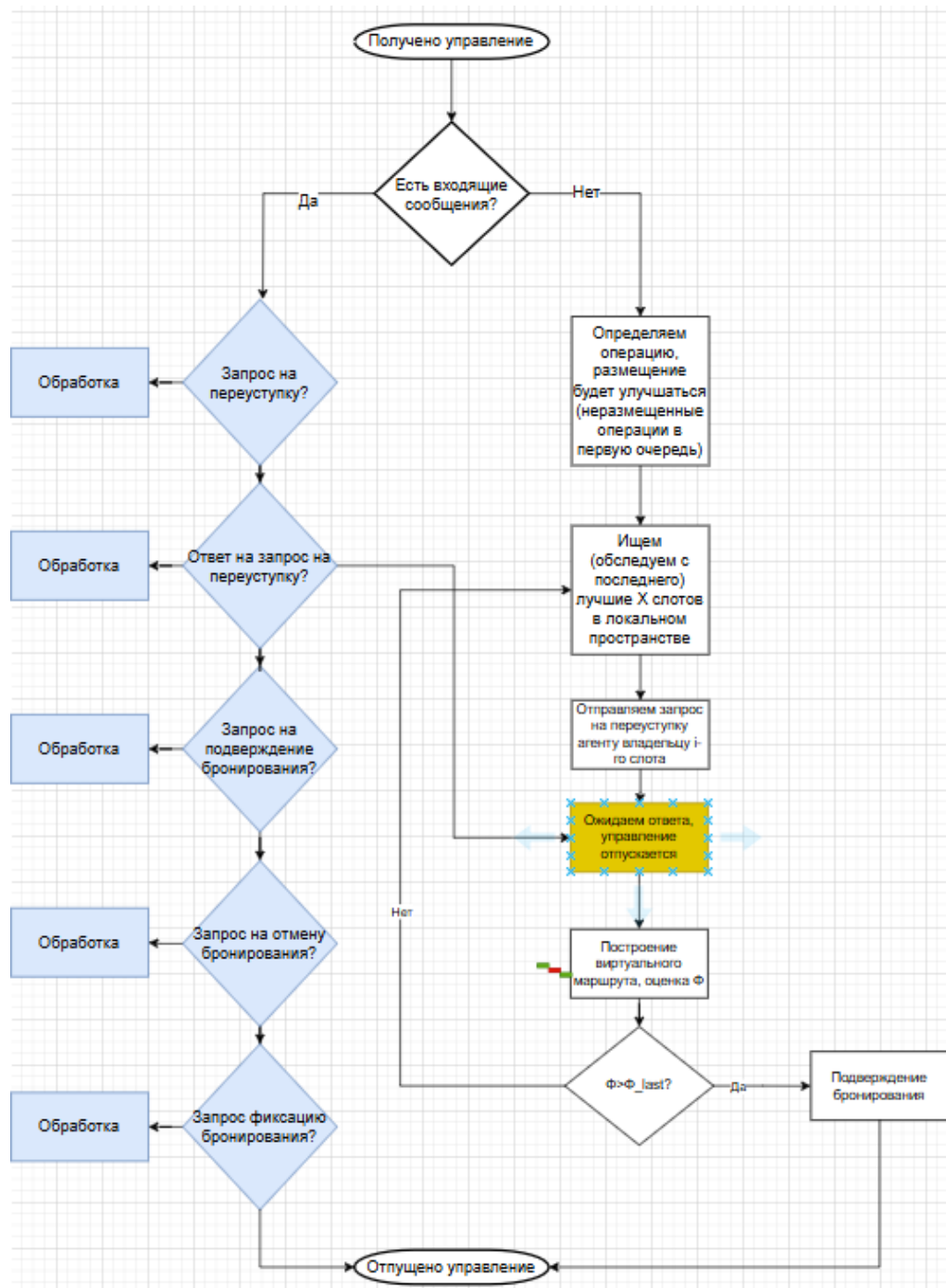


Рисунок 5 – Укрупненная схема работы агента заказа

Предложен алгоритм улучшения маршрута реализации заказа агентом, в рамках которого предлагается подход с определением списков ограниченного количества лучших кандидатов по независимым критериям и выбором таких кандидатов, которые встречаются в наибольшем количестве списков одновременно. Укрупненная схема работы алгоритма представлена на Рисунке 6.

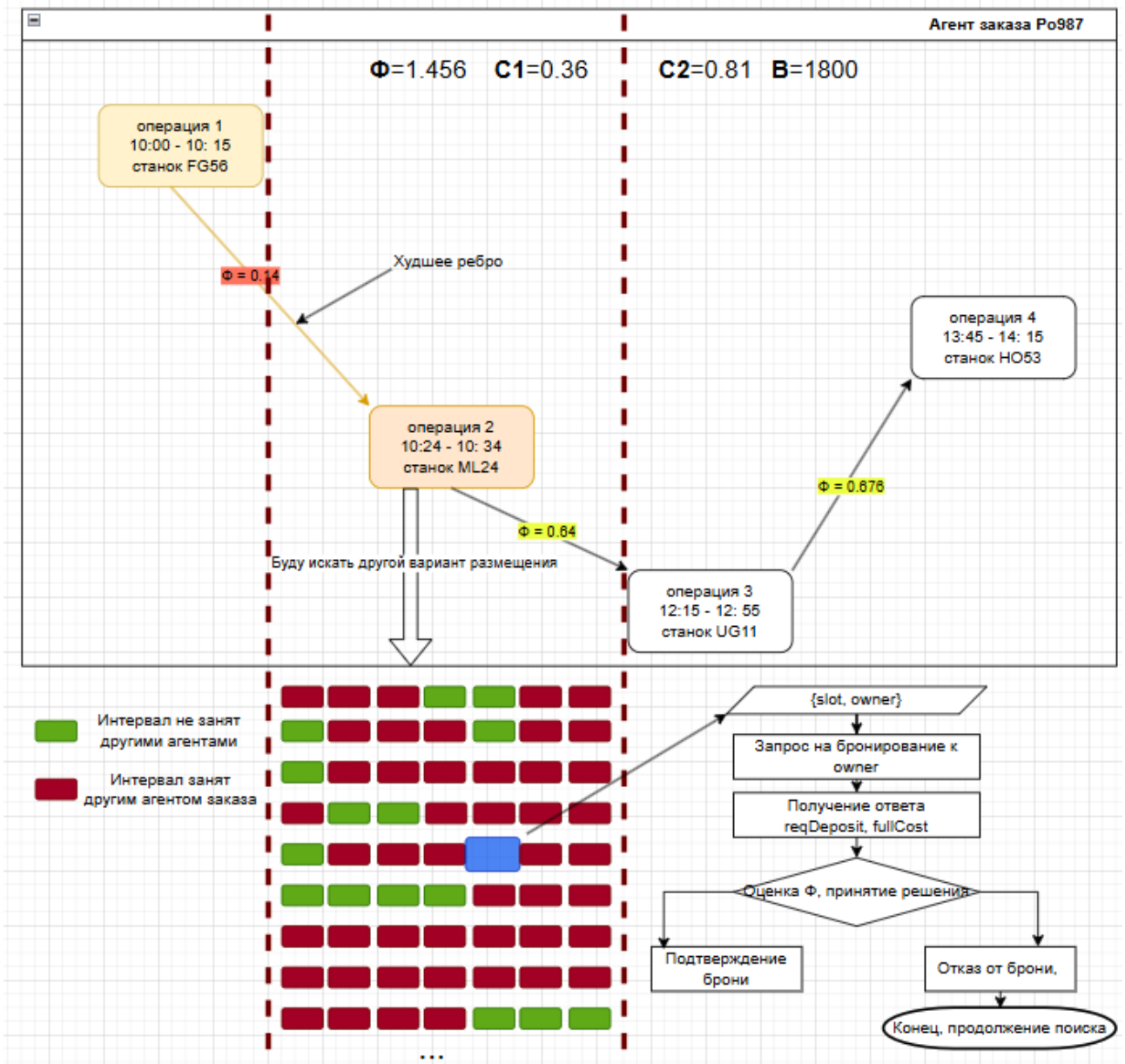


Рисунок 6 – Укрупненная схема работы алгоритма по поиску улучшенных вариантов размещения

Укрупненно алгоритм выглядит следующим образом. Дано:

- Множество вариантов $V = \{V1, V2, \dots, VK\}$.
- Критерии $C = \{C1, C2, \dots, CM\}$, где для каждого Ci определена функция оценки $fi: V \rightarrow R$.
- Для каждого Ci подготовлена структура данных, позволяющая извлекать топ- N вариантов за $O(1)$, $O(N)$, $O(N^2)$.
- Начальная глубина $N0$, максимальная глубина $Nmax$, шаг расширения Δ .

Цель: найти эффективное по набору критериев подмножество слотов

1. Берём топ- N вариантов по каждому критерию.
2. Ищем пересечения — варианты, которые есть во всех топах.

- Если есть хотя бы один общий вариант — запоминаем его.
- 3. Если пересечений нет — увеличиваем N (например, с $N=10$ до $N=15$) и повторяем.
- 4. Если даже при $N = N_{\max}$ пересечений нет, считаем, сколько раз каждый вариант попадал в топы.
- 5. Выбираем варианты с максимальным числом попаданий.

Ключевым аспектом алгоритма является поиск заданного количества вариантов на основе подготовленных данных. Критерий эффективности описывается в виде базового класса *Criteria* с одним публичным методом, осуществляющим выборку наиболее эффективных слотов, на которых можно было бы разместить текущую оптимизируемую операцию взамен текущего слота.

```

Тип Criteria = {
    метод GetTopN(
        V: Множество<ScheduleSlot>,
        n: N,
        left:  $\mathbb{R}^+$ ,
        right:  $\mathbb{R}^+$ 
    ) → Множество<ScheduleSlot>
}

```

Одним из ключевых знаний агента заказа является методика расчета депозита при обработке запроса на переуступку. Размер депозита рассчитывается следующим образом (7,8):

$$Dep_{order} = D_b \cdot \left(1 + \beta \cdot S(t) + \lambda \cdot \frac{D_l}{B} \right) \quad (7)$$

$$S(t) = 1 + \frac{1}{1 + e^{-\theta(t-t_0)}} \quad (8)$$

Где, D_b – размер базового депозита, $\beta \cdot S(t)$ – оценка временного риска, $\lambda \cdot \frac{D_l}{B}$ – бюджетные обязательства агента, β -коэффициент временного риска, θ – крутизна сигмоиды, t_0 – временная отметка точки перегиба, t – текущее время, λ – коэффициент бюджетных обязательств. $S(t)$ представляет собой настраиваемую сигмоиду, определяющую степень роста стоимости депозита по мере приближения ко критической временной отметке (близость текущего времени ко времени начала операции).

Переговорный процесс агентов заказов представлен на Рисунке 7.

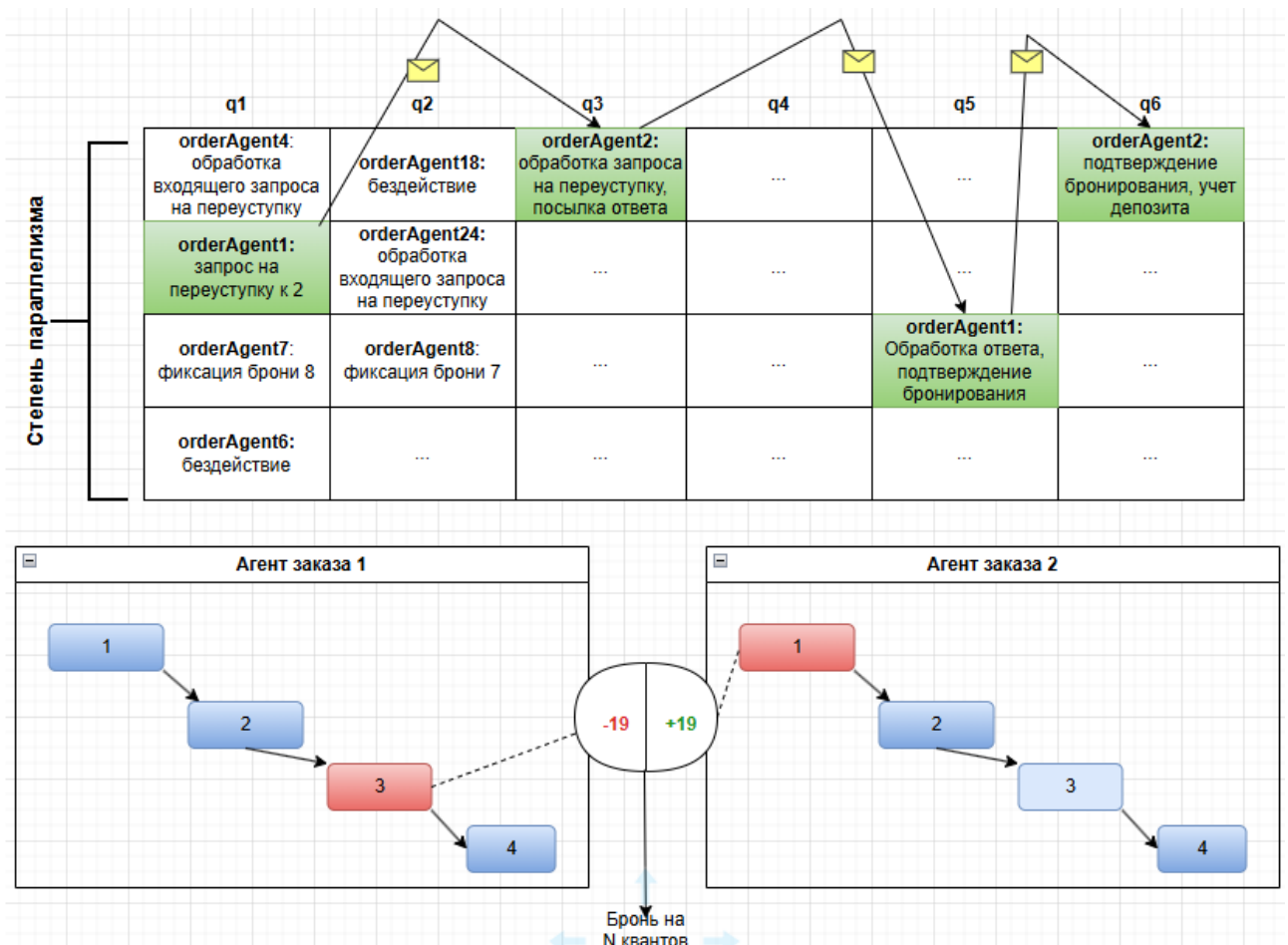


Рисунок 7 – Пример переговоров двух агентов как процесс

3) Разработана архитектура агента ресурса и алгоритм расчета стоимости выполнения операции.

Предложена архитектура агента ресурса и его жизненный цикл, который заключается в следующем: агент ресурса появляется в системе в момент, когда вводится новый ресурс. Ресурсом может являться оборудование или человек в случае, если операция требует ручного труда. Каждый агент ресурса характеризуется сменностью, производительностью, горизонтом планирования и себестоимостью работ. Производительностью ресурса является возможность выполнять определенное количество операций за определенное количество времени. Сменность подразумевает определение интервалов времени, в рамках которых агент может осуществлять полезную работу. Каждый ресурс обладает знанием о себестоимости минимального интервала времени, который можно реализовать. В общем виде алгоритм обработки нового запроса на бронирование слота агента ресурса выглядит следующим образом:

Входные данные: интервал времени: {StartTime, EndTime}, Время бронирования ValidThru, тип операции O_{type} .

- 1) Определяем возможность выполнения операции на интервале от StartTime до EndTime:

- a. Если запрашиваемый промежуток времени занят или частично занят – отвечаем nil с указанием агента, занимающего слот.
- b. Иначе – переходим в пункт 2.

2) Определяем стоимость выполнения операции O_{type} :

Определяем базовую P_b стоимость продажи слота и размер требуемого депозита (9, 10, 11).

$$P_b = \sum_{i=1}^n (o_i^{costPerMin}) \quad (9)$$

$$P_{res}(i) = P_b \cdot e^{-\alpha \cdot \frac{i-1}{N}} \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{d_i}{w}\right) \cdot (1 + \gamma U) + R \quad (10)$$

$$D_{res}(i) = P_{res}(i) \cdot \theta \quad (11)$$

Где P_b – базовая стоимость слота с учетом постоянных затрат, $P_{res}(i)$ – скорректированная цена с учетом условий конкретного момента, $D_{res}(i)$ – размер депозита, определяемый как доля θ от $P_{res}(i)$, i – номер слота, N – общее количество слотов, α – коэффициент временного затухания, β – коэффициент локальной плотности, w – размер окрестности, d_i – занятые слоты в окрестности w , γ – коэффициент глобальной загрузки, U – доля занятых слотов, R – стоимость переналадки.

Пояснение учитываемых компонентов при расчете депозита:

- Стоимость слота снижается по мере его удаления от текущего момента времени с заданной скоростью α (12)

$$e^{-\alpha \cdot \frac{i-1}{N}} \quad (12)$$

- Стоимость слота растет, если в окрестности есть другие занятые слоты. β характеризует степень влияния плотности на стоимость (13)

$$1 + \beta \cdot \frac{d_i}{w} \quad (13)$$

- Стоимость слота растет с общим ростом количества занятых слотов на ресурсе. γ характеризует степень влияния отношения занятых слотов к свободным на стоимость (14)

$$1 + \gamma U \quad (14)$$

Выходные данные: $P_{res}(i)$, $D_{res}(i)$, ValidThru

На Рисунке 8 визуальна представлена динамика изменения стоимости продажи слота во времени в двух разных конфигурациях. Укрупненный алгоритм агента ресурса представлен на Рисунке 9.

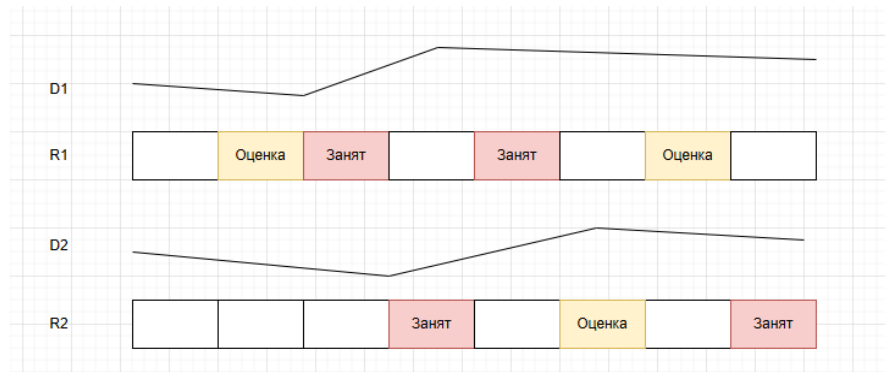


Рисунок 8 – Динамика изменения стоимости депозита в зависимости от загрузки ресурса

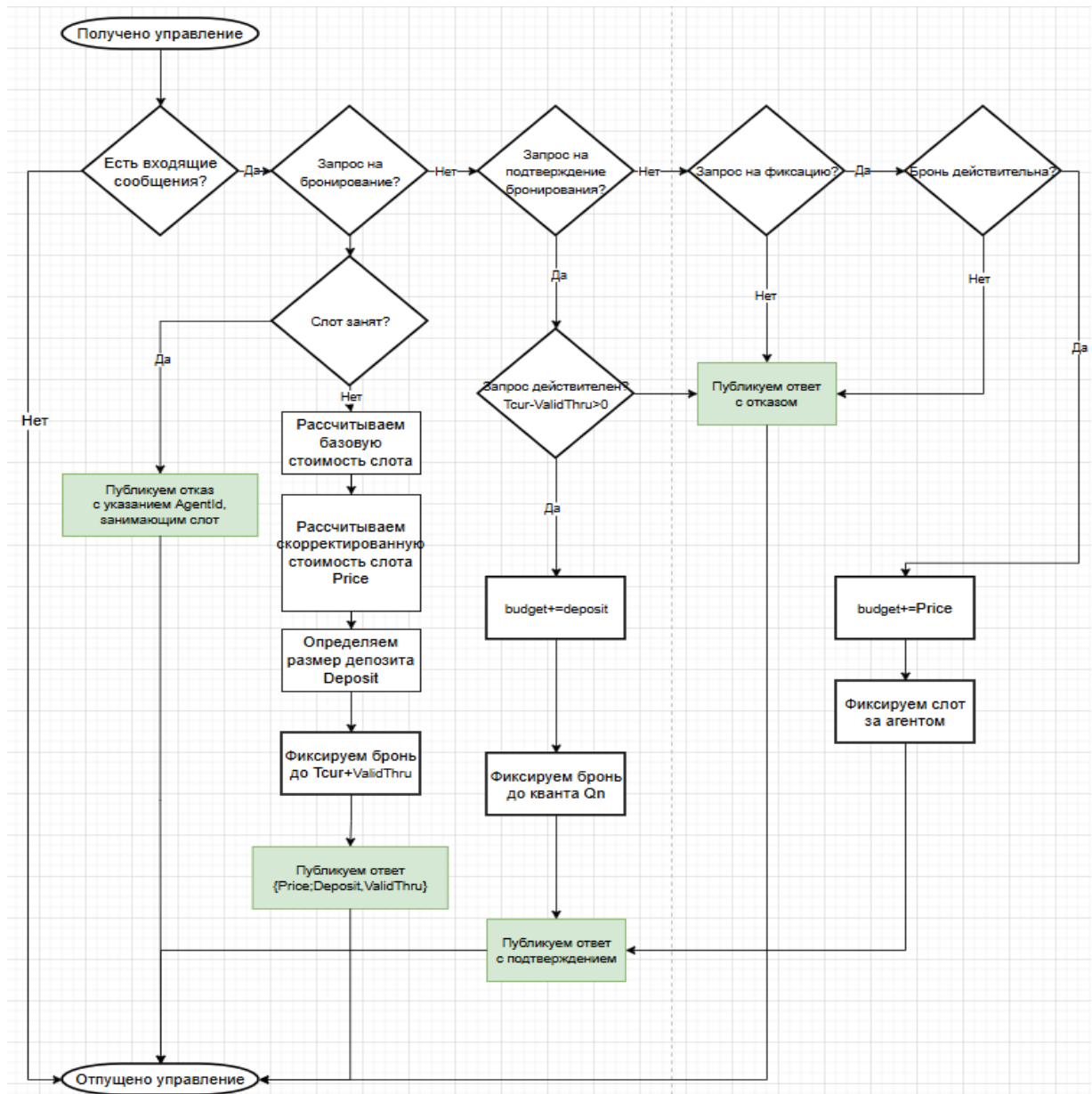


Рисунок 9 – Алгоритм работы агента ресурса

4) Предложена архитектура метаагента: управляющий модуль “Доска”.

Доска является центральным механизмом координации в предложенной агентной системе, обеспечивая хранение сообщений между агентами, учет состояния агентов и правила определения тех агентов, которые должны выполнять полезную работу при учете динамически изменяющихся условий. Для возможности достижения равновесного состояния в системе при работе со множеством агентов предложена следующая модель. Дано:

$\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ - множество агентов, $\mathcal{N} = \{n_1, n_2, \dots, n_K\}$ - множество нод, на которых могут работать агенты, $T \in R^+$ - длительность одного кванта времени.

Каждый агент характеризуется следующими состояниями: $Q_t(a) \in N_0$ - длина очереди сообщений, $\tau_t(a) \in R^+$ - время с момента последней активности, $s_t(a) \in \{0,1\}$ – статус агента, свободен или занят.

Требуется с учетом состояния и загруженности каждого из агентов осуществлять предоставление квантов времени для выполнения полезной работы. Выбор агентов осуществляется путем их разделения на подмножества (15, 16, 17):

$$\mathcal{A}_i = \{a \in \mathcal{A} \mid a \text{ прикреплен к } n_i\} \quad (15)$$

$$\mathcal{A}_i^+ = \{a \in \mathcal{A}_i \mid Q_t(a) > 0 \wedge s_t(a) = 0\} \quad (16)$$

$$\mathcal{A}_i^- = \{a \in \mathcal{A}_i \mid Q_t(a) = 0 \wedge s_t(a) = 0\} \quad (17)$$

Где $\mathcal{A}_i^+$ - агенты, с непустой очередью сообщений. $\mathcal{A}_i^-$ - агенты с пустой очередью сообщений, давно не получавшие управления. Оператор выбора агентов из одной ноды представляется следующим образом (18):

$$\mathcal{C}_i = \text{select}(X, m, f) = \operatorname{argmax}_{a \in S} f(x) \quad (18)$$

Где:

- X - множество агентов в рамках одной ноды
- m - количество агентов для выбора, целое число
- $f(x)$ - функция-ключ, которая каждому элементу $x \in X$ ставит в соответствие числовое значение (например, длину очереди $Q_t(a)$ или время ожидания $\tau_t(a)$).

Оператор выбирает подмножество $a \in S$ размера m , которое максимизирует сумму значений функции $f(x)$ на элементах этого подмножества. При этом выбор осуществляется с учетом следующих квот (19, 20):

$$m_1 = \lceil \alpha \cdot \Phi(n_i) \rceil \quad (19)$$

$$m_2 = \Phi(n_i) - m_1 \quad (20)$$

Где:

- $\Phi(n_i)$ — максимальное число агентов, которое нода n_i может обработать за один квант времени

- α — параметр системы ($0 \leq \alpha \leq 1$), задающий долю квоты, выделяемую агентам с сообщениями
- m_1 — количество слотов для агентов с сообщениями.
- m_2 — количество слотов для агентов, которые давно не работали

При этом список всех агентов на всех нодах, которые получают управление на следующем шаге, определяется как (21):

$$\mathcal{A}_t^* = \bigcup_{n_i \in \mathcal{N}} \mathcal{C}_i \quad \text{при} \quad |\mathcal{A}_t^*| \leq \sum_{n_i \in \mathcal{N}} \Phi(n_i) \quad (21)$$

Где $\mathcal{C}_i$ — оператор выбора агентов на ноде n_i , $\mathcal{A}_t^*$ - список агентов со всех нод, которые получают управление. Графически процесс выбора агентов представлен на Рисунке 10.

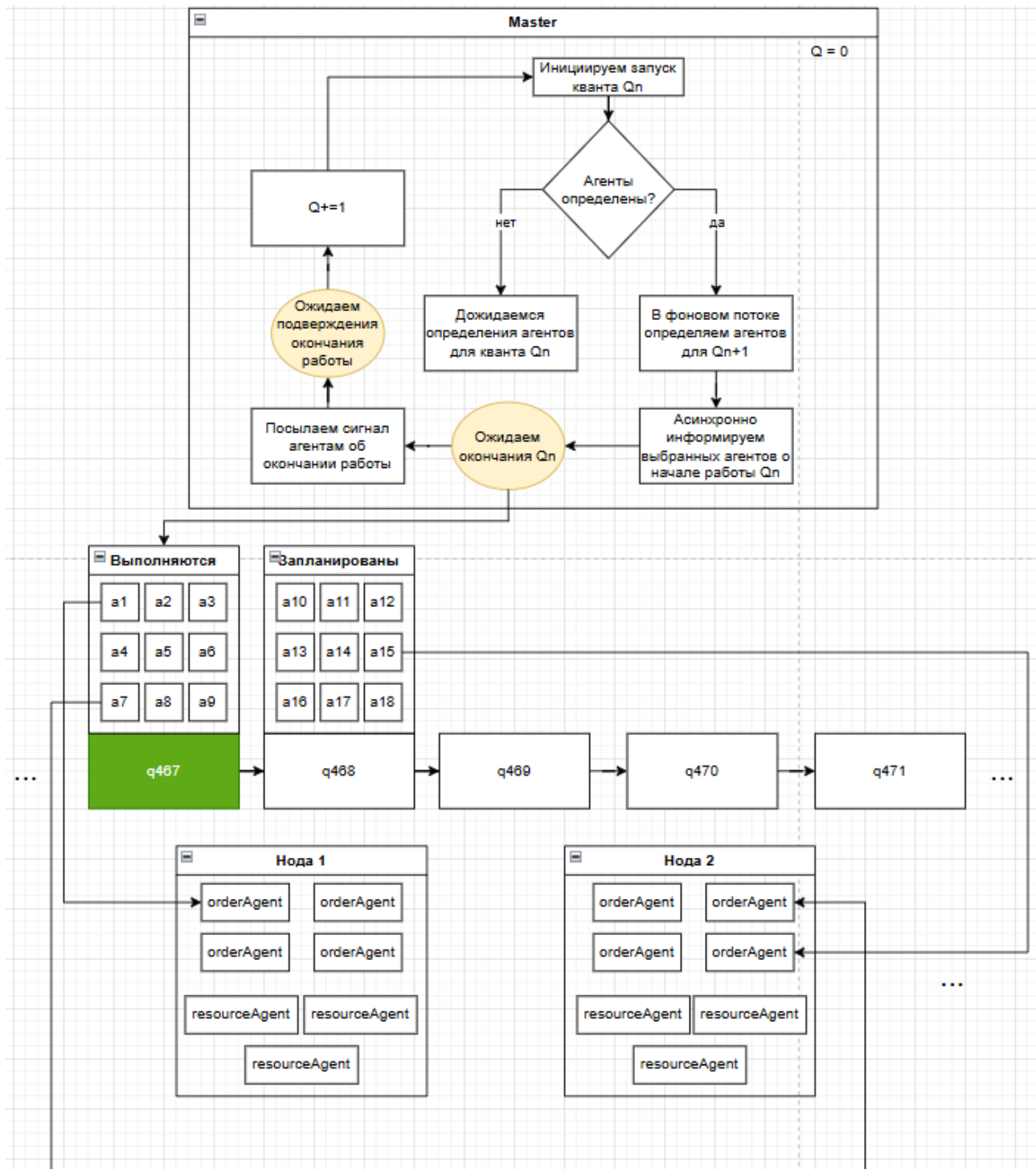


Рисунок 10 – Выбор агентов для осуществления полезной работы

Квант времени T — это фиксированный временной интервал, в течение которого выбранные агенты выполняют полезную работу. Формально определяется как кортеж (22):

$$T = \langle \Delta t, A_T, \Psi_T \rangle \quad (22)$$

где:

1. $\Delta t \in R^+$ — длительность кванта (в миллисекундах).

2. $A_T \subseteq A$ — множество агентов, выделенных для выполнения в данном кванте, где $|A_T| \leq \sum_{n_i \in N} \Phi(n_i)$
3. $\Psi_T: A_T \rightarrow \{0,1\}$ — функция прерывания:
 - $\Psi_T(a) = 1$, если агент a не завершил работу за Δt .
 - $\Psi_T(a) = 0$, если агент завершил обработку вовремя.

Свойства кванта определены в диссертации. Система использует квантирование, где каждый квант времени выделяется для выполнения атомарных операций агентов. Это позволяет моделировать конкурентное выполнение задач в псевдореальном времени, сохраняя предсказуемость состояний. Нода управляет локальным пулом агентов, распределяя кванты времени в соответствии с приоритетами и степенью параллелизма. При этом глобальная синхронизация тактов между нодами не требуется благодаря асинхронной природе коммуникации через брокера сообщений, что обеспечивает масштабируемость системы. Графически работа с брокером сообщений представлена на Рисунке 11.

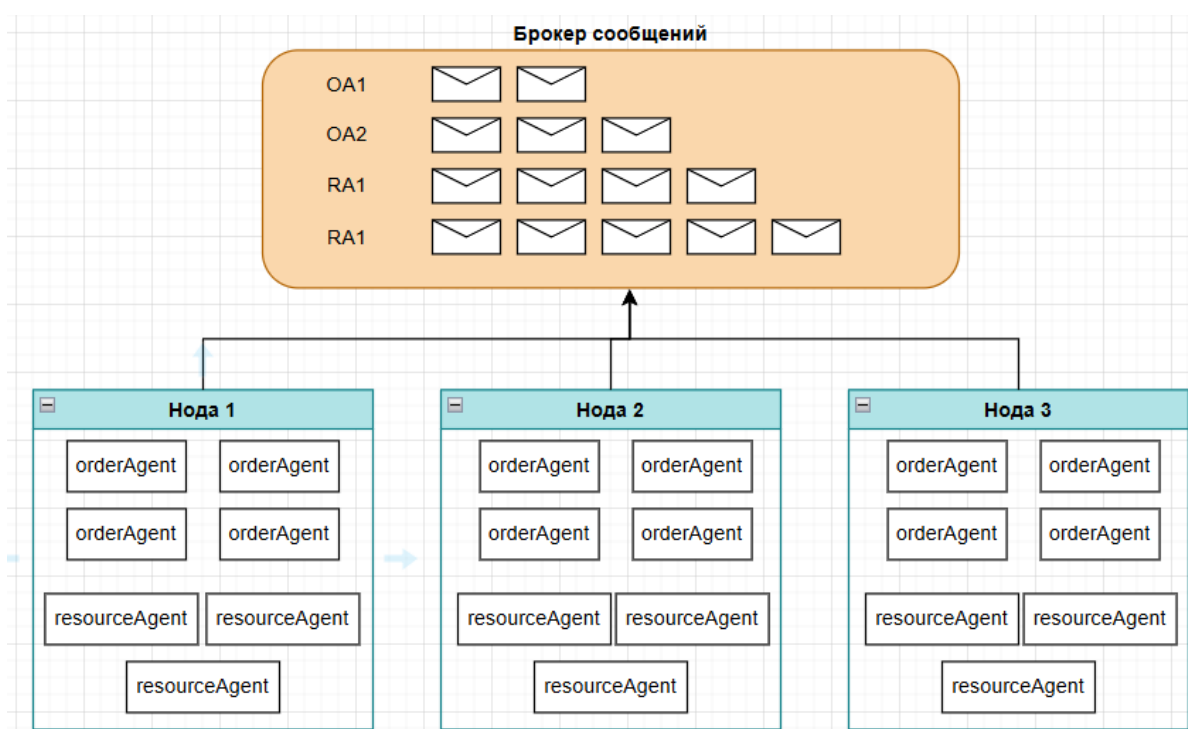


Рисунок 11 – Схема работы агентов с брокером сообщений

4. Предложена концептуальная модель системы поддержки принятия решений на базе мультиагентной модели планирования производственных процессов, совершенствующая существующие подходы к разработке СППР для промышленных предприятий

На базе мультиагентной модели, предложена концептуальная система поддержки принятия решений (СППР) для операторов ПДО (планово-диспетчерские отделы). Под понятием СППР понимается совокупность процедур, которая обеспечивает ЛПР (лицо,

принимающее решения) необходимой информацией и рекомендациями, позволяющими осуществлять аналитические операции при осуществлении оперативного планирования производства, включая следующие:

- Определять максимальное количество заказов, которые можно произвести за заданный промежуток времени при заданном количестве рабочих центров, максимизируя прибыль или(и) минимизируя издержки.
- Определять факт возможности производства заказа при заданных ограничениях
- Определять группу рискованных заказов (критерий, определяющий рискованность заказов, определяется оператором)
- Корректировать получаемые расписания путем локальных изменений

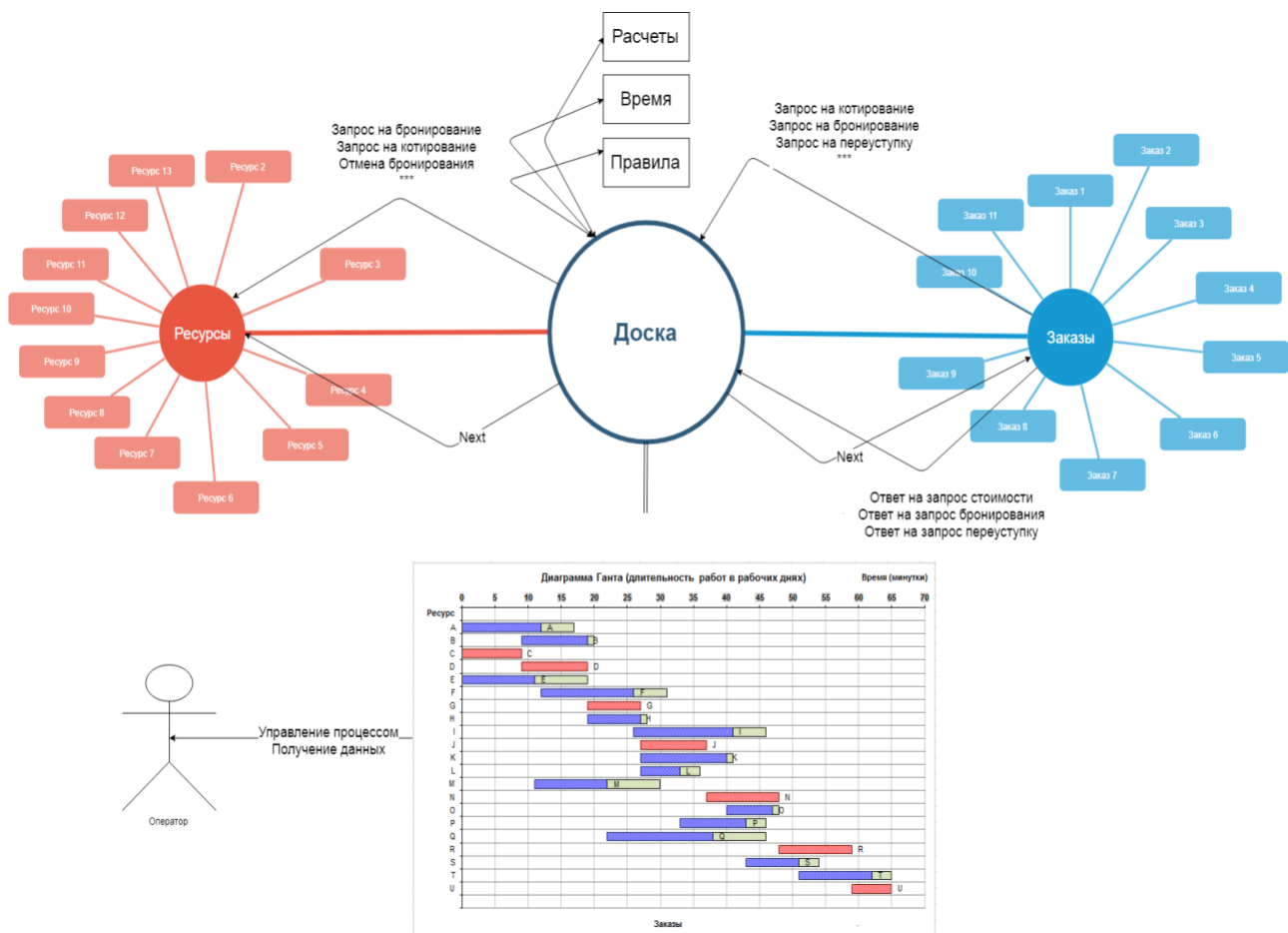


Рисунок 12 - Концептуальная модель СППР

На Рисунке 12 представлено графическое представление концептуальной модели СППР, определяющее ее место в системе. Оператор ПДО с использованием предлагаемой концептуальной СППР (при условии ее промышленной реализации) имеет возможность осуществлять аналитические операции над полученным из мультиагентной модели расписанием, осуществляя множество изменений над ним. После внесения изменений полученное расписание можно зафиксировать или создать независимую ветку, в рамках которой будет осуществляться независимое управление. На Рисунке 13 представлен рабочий инструмент оператора ПДО в рамках СППР – диаграмма Ганта, визуализирующая распределение операций заказов по рабочим центрам.

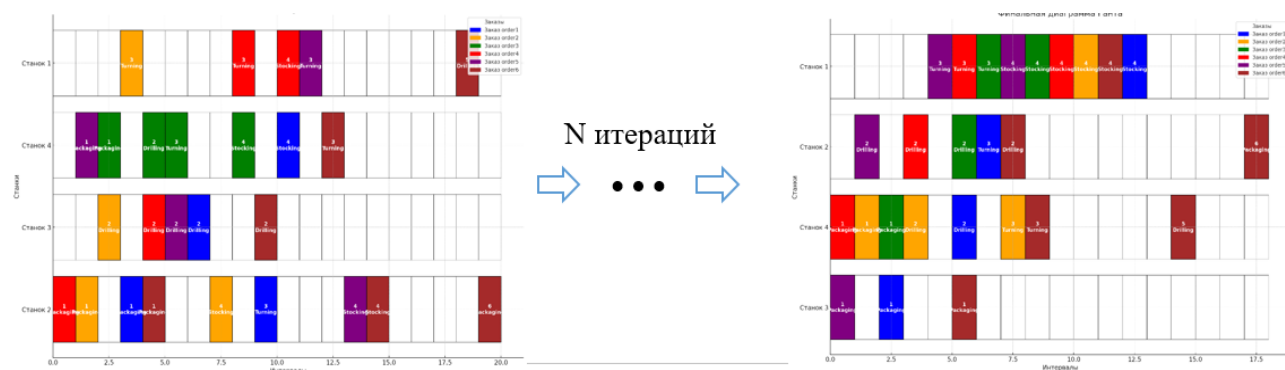


Рисунок 13 - Диаграмма Ганта с запланированными операциями по рабочим центрам

5. Предложен подход к минимизации затрат единичных, серийных и дискретных производств за счет снижения количества операций переналадки, основанный на комплексе авторских методов и моделей, позволяющий снизить себестоимость выпускаемых изделий, а также увеличить ритмичность производства.

В современных условиях для производств, где ключевыми факторами конкурентоспособности являются гибкость, скорость реагирования на изменения спроса и минимизация издержек, оптимизация процессов переналадки оборудования приобретает особую значимость. Переналадка, будучи необходимым этапом при переходе от производства одного вида продукции к другому, связана с временными и ресурсными затратами, которые напрямую влияют на производительность и экономическую эффективность предприятия.

Для демонстрации результатов разработанного решения на базе предложенной модели, было проведено несколько моделирований по планированию группы заказов на примере механического цеха. В Таблице 3 представлены технологические процессы производства, используемые для генерации заказов, которые требуется запланировать.

Таблица 3 - Технологические процессы производства

Деталь А		Деталь В		Деталь С	
Наименование операции	Номер операции	Наименование операции	Номер операции	Наименование операции	Номер операции
Токарная	005	Подрезная	005	Отрезная	005
Расточная	010	Сверлильная	010	Фрезерная	010
Расточная	015	Сверлильная	015	Фрезерная	015
Фрезерная	020	Зенкервальная	020	Токарная	020
Фрезерная	025	Токарная	025	Токарная	025
Сверлильная	030	Протяжная	030	Токарная	030
Сверлильная	035	Протяжная	035	Токарная	035
Шлифовальная	040	Токарная	040	Резьбонарезная	040
Шлифовальная	045	Токарная	045	Резьбонарезная	045

Деталь А		Деталь В		Деталь С	
Шлифовальная	050	Шлифовальная	050	Токарная	050

Алгоритм моделирования:

- Создаем по 5 заказов на производство по каждому типу изделия.
- Отправляем созданные заказы в компонент: “Доска”, который создает агентов под каждый заказ
- Получаем базисное расписание с помощью GRASP алгоритма и запускаем процесс взаимодействия агентов с целью дальнейшей оптимизации расписания.
- Получаем расписание в виде диаграммы Ганта

Стоимость наладки в матрице переналадки выбрана одинаковой для любого перехода и равна 5 р. в мин. Время операции переналадки также установлено статичным, равным 5 минутам. Результаты планирования продемонстрированы на Рисунке 14 и Рисунке 15.

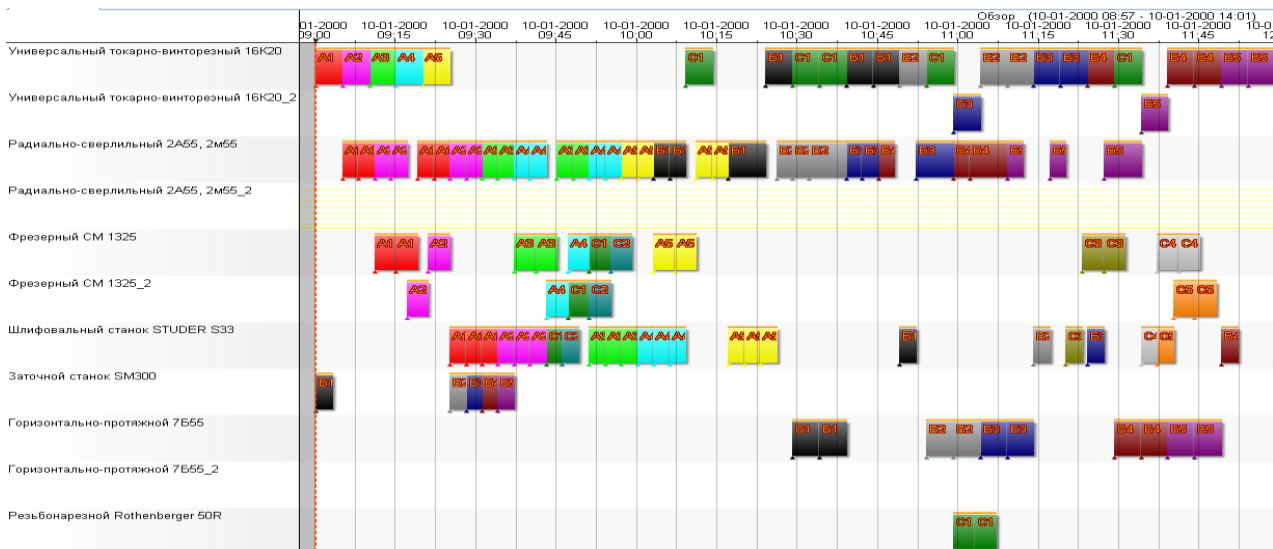


Рисунок 14 - Диаграмма Ганта: 14 запланированных заказов методом последовательного размещения

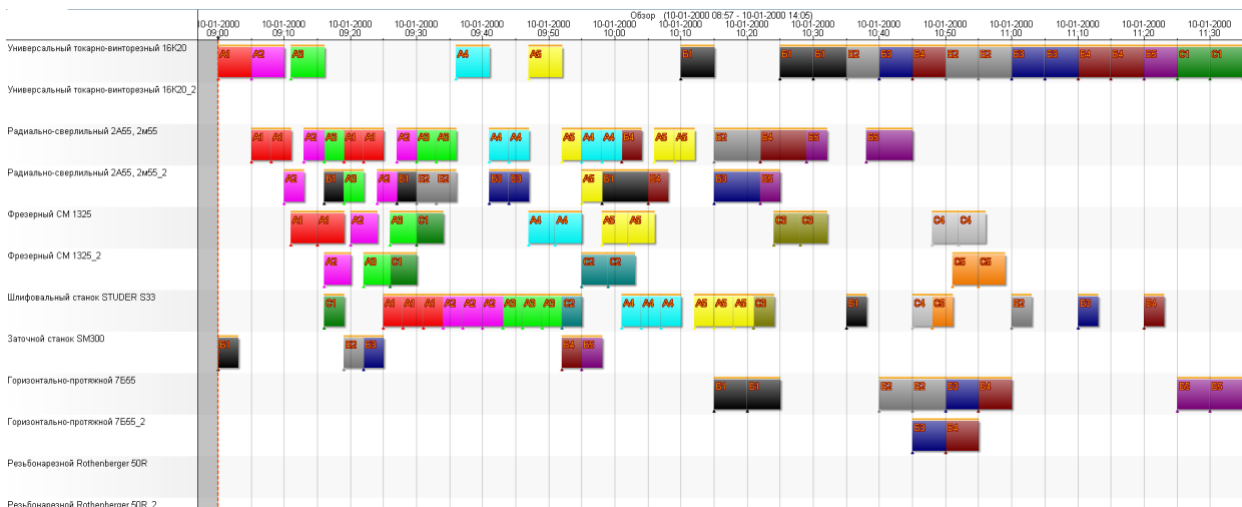


Рисунок 15 - Диаграмма Ганта: 15 запланированных заказов, используя мультиагентную модель

Расписание, полученное при помощи применения предложенной мультиагентной модели и алгоритма GRASP, снижает суммарную стоимость переналадки более чем в 2 раза, однако, время реализации последнего заказа при этом сдвинуто на 22 минуты, что связано с разным распределением операций и поиском таких сочетаний, которые минимизируют переналадку. Экономический эффект для рассмотренного механического цеха выражается в следующем:

- Суммарное время, затрачиваемое на переналадку, уменьшилось с 240 до 105 минут, что позволяет высвободить ресурсы оборудования и персонала.
- Суммарная стоимость операций переналадки сократилась с 1200 до 525 рублей.
- Количество операций переналадки сократилось на 56 %, что свидетельствует о более эффективном распределении операций между рабочими центрами.

III. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ)

Поставленная в диссертационной работе цель достигнута, задачи, направленные на ее реализацию, успешно решены. На основании проведенного исследования установлено, что задача построения производственного расписания в условиях сложной структуры производства представляет значительную вычислительную сложность, что делает применение точных методов оптимизации затруднительным, в связи с чем предложены иные подходы к ее решению. В работе были решены следующие задачи:

Задача 1: исследовать существующие методы решения задачи оперативного планирования производства, провести их сравнительный анализ и предложить комбинированный подход, обеспечивающий баланс между вычислительной сложностью и качеством получаемых расписаний в соответствии с заданными критериями оптимальности.

Проведен критический анализ классических подходов к управлению ресурсами. Выявлено, что мультиагентный подход позволяет обеспечить более высокий уровень адаптивности к динамическим изменениям, но требует более сложной архитектуры и настройки. В отличие от централизованных систем, МАС обеспечивают распределенное принятие решений, что снижает вычислительную нагрузку и повышает устойчивость. Также определено, что метаэвристический алгоритм GRASP демонстрирует наилучший баланс между временной вычислительной сложностью и качеством получаемых производственных расписаний. Алгоритм был адаптирован под производственную специфику.

Задача 2: исследовать современные методы проектирования мультиагентных систем, провести их сравнительный анализ и предложить подход к проектированию, учитывающий специфику задач оперативного планирования и диспетчирования производства.

Проведена систематизация методов проектирования МАС, на основе которой предложен гибридный подход для диспетчирования производства, включающий в себя формализованные переговорные механизмы между агентами, унифицированную систему оценки решений, адаптивные стратегии поиска решений агентами заказов. Предложена гибридная архитектура интеллектуальных агентов: уточнены методы анализа внутреннего состояния, принятия решений и оценки их эффективности.

Задача 3: разработать мультиагентную модель планирования заказов для производственных предприятий непоточного типа, направленную на повышение их

экономической эффективности за счет усовершенствованного управления портфелем заказов и производственными ресурсами в сравнении с традиционными методами.

Разработана мультиагентная модель, отличительными особенностями которой является сниженное количество переговоров между агентами за счет введения в модель понятия двустороннего депозита, а также возможность в сжатые сроки осуществлять поиск допустимых решений, основываясь на подготовленных данных в разрезе определенных критериев эффективности. Также был предложен подход к планированию и приоритизации задач между множеством агентов, учитывая их состояния и приоритеты системы.

Задача 4: разработать конструктивные методы и алгоритмы мультиагентного моделирования производственных процессов, минимизирующие избыточную коммуникацию агентов, совершенствующие подходы к принятию решений агентами и оптимизирующие распределение вычислительных ресурсов между агентами для обеспечения устойчивых состояний моделируемой системы.

Предложены конструктивные алгоритмы и методы, включая:

- модифицированный алгоритм GRASP для поиска базисных расписаний
- алгоритмы переговорного взаимодействия между агентами в рамках MAC
- алгоритмы принятий решений агентами заказов и ресурсов
- метод распределения задач между агентами в высококонкурентной среде

Задача 5: разработать концептуальную модель системы поддержки принятия решений на базе мультиагентной модели планирования заказов на производствах непоточного типа

Предложена концептуальная модель системы поддержки принятия решений, которая обеспечивает оперативный доступ к расписанию, поддерживает динамическое управление расписанием, интегрирует мультиагентный подход и алгоритм GRASP для повышения качества решений.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности их применения промышленными предприятиями серийного, дискретного и единичного типов производств, характеризующихся сложной структурой, разнообразием технологических процессов и высокими требованиями к управлению заказами. Применение мультиагентного подхода в совокупности с метаэвристическим алгоритмом GRASP расширяет возможности автоматизированного управления производством. Внедрение предложенных алгоритмов, моделей и методов по мнению автора позволит построить ограниченную цифровую модель производственных процессов, что обеспечивает возможность оперативно и в сжатые сроки реагировать на нештатные ситуации, такие как появление новых заказов или отказ оборудования. Учитывая адаптивность и достаточную вычислительную эффективность разработанных алгоритмов, данные решения могут быть рекомендованы для дальнейшей практической апробации с целью валидации и оптимизации в промышленной среде.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка методов моделирования поведения отдельных агентов, поскольку интеллектуальные характеристики системы в целом определяются уровнем интеллектуальности каждого агента. Особый интерес представляет применение методов теории вероятностей, в частности нечетких вероятностных пространств, для прогнозирования устойчивых ценовых диапазонов, обеспечивающих стабильность агентов ко внешним воздействиям. Другим направлением для исследований является применение графовых нейронных сетей для агентного моделирования, так как они могут позволить выявлять паттерны взаимодействий агентов, улучшая предсказательную

способность моделей и обеспечивая более реалистичное представление коллективного поведения.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в журналах из перечня ВАК:

1. Никитин Н. С. Мультиагентные технологии в планировании производства: особенности и преимущества использования // Инновации и инвестиции. 2017. № 5. С. 206–211
2. Никитин Н. С. Применение мультиагентных систем в бизнесе // Инновации и инвестиции. 2017. № 8. С. 30–33
3. Никитин Н. С., Унгвари Л. Введение в использование графовых нейронных сетей в мультиагентных системах для оперативного планирования производства // Глобальный научный потенциал. 2025. № 8 (166). С. 224–228
4. Никитин Н. С., Ильин И. В., Дубгорн А.С. Задача распределения операций по рабочим центрам: современные подходы к минимизации затрат и повышению эффективности в условиях ограниченных ресурсов // Sustainable Development and Engineering Economics. 2024. № 4. С. 10–25
5. Никитин Н. С., Ильин И. В., Воронова О. В. Моделирование процесса управления ресурсным обеспечением ИТ-проектов интегрированных торговых систем на основе агентных моделей //Международный научный журнал. 2025. № 1 (101), С. 28–39

Статьи в других изданиях:

1. Никитин Н. С. История научных исследований в области автоматизации производства // Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки. 2019. № 1. С. 390–393
2. Nikolai Nikitin, Igor Ilin. Features and benefits of multi-agent technology in production planning. Proceedings of the 35th International Business Information Management Association (IBIMA) Conference. 2020. С. 18619-18643.
3. Bakhtizin, A., Ilin, I., Nikitin, N., Ershova, A., Esser, M. Multi-agent Approach in Planning and Scheduling of Production as Part of a Complex Architectural Solution at the Enterprise. 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, 387, pp. 369-380.