Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Ларюхин Владимир Борисович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МНОГОУРОВНЕВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Скобелев Петр Олегович

Самара – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ КРУПНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 16
1.1 Проблемы управления ресурсами производственных предприятий 16
1.2 Проблемы планирования предприятий, производящих ВТИ 23
1.3 Формализация процессов управления ресурсами предприятия ВТИ 30
1.4 Многоуровневая система управления ресурсами предприятий 35
1.5 Обзор существующих подходов к управлению сложными многоуровневыми системами управления ресурсами 42
1.6 Выводы 63
2 ПРЕДЛАГАЕМЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ 65
2.1 Основные принципы сетевого подхода к созданию автономных интеллектуальных систем управления ресурсами 65
2.2 Постановка задачи распределенного управления ресурсами 71
2.3 Метод решения задачи распределенного управления ресурсами 86
2.4 Функции и протоколы взаимодействия АИС 88
2.5 Логика работы АИС для поддержки протоколов 98
2.6 Выводы 100
3 РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ АИС 102
3.1 Автономная интеллектуальная система 102
3.2 Понятие цифровой экосистемы АИС для распределенного управления ресурсами 107
3.3 Функции и архитектура цифровой экосистемы АИС для распределенного управления ресурсами 110
3.4 Основные классы агентов цифровой экосистемы АИС 115
3.5 Структура планов и схема их согласования в АИС подразделения 120
3.6 Выводы 122

4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ АИС 124
4.1 Методика экспериментальных исследований 124
4.2 Исследование производительности 130
4.3 Выводы 133
5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ 134
5.1 Управление ГОЗ проектами НИОКР в МАК «ВЫМПЕЛ» 134
5.2 Управление ресурсами цехов агрегатной и окончательной сборки самолетов МС-21 в АО «ИРКУТ» 136
5.3 Управление эксплуатацией инфраструктуры в «ЦУП-ЦНИИМАШ» 142
5.4 Управления кооперацией электротехнических предприятий 145
5.5 Выводы 149
6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ 151
7 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 154
8 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 156
ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ «МАК ВЫМПЕЛ» 170
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ» 173
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ ПАО «ЯКОВЛЕВ» 174
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В АО «ЦУП ЦНИИМАШ» 177
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ МИНПРОМТОРГ РФ 179
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ 180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

Управление крупными предприятиями по разработке, производству и эксплуатации сложных высокотехнологичных изделий (ВТИ), таких как локомотивы, самолеты или космические аппараты и их системы, должно отвечать новым вызовам последнего времени. Актуальность данной проблемы рассматривается в работах [3, 25].

Прежде всего, растущая сложность, неопределенность и динамика изменений спроса и предложений, требуют от предприятий оперативной и гибкой реакции на изменения рынка, что обусловлено наложенными санкциями, стремлением к импортозамещению и так далее.

Традиционный ответ управленцев на растущую сложность и неопределенность – задержка реакции на события для поиска вариантов решений, привлечение дополнительных производственных, финансовых и других ресурсов, прием на работу новых менеджеров и иные меры, которые еще более повышают расходы и снижают эффективность, конкурентоспособность и устойчивость развития предприятий. При этом многие известные продукты компаний SAP, IBM, Oracle, Microsoft, 1С и ряда других ориентированы, в первую очередь, на работу в стабильных условиях и решение задач учета, и потому не имеют средств и возможностей для гибкого планирования ресурсов и поддержки принятия решений. Более того, часть из поставщиков указанных продуктов уже не работает в России, что делает рассматриваемую проблему еще более актуальной, т.е. требуется не просто замена устаревших систем, а поиск принципиально новых подходов.

Для решения рассматриваемой проблемы ранее было предложено создание интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий (ИСУР), автоматизирующих рутинную работу менеджеров в задачах управления, связанную с ежедневным распределением, планированием, оптимизацией, мониторингом и контролем ресурсов. Как показано в работах [2, 46, 68, 75, 99, 102],

развитие автономности ИСУР в принятии решений ведет к формированию нового класса «цифровых двойников» предприятий, построенных как автономные интеллектуальные системы (АИС), сочетающих планирование ресурсов предприятия и его моделирование с мониторингом и контролем факта на уровне детализации до каждого сотрудника и каждой задачи или операции, что позволяет автоматически адаптивно перестраивать планы в реальном времени.

Однако, известные на сегодня ИСУР демонстрируют сравнительно малые по своему масштабу применения, например, управление проектами в департаменте информационных технологий из 50-ти инженеров [20], парком грузовиков в 500 машин, цехом крупного предприятия из 150-ти рабочих [115], группировкой из 15 малых космических аппаратов [116] и т.д. Расширение разработанного похода на АИС кардинально большего масштаба, например, для конструкторского бюро, включающего 20 научных центров в среднем по 250 инженеров или для завода с 30 цехами, включающими по 300 рабочих каждый, и, тем более, создание АИС отраслевого масштаба для построения цепочек кооперации предприятий, представляет собой сложную задачу, решение которой в рамках одной централизованной АИС не представляется возможным.

В этой связи представляется перспективным переход к распределенным АИС, реализация которых может быть предложена на основе сетевого подхода в теории управления, получившего развитие в последние годы [25]. Этот подход отвечает объектам управления, элементы которых приобретают все большую автономность в принятии решений. Примерами таких объектов могут служить производственные, транспортные, вычислительные, энергетические и другие сети. Предметом исследований при этом становятся задачи совместной коллективной или групповой деятельности автономных систем с постепенным развитием методов и средств их коллективных взаимодействий для согласования решений, сопряжения планов действий и синхронизации результатов ради общей цели.

К данному направлению исследований могут быть отнесены работы в области теории активных систем для управления организациями [5], разработки сетецентрических систем и различных «роевых» группировок беспилотных

аппаратов [19], использования рыночных механизмов для мультиагентного решения задач распределения ресурсов, планирования и оптимизации [100] и теории аукционо-подобных схем сетевого взаимодействия [97]. Однако, задачи разработки методов и средств построения многоуровневых АИС для управления ресурсами крупных предприятий, в которых требуется сетевое взаимодействие для согласования планов подразделений или подрядчиков, задействованных в разработке, производстве и эксплуатации ВТИ, до настоящего времени остаются нерешенными. Решение этих задач позволит многократно расширить масштабы применения АИС и обеспечить их высокую оперативность и гибкость, производительность, масштабируемость и надежность, что и определяет актуальность работы для практики и ее научную значимость.

Объектом исследования являются процессы управления ресурсами крупных предприятий, работающих в области управления проектами, производства и эксплуатации ВТИ.

Предметом исследования являются методы и средства поддержки принятия решений по формированию, согласованию и контролю исполнения многоуровневых производственных планов предприятий.

Целью диссертационного исследования является разработка методов и средств многоуровневого сетевого взаимодействия АИС для управления ресурсами предприятий по разработке, производству и эксплуатации ВТИ.

Для достижения поставленной цели диссертационного необходимо решить ряд следующих задач:

1. Выполнить системный анализ процессов многоуровневого управления ресурсами предприятий по разработке, производству и эксплуатации ВТИ.
2. Разработать метод сопряженного многоуровневого взаимодействия в сети АИС укрупненного и оперативного уровней предприятия, пригодный для построения согласованных планов масштаба подразделения предприятия, предприятия в целом и цепочек кооперации предприятий.
3. Разработать схему построения, функции и архитектуру многоуровневой АИС на основе сетецентрической платформы, обеспечивающей

сопряжение укрупненного плана предприятия и оперативных планов его подразделений при возникновении событий рассогласования указанных планов в реальном времени.

4. Разработать программное обеспечение АИС и создать базовую многоуровневую АИС для управления ресурсами предприятий ВТИ, а также управления цепочками кооперации предприятий.

5. Провести экспериментальное исследование разработанных методов и средств АИС для оценки их реализуемости, преимуществ и ограничений.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы методы системного анализа, сетевой теории управления, методы исследования операций и теории расписаний, модели и методы построения сетей потребностей и возможностей, теория множеств, методы формализованного представления знаний для поддержки принятия решений, теория аукционов и средства моделирования.

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированной методологии системного анализа и исследования операций, сравнением получаемых результатов экспериментальных исследований с результатами применения традиционных методов и средств, моделированием процессов построения многоуровневых планов для различных потоках событий, а также практическим применением разработанного программного обеспечения при решении разнородных задач, включая управление проектами, производством и эксплуатацией ВТИ.

Научная новизна. В диссертации получены новые научные результаты:

1. Впервые поставлена задача многоуровневого сопряженного управления ресурсами при производстве ВТИ и предложен сетевой подход к рациональному ее решению, в котором, в отличие от традиционного каскадного подхода к планированию «сверху-вниз», укрупненные планы предприятия и оперативные планы его подразделений или подрядчиков формируются одновременно в общей сети АИС и синхронизируются по событиям с учетом интересов, предпочтений и ограничений всех участников с целью минимизации

расхождений между планами и выполнения заказов ВТИ в требуемые бюджеты и сроки.

2. Разработан не имеющий аналогов метод сопряженных взаимодействий для сети АИС укрупненного планирования ресурсов предприятия и АИС оперативного управления подразделениями, отличающийся применением аукционо-подобных вертикальных (центр-подразделение) и горизонтальных (подразделение-подразделение) протоколов переговоров АИС и обеспечивающий согласованное принятие решений по динамической корректировке планов в случае возникновения незапланированных событий, приводящих к рассинхронизации планов подразделений.

3. Предложена новая схема построения многоуровневой цифровой экосистемы АИС на основе сетецентрической платформы, определены ее функции и разработана архитектура, обеспечивающая реализацию метода сопряженных взаимодействий АИС и позволяющая обеспечить возможность масштабирования АИС от уровня подразделений предприятия – до уровня АИС отраслевых цепочек кооперации предприятий.

4. Разработано программное обеспечение цифровых экосистем АИС различного назначения, которое, в отличие от существующих программных систем, обеспечивают синхронизацию планов подразделений предприятий для выполнения заказов в бюджеты и сроки.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории сетевого управления для создания цифровых экосистем АИС, заключающейся в разработке новых моделей и методов, а также протоколов взаимодействия АИС, которые применяются для решения задач управления ресурсами крупных предприятий.

Практическая значимость работы связана с тем, что разработанные модели и методы, равно как и разработанное программное обеспечение, будут применимы для различных отраслей промышленности, обеспечивая возможность существенно повысить эффективность использования ресурсов предприятий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод решения многоуровневой и многокритериальной задачи управления ресурсами предприятий по выпуску ВТИ, который основывается на теории сетевого управления и включает протоколы вертикально-горизонтальной синхронизации укрупненных планов предприятия и оперативных планов его подразделений для поиска согласованных решений с целью гарантированного создания ВТИ в заданные бюджеты и сроки.

2. Методика построения, функции и архитектура многоуровневой цифровой экосистемы АИС, формируемой на основе сетецентрической платформы, обеспечивающей поддержку протоколов сопряженных вертикальных и горизонтальных взаимодействий АИС для выработки и согласования принимаемых решений, синхронизации укрупненных планов предприятия и оперативных планов его подразделений, масштабируемых от подразделений – до отраслевых цепочек АИС предприятий.

3. Программное обеспечение (продукты и компоненты) многоуровневой экосистемы АИС, которое нашло применение в задачах управления ресурсами при создании, производстве и эксплуатации ВТИ и для поддержки кооперации предприятий для различных отраслей промышленности и масштабов предприятий.

Работа выполнялась в рамках финансируемых прикладных научных исследований и грантов:

- Проект Минобрнауки РФ № 14.578.21.0137 «Разработка моделей, методов и алгоритмов построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению ресурсами в проектах разработки, производства и эксплуатации сложных изделий ракетно-космической техники»;
- Проект Минпромторга РФ №020-11-2019-1084 «Отраслевая многофункциональная сетецентрическая платформа для управления ресурсами предприятий электротехнической промышленности на базе мультиагентных систем «SmartEnterprise» в концепции Industry 5.0»;
- Проект РФФИ «Аспирант», 20-37-90052 «Разработка моделей, методов и алгоритмов построения экосистем умных сервисов «дополненного интеллекта»

для адаптивного планирования, оптимизации и контроля использования ресурсов производственных предприятий».

Апробация работы. Основные положения и научные результаты исследований докладывались на следующих научно-технических конференциях:

- Конференция «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018)», Санкт-Петербург (2018);
- XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва (2019);
- XII всероссийская мультиконференция по проблемам управления, Геленджик (2019);
- International Symposiumon Intelligent Distributed Computing IDC, Saint-Petersburg (2019); XII International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Malta (2020);
- XXI международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара (2020);
- 13 международная конференция интеллектуализация обработки информации (ИОИ-13), Москва (2020);
- XVI-я Всероссийская Мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2023), Волгоград (2023).

Полностью результаты работы докладывались на научном семинаре кафедры «Электронные системы и информационная безопасность» Самарского государственного технического университета (руководитель, Скобелев П.О., 2021-2022 гг.), на научном семинаре кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета (руководитель профессор Радченко В.П., 2023 г.).

Основные публикации: По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, из них 4 – в журналах, рекомендованных ВАК и включенных в базы данных Scopus и WoS, 2 в журналах, рекомендованных ВАК, 1 – в изданиях, индексируемых в Scopus и WoS, 3 – в трудах международных и всероссийских конференций.

Получено 5 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ, из них 2 системы включены в Реестр отечественного ПО.

Внедрение. Результаты диссертационной работы были получены в процессе выполнения проектов разработки программного обеспечения на предприятиях ООО «НПК «Разумные Решения», ООО «НПК «Сетецентрические платформы», НАО «Группа компаний «Генезис знаний», что позволило внедрить разработанные АИС для следующих заказчиков:

1. Для предприятий космической и авиационной промышленности созданы и внедрены АИС-Проекты, АИС-Производство и АИС-Эксплуатация:
   - АИС-Проекты: управление проектами НИОКР для АО «РКК «Энергия» и АО «Международная корпорация «ВЫМПЕЛ» (три акта внедрения приведены в приложении А и Б диссертационной работы);
   - АИС-Производство: управление агрегатно-сборочным производством самолета МС-21 для ПАО «Яковлев» (два акта внедрения приведены в приложении В диссертационной работы);
   - АИС-Эксплуатация: управление эксплуатацией ИТ инфраструктурой для АО «ЦУП-ЦНИИМАШ» (два акта внедрения приведены в приложении Г диссертационной работы).
2. Создан прототип цифровой экосистемы АИС для управления цепочками кооперации предприятий электротехнической отрасли (акт внедрения приведен в приложении Д диссертационной работы).

Кроме того, результаты работы внедрены в учебный процесс в рамках курса «Эмерджентный интеллект» на кафедре «Вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Личный вклад аспиранта. В публикациях, выполненных в соавторстве, лично автору принадлежат следующие результаты: в [25] представлены задача, разработанные методы и средства, результаты разработок и исследований; в [3] показана значимость работ в создания цифровых экосистем АИС; в [11,13] – разработан состав сервисов сетецентрической платформы; в [14] разработан

онтологически настраиваемый мультиагентный подход для управления ресурсами; в [20] разработаны методы и средства создания интеллектуальных систем управления ресурсами в проектах НИОКР; в [60] предложены методики построения многоуровневой цифровой экосистемы АИС предприятий; в [66] разработаны способы создания сетецентрической платформы АИС для управления ресурсами предприятий; в [104] предложены протоколы вертикально-горизонтальных взаимодействий АИС для согласования планов подразделений предприятий; в [76] разработана структура построения базовой интеллектуальной системы, применимой для управления проектами, производством и эксплуатацией ВТИ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 116 источников. Текст занимает 169 страницы основной части, содержит 33 рисунка, 7 таблиц и 6 приложений объемом 10 страниц.

Краткое содержание работы.

В **первой главе** рассмотрена задача управления ресурсами крупных производственных предприятий и показаны недостатки существующих методов и ограничения классических ERP- и MES-систем. Рассмотрены вызовы для крупных предприятий при производстве нового самолета МС-21 в ПАО «Яковлев», в управлении проектами НИОКР в РКК «Энергия» и МАК «Вымпел», при эксплуатации инфраструктуры ЦУП-ЦНИИМАШ. В результате проведенного системного анализа формализован процесс управления ресурсами предприятий ВТИ. Показаны проблемы управления ресурсами предприятий в существующих системах класса PLM, ERP и MES.

Предложен распределенный подход к многоуровневому управлению ресурсами предприятий.

Проведен обзор литературных источников, посвящённых современным методам и средствам решения задач управления ресурсами, теории акционо-подобных схем сетевого взаимодействия и сетецентрических систем.

Проанализированы представленные в работах Агаева Р.П., Амелиной Н.О., Буркова В.Н., Виттиха В.А., Гермейера Ю.Б., Граничина О.Н., Городецкого В.И., Джапарова Б.А., Каляева И.А., Кондратьева В.В., Лазарева А.А., Новикова Д.А., Проскурникова А.В., Сонина К.И., Скобелева П.О, Фрадкова А.Л., Blekhman I.I., Eisenberg E., French J., Galland C., Jiao J., Leyton-Brown K., Ren W., Sandholm T., Shoham Y., Smith R., Van Brussel H. и многих других ученых модели, методы и подходы для решения задач управления в сложных системах. Делается вывод, что для решения задачи управления ресурсами предприятия требуется применение новой методологии сетевого управления, в которой осуществляется переход от оптимального управления – к достижению консенсуса и синхронизации поведения отдельных узлов сети для достижения общей цели, при этом для реализации механизма взаимодействия элементов системы целесообразно рассматривать аукционо-подобные переговоры и рыночные модели.

В этой связи в работе формулируется новая задача многоуровневого построения планов предприятия, когда укрупненный план центра предприятия должен превращаться в «заказы» для проведения аукционо-подобных переговоров и более детальной декомпозиции работ, сопряжения планов и последующего оперативного управления подразделениями, с дальнейшим развертыванием задач вниз на любую глубину. Сопряженность планов центра и подразделений предприятия должна предусматривать сочетание многоуровневых «вертикальных» (центр-подразделение) и «горизонтальных» (подразделение-подразделение) взаимодействий, обеспечивающих максимальную взаимную согласованность и синхронизацию этих планов для выполнения заказов в бюджеты и сроки. Приводится обзор существующих программных систем для управления ресурсами предприятий, показывающий, что рассматриваемые системы имеют ряд существенных ограничений, которые не позволяют решать задачи согласованного управления ресурсами эффективным образом

Во **второй главе** формулируются принципы сетевого подхода к созданию автономных интеллектуальных систем и дается формализованная постановка задачи многоуровневого сопряженного управления ресурсами крупных

промышленных предприятий, работающих по основным стадиям жизненного цикла ВТИ. Приводится формализация постановки задачи и приводится описание разработанного метода многоуровневых сопряженных взаимодействий АИС для согласованного принятия решений по управлению ресурсами предприятия.

Подробно рассматриваются протоколы вертикальных и горизонтальных взаимодействий АИС стратегического планирования и АИС оперативного управления подразделениями предприятия (АИС СП и АИС ОУ).

В **третьей главе** предлагается схема построения типовой многоуровневой цифровой экосистемы АИС для управления ресурсами на различных стадиях жизненного цикла ВТИ и дается описание ее функций и архитектуры.

Рассматриваются функции и архитектура многоуровневой цифровой экосистемы АИС. Приведено описание компонентов сетецентрической платформы для формирования цифровой экосистемы АИС, а также архитектуры и функций типовой АИС для поддержки взаимодействия согласно разработанных протоколов.

В **четвертой главе** приводится описание экспериментальных исследований разработанных методов и средств для оценки качества и эффективности решения, поставленной задачи распределенного управления ресурсами предприятия. Показывается, что распределенное решение дает выигрыш в случае, когда планируемые процессы выполняются параллельно-последовательно, что на примерах агрегатной сборки самолетов МС-21 дает выигрыш в 15-20% от общего времени расчета.

В **пятой главе** рассматриваются применения разработанных методов и средств для решения прикладных задач управления ресурсами:

— Управления проектами НИОКР в РКК «Энергия» и МАК «ВЫМПЕЛ»;
— Управления агрегатными сборками самолетов в ПАО «Яковлев»;
— Управления эксплуатацией инфраструктуры в «ЦУП-ЦНИИМАШ;
— Управления цепочками кооперации предприятий электротехнической отрасли, выполненной по проекту Минпромторга РФ.

Для каждого из приложений описаны функциональное назначение и особенности архитектуры, рассмотрены основные сценарии использования и результаты применения.

1 СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ КРУПНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В данной главе рассмотрена задача управления ресурсами крупных производственных предприятий и показаны недостатки существующих методов и средств. Рассматриваются текущие вызовы, стоящие перед предприятиями, и проводится системный анализ проблем управления, которые требуют решения. Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [14, 20, 22, 25, 34, 36].

1.1 Проблемы управления ресурсами производственных предприятий

Как отмечено в работах [11, 13, 14, 60, 78], управление ресурсами предприятия предполагает связанное решение задач организации деятельности, планирования и оптимизации ресурсов, обеспечения производственных процессов работы всем необходимым, мониторинга и контроля хода исполнения задач, а также развития предприятия.

В дальнейшем изложении в настоящей работе будут рассмотрены задачи управления ресурсами для крупных предприятий по проектированию, производству и эксплуатации высокотехнологичных изделий (ВТИ), которые работают по госконтрактам и гособоронзаказу, что привносит дополнительные сложности в управление ресурсами в части раздельного позаказного планирования и учета и накладывает ряд ограничений.

В качестве примеров таких предприятий для проведения системного анализа были выбраны «РКК «Энергия», «Иркутский Авиационный Завод», ЦУП «ЦНИИМАШ», МАК «Вымпел», НИИМА «Прогресс», а также предприятия, реализующие комплексные проекты разработки и поставки комплектного электротехнического оборудования (Таблица 1).

Проведенный системный анализ процессов управления включал изучение локальных нормативных актов и регламентов по управлению ресурсами, опросы и анкетирования руководителей структурных подразделений, ознакомление с

внедренными информационными системами для управления ресурсами, формализацию процессов управления ресурсами для выполнения госконтрактов и гособоронзаказов, выявление проблем и ограничений в применении существующих систем.

Таблица 1 – Краткая характеристика предприятий

Задача и этапы ЖЦИ	**Предприятия**	**Характеристики**
Согласованное управление группой конструкторских подразделений при разработке сложных технических изделий (Управление ресурсами в НИОКР). Этап: Проектирование	ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева» – создание и эксплуатация изделий РКТ МАК «Вымпел» – создание систем РКО НИИМА «Прогресс» – разработка новых изделий микроэлектроники	Реализуются проекты НИОКР высокой степени неопределенности и сложности. В одном проекте участвуют множество подразделений и множество сотрудников. В одном подразделении одновременно выполняется множество проектов. В проектах участвуют внешние организации, ресурсами которых напрямую управлять невозможно. Для отдельных этапов работ требуются производство и испытания.
Согласованное управление группой цехов при выпуске изделий Этап: Производство	ПАО «ИАЗ» (входит в ПАО «Яковлев») – производство и сборка самолетов	Самолет МС-21 – комплексное изделие, проходящее этап выхода в серию. Поточно-непрерывная линия сборки из 5 цехов. Одновременно собирается до 72 самолетов в год. Высокая зависимость от внешних факторов (поставки комплектующих, изменения конструкторской (КД) и технической (ТД) документации и т.д.). В процесс производства вовлечен: персонал (до 2000 рабочих и инженеров),

Задача и этапы ЖЦИ	Предприятия	Характеристики
		высокоточное оборудование (сборочные стапели), внешние поставщики (до 80% компонентов поставляется по кооперации).
Согласованное управление группой подразделений для эффективной эксплуатации технических объектов Этап: Эксплуатация	«ЦУП «ЦНИИМАШ» – управление ресурсами базового ЦУП Роскосмос	Множество космических объектов (КА, МКС), наземных объектов управления (НАКУ), сложная специализированная инфраструктура (специализированное ПО, сервера, каналы связи, средства коллективного отображения и др.). Требуется согласованное планирование задействования оборудования ЦУП для решения целевых задач и обеспечения его своевременного обслуживания персоналом. В обслуживание инфраструктуры вовлечено до 1000 специалистов.
Скоординированная и согласованная работа группы производственных предприятий при реализации комплексных проектов разработки, производства и эксплуатации комплектного электротехнического оборудования Этап: Проектирование, Производство, Эксплуатация	КомЛог – оператор платформы электротехнической промышленности. «Газпром-ГМТ», ПК «Электрум», ЭККА, Таврида, Самарский Трансформатор, и др.	Группа предприятий выполняет комплексные проекты разработки и поставки комплектной электротехнической продукции (комплектные трансформаторные подстанции и распределительные устройства). Каждое конечное изделие состоит из типовых комплектующих, но имеет уникальную конфигурацию, отвечающую требованиям проектов Заказчиков. Каждый комплексный проект Заказчика имеет множество номенклатурных позиций (конечных изделий). Комплексный проект реализуется сетью кооперации предприятий, каждое из

Задача и этапы ЖЦИ	Предприятия	Характеристики
		которых выполняет одну или несколько активностей по разработке и поставке изделий. Проекты включают работы, выполняемые различными предприятиями. Каждое предприятие одновременно выполняет множество заказов в интересах различных Заказчиков.

Управление такого рода крупными предприятиями по разработке, производству и эксплуатации сложных ВТИ встречает в последнее время ряд новых вызовов. Прежде всего, растущая сложность, неопределенность и динамика изменений спроса и предложений, требуют от предприятий оперативной и гибкой реакции на изменения рынка, что обусловлено наложенными санкциями, стремлением к импортозамещению и т.д.

В этих условиях работа рассматриваемых предприятий становится все более заказо- и проектно-ориентированной, что диктуется требованиями раздельного планирования и учета, который должен позволять уйти от котловых методов и общего пула ресурсов. Важное значение при этом приобретает решение задачи согласованного управления ресурсами подразделений при реализации производственной деятельности, т.к. в каждом заказе и проекте участвует множество подразделений. Для реализации процессов управления ресурсами важно рассматривать индивидуальные требования, ограничения и предпочтения всех заинтересованных сторон как с позиции их функций в бизнес-процессах, так и с позиции организационной структуры предприятия [36].

На примере рассмотренных предприятий и особенностей их деятельности была построена типовая структура предприятия, ведущего проекты, в том числе по государственным контрактам и государственному оборонному заказу (рисунок 1), где ключевую роль играют генеральный и главные конструкторы.

Новые проекты НИОКР, обычно реализующиеся несколько лет, разбиваются на этапы и декомпозируются на отдельные задачи с заданными трудоемкостями,

которые распределяются сначала между основными и обслуживающими подразделениями и потом доводятся до уровня сотрудников, в ходе чего фиксируются конфликты, которые разрешаются путем переговоров и взаимных уступок, т.к. различные заказы конкурируют между собой в общем пуле ресурсов. Построенный в ходе таких переговоров, многократно перестроенный и в итоге согласований производственный план принимается руководством к действию и становится законом жизни предприятия. После старта проекта каждому подразделению выдается наряд-задание из общего производственного плана, которое имеет свою трудоемкость и детализируется в подразделении до уровня задач сотрудников. По итогу работы сотрудников и подразделений результаты поднимаются раз в месяц как факт наверх для мониторинга и контроля, а также выявления и решения проблем на более высоком уровне. Невыработанные запланированные трудоемкости свидетельствуют о возникновении проблем, которые требуют принятия решений по ресурсам: переназначения задач на другие подразделения, вовлечения большего числа или более компетентных работников для усиления команды проекта, пересогласования сроков сдачи проекта с заказчиком или изменения его бюджета и так далее.

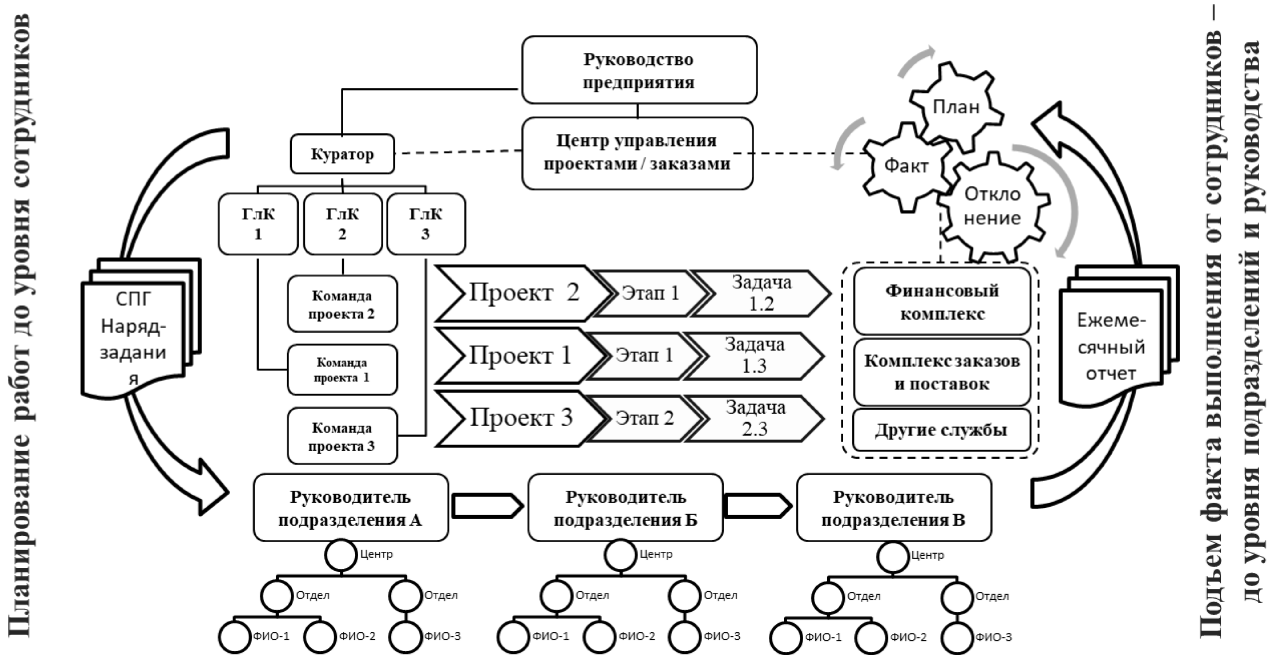


Рисунок 1 – Типовая структура и модель деятельности предприятия в проектах НИОКР ВТИ

Важнейшей особенностью планирования проектов НИОКР, равно как производства и эксплуатации ВТИ, является увязка всех работ и ресурсов с составом изделия ВТИ (схемой деления), что обычно не учитывается в существующих ERP и MES системах.

Анализ процессов управления ресурсами крупного предприятия показывает, что при этом недостаточно традиционного централизованного нахождения одного «глобально-оптимального» плана в интересах заданного центра предприятия, но требуется согласованная выработка и синхронизация по событиям множества «локально-оптимальных» планов подразделений предприятия в их взаимодействии с учетом того, что у каждого имеются свои собственные интересы, критерии принятия решений, предпочтения и ограничения.

Более того, опыт практического решения представленных выше сложных задач управления ресурсами показывает, что под «хорошим» планом следует понимать такое производственное расписание использования ресурсов, которое обеспечивает сопряжение или баланс интересов («консенсус») между участниками процессов управления в каждой конкретной ситуации, с учетом актуального для всех на этот момент состава и значений критериев, предпочтений и ограничений.

Такие собственные критерии, предпочтения и ограничения есть у заказчиков, финансистов, производственников, логистов, инженеров и рабочих, водителей и других сотрудников предприятия, для которых типичны следующие критерии:

— обеспечить качество выполнения работ;

— выполнить все заказы в срок;

— минимизировать себестоимость работ;

— минимизировать риски срыва заказов;

— обеспечить равномерность загрузки ресурсов;

— минимизировать стоимость исполнения заказов;

— гарантировать выплату зарплаты в конце месяца;

— вовремя выполнить ремонт оборудования и так далее.

Наличие участников со своими интересами делает рассмотренные задачи не только многокритериальными по своей природе, но и, по определению, конфликтными, причем одним из равных участников может быть и само предприятие («центр»), отстаивающий интересы объединенного «целого» в поиске компромисса с интересами отдельных частей.

По результату анализа задач управления рассмотренных предприятий можно сформулировать следующие особенности и ограничения, затрудняющие применение существующих методов и средств управления ресурсами:

— необходимо учитывать многочисленные особенности предметной области предприятия: заказов, задач и технологических операций, рабочих и т.д.;
— требуется обеспечивать решение задач высокой размерности пространства решений (сотни ресурсов и тысячи заказов на большой горизонт планирования);
— каждый участник имеет множество индивидуальных предпочтений, ограничений и критериев, которые могут изменяться с течением времени;
— планирование заказов редко осуществляется в пакетном режиме, но все чаще в «скользящем режиме» с наложением на исполнение уже построенных планов;
— при появлении непредвиденных событий (недоступность ресурсов или поступление новых заказов) все расписание не должно пересчитываться заново с «нуля», а требуется адаптивное перепланирование с разбором конфликтов локально;
— качество решений по управлению ресурсами зависит от момента времени и любые задержки сразу приводят к перепроизводству, простою или дефициту;
— необходимо ситуативно так балансировать интересы участников и предприятия в целом, чтобы добиться взвешенного (гармоничного) решения;
— необходимо уметь объяснить решение пользователю и дать ему возможность вмешаться в процесс планирования на любой стадии принятия решений;
— требуется обеспечить пользователю возможность интерактивно исправить только часть расписания без полного пересчета;

Таким образом, становятся необходимы интеллектуальные системы управления ресурсами предприятий нового класса, которые должны управляться целями, задаваемыми на основе критериев, предпочтений и ограничений, состав и важность которых у каждого участника могут меняться по ходу развития ситуации.

1.2 Проблемы планирования предприятий, производящих ВТИ

В ходе системного анализа процессов предприятий ВТИ был выделен общий подход для всех типов предприятий, работающих на стадиях проектирования, производства и эксплуатации ВТИ, к формированию и корректировке планов основных уровней.

Данный процесс имеет некоторые свои отличия для стадий жизненного цикла, но для данного рассмотрения наиболее важны фазы предварительного планирования заказов ВТИ и их последующего исполнения, которые были показаны в представленной выше методологии управления.

На фазе предварительного планирования в первую очередь решается задача стратегического планирования, именно, формирования программы работ на значительный горизонт времени (обычно 1-5 лет и более) для выполнения заказов от различных заказчиков и балансировки загрузки трудовых и технических ресурсов. При формировании программы работ предприятия для каждого заказа разрабатывается укрупненный сетевой план-график (СПГ) реализации (как правило поэтапный), который представляет собой набор взаимосвязанных работ, где каждой работе дана оценка трудоемкости и определены требования к техническим (оборудование, станки) и трудовым (квалификация персонала и требуемое количество специалистов) ресурсам, а также график поставок и закупок покупных частей.

Укрупненные СПГ для различного типа предприятий формируются различным способом:

— Для проектных организаций СПГ разрабатывают главные конструкторы и тематические подразделения индивидуально для каждого проекта с учетом

структуры ВТИ (схемы деления) и требуемых конечных результатов (изделий, макетов, документов, моделей и др.);

— Для производственных предприятий СПГ разрабатывается планово-диспетчерским управлением на основании типовых укрупнённых технологических процессов составных частей ВТИ путем их комплексирования в соответствии с технологической структурой изделия;

— Для эксплуатирующих организаций СПГ разрабатывается на каждое изделие и представляет собой график обслуживания изделия в целом или его составных частей на основании регламентов и правил.

Программа работ предприятия строится как совокупность таких отдельных СПГ. При этом каждый заказ имеет различные требуемые сроки начала и завершения, определенные заключенными контрактами и планами ближайших продаж, приоритеты, а также различную цену.

Программа предприятия формируется на длительный горизонт от года до пяти лет и пересматривается не реже одного раза в год, чтобы определить более детальные планы на следующий ближайший год (этап).

На этапе планирования организации обычно учитываются следующие критерии (в порядке важности):

1. Получить максимальную прибыль путем выбора наиболее подходящих заказов и минимизации затрат на производство;
2. Загрузить ресурсы предприятий, выбирая такие процессы, которые максимально равномерно загружают производственные мощности и кадровые ресурсы;
3. Сократить сроки выполнения определенных заказов за счет применения наиболее производительного оборудования или привлечения наиболее квалифицированных специалистов при увеличении числа заказов;
4. Снизить риски невыполнения заказов, связанные с новизной и сложностью изделий ВТИ или поставкой составных частей, путем добавления в расписание временных и финансовых резервов (буферов), величина которых регулируется.

План производственной программы строится итеративно, на первой фазе центр управления заказами (центр управления проектами или планово-диспетчерское управление) разрабатывает первый вариант программы, в котором графики «накладываются» друг на друга, производится расчет загрузки вовлекаемых подразделений и выявляются участки перегрузки и простоя ресурсов. Далее итеративно разрешаются ресурсные конфликты путем переноса части работ менее приоритетных заказов на более поздние / ранние периоды или изменения качества и количества вовлекаемых ресурсов (увеличения / уменьшения), что влияет на сроки и себестоимость заказа.

Кроме того, указанные выше критерии являются не только противоречивыми, но и могут по-разному применяться к разным заказам и подразделениям, например, одни заказы могут рассматриваться и планироваться как важные для обеспечения прибыли, другие важны для загрузки оборудования и персонала, третьи – могут быть инновационными и даже убыточными, но важными для привлечения новых рынков или освоения новых технологий и компетенций и т.д. Более того, сама по себе важность этих критериев может меняться в ходе работы предприятия.

Но на практике, в существующих системах планирования, такой возможности гибко управлять критериями и по-разному, индивидуально планировать каждый заказ или ресурс – нет, что заставляет плановиков и специалистов вручную дорабатывать планы, учитывая те предпочтения или ограничения, которые никак невозможно реализовать в системе. Для упрощения производственный план сначала строится и балансируется по одному из критериев, который выбирается главным, а далее дорабатывается вручную, что приводит к высокой сложности и трудоемкости процесса планирования.

Процесс стратегического планирования предприятия в целом завершается, когда весь план реализации заказов сбалансирован по прибыли, загрузке ресурсов, срокам реализации заказов и рискам.

После этого построенный план выбранными частями передается подразделениям для согласования с исполнителями путем формирования из него

частных графиков: наряд-заданий (для проектных организаций), номенклатурных планов (для производства), планов выполнения работ (для эксплуатирующих организаций).

Подразделения-исполнители принимают данный план на исполнение и производят его ресурсное планирование до фамилий сотрудников и инвентарных номеров станков или другого оборудования.

Каждая задача входящего СПГ в подразделении рассматривается как внутренний заказ. Для каждого заказа производится его декомпозиция до уровня задач нижнего уровня и собственных ресурсов. Такая декомпозиция производится на основании технологических или бизнес-процессов для заводов или экспертным образом для проектных организаций.

На уровне подразделения производится сводное ресурсное планирование путем формирования расписания для каждой операции процесса: назначаются исполнители, определяются сроки выполнения работ. При этом на уровне подразделения выделяются следующие критерии планирования (в порядке важности):

1. Минимизация отклонений от заданных сроков заказов, чтобы выполнять все работы в согласованные сроки;
2. Равномерность загрузки трудовых и технических ресурсов;
3. Максимальное развитие компетенций персонала за счет назначения на некритические задачи менее компетентных исполнителей;

В процессе формирования плана может оказаться, что часть ограничений не выполняется, тогда подразделение сначала локально изменяет параметры ресурсов: изменяется количество исполнителей (усиление), выбираются ресурсы с большей производительностью для «нагона» сроков, а также для отдельных сотрудников может быть изменен календарь работы.

В случае, если локальные изменения невозможны или не дают эффекта, руководитель подразделения проводит переговоры с потребителями результатов (другими подразделениями) для «нагона» ими конечного срока. Если проблема не

решается, должна быть инициирована процедура пересмотра стратегического плана.

При этом на уровне подразделений не стоит явная задача сокращения затрат или увеличения прибыли. Главной задачей является выполнение согласованного плана в рамках заданных сроков, бюджетов и трудоемкости, но с достижением внутренних целей – развитие персонала, создание заделов на будущие работы.

К сожалению, в ряде традиционных систем планирования этот процесс передачи планов до уровня исполнителей и построения сменно-суточных заданий рабочим или индивидуальных планов для инженеров, носит формально-механистический характер и не учитывает той специфики, которая всегда имеется «на земле», определяемой особенностями технологических процессов, оборудования, комплектующих, компетенциями специалистов и рабочих, графиками их отпусков и рядом других деталей.

А поскольку существующие системы не могут учесть эти важные детали и построить реальный производственный план каждого подразделения, то подразделения принимают план, пришедший с самого верха «под козырек» или кропотливо вручную вносят в построенный план изменения, которые могут корректировать сроки работы и т.д. Но у подразделений обычно нет возможности внести эти изменения и повлиять на стратегический план, который формируется автоматически и не предполагает коррекции. Даже если такая возможность имеется, правки должны быть внесены в стратегический план вручную, уже не в терминах плана подразделения. При этом они могут быть потеряны при очередных новых вводных при создании следующей версии стратегического плана. Подразделениям часто легче согласиться с планом, навязываемым сверху, чем вносить корректировки в стратегический и оперативный планы, поддерживая их в актуальном состоянии. Это ведет в дальнейшем к быстрому расхождению плана и факта и потере его актуальности.

Таким образом, можно сделать важный вывод, что как центру управления заказами, так и каждому подразделению-исполнителю необходима своя система адаптивного планирования, которая бы учитывала его специфику и помогала

осуществлять согласование или сопряжение планов как «по вертикали» (между стратегическим планом и оперативными планами подразделений), так и «по горизонтали» (между оперативными планами смежных по процессу подразделений).

Для подразделений, в свою очередь, основным критерием становится обеспечение выполнения выданных им заданий с требуемым качеством и в нужный срок, предписанный верхним стратегическим планировщиком, который видит всю картину в целом на большой горизонт планирования, несмотря на любые регулярно случающиеся в подразделениях события, нарушающие планы, к числу которых могут быть отнесены: поломки оборудования, болезни и отгулы сотрудников, задержи поставок от смежников и т.д.

Тогда обобщенный перечень критериев, применимый для разных видов планов, имеет следующие вид:

1. $FDates$ – соблюдение сроков Заказов на большом горизонте;
2. $FWorkDates$ – соблюдение сроков Работ заказов на краткосрочном горизонте;
3. $FUtilization$ – загрузка ресурсов;
4. $FProfit$ – прибыль предприятия от реализации проектов;
5. $FRisks$ – степень риска выполнения плана;
6. $FQuality$ – качество выполнения заказов;
7. $FSkill$ – развитие персонала.

В результате, для работы предприятия требуется решать комплекс задач планирования производственных подразделений, которые могут иметь разные критерии, причем изменяющиеся в различные моменты времени по ходу деятельности предприятия и его подразделений:

$$\begin{cases} \text{Стратегический план: } \begin{cases} FDates \to max, \\ FProfit \to max, \\ FRisks \to min \end{cases} \\ \text{Оперативный план Подрздления 1 } \begin{cases} FWorkDates \to max, \\ FUtilization \to max \end{cases} \\ \text{Оперативный план Подрздления 2 } \begin{cases} FWorkDates \to max, \\ FSkill \to max, \end{cases} \\ \text{Оперативный план Подрздления } J \begin{cases} FWorkDates \to max, \\ FUtilization \to max \\ FQuality \to max \end{cases} \end{cases}$$

Каждый такой критерий может иметь разную формализацию, например, выполнение заказов в срок можно интерпретировать как минимизацию суммарной задержки по заказам, или минимизацию максимальной задержки, или другие способы формализации, что приведет к разным результатам.

Кроме того, для полноты этой картины следует выделить собственные критерии, предпочтения и предпочтения обеспечивающих подразделений:

- Отдел кадров → сотрудники прошли аттестацию в срок;
- Отдел экономики и финансов → кредиты банка вовремя выплачиваются;
- Служба механика → оборудование вовремя обслуживается и т.д.

При этом производственный план не обязательно определяет бюджет и всю экономику предприятия – в определенных случаях все может быть наоборот, вследствие чего должны подбираться такие заказы и производственный план должен строиться так, чтобы дать возможность предприятию выплатить кредиты или проценты по ним, то есть между указанными планами вместо отношений «мастер-ведомый» возникает отношение «равный с равным».

Таким образом, в ходе анализа процессов управления на указанных предприятиях стало ясно, что цели, критерии принятия решений, предпочтения и ограничения формулируются не только на верхнем уровне предприятия в целом, но и на уровне каждого подразделения, что требует перехода к построению распределенных систем управления для поиска согласованных решений по управлению ресурсами.

Наличие множества указанных, явных и скрытых критериев, предпочтений и ограничений подразделений, которые в массе существующих систем остаются неформализованными, делает производственные планы неадекватными (несбалансированными), неполными (фрагментарными) и несогласованными (конфликтными), т.е. в итоге нежизнеспособными, а решение этих проблем требует большой работы руководителей разного уровня за счет выполнения множества итераций «вперед и назад», что на практике не происходит.

При этом ключевыми становятся механизмы принятия решений по сопряжению и согласованию планов предприятия в целом и его подразделений, который бы обеспечивал непрерывно действующий «консенсус», то есть баланс интересов всех участников по их целевым критериям на текущий и плановый период.

В результате, построенный по каскадной схеме заведомо противоречивый план передается на исполнение, начинает быстро расходиться с фактом, что вызывает новые конфликты, многократные потери времени на их разрешение, рост рисков срыва сроков заказов, и в итоге выход предприятия за границы бюджета.

1.3 Формализация процессов управления ресурсами предприятия ВТИ

В ходе проведенного исследования были разработаны формализованные схемы процессов управления ресурсами предприятий, ведущих работы по государственным контрактам и государственному оборонному заказу, для основных этапов жизненного цикла ВТИ. Данные схемы процессов разрабатывались с учетом использования соответствующей интеллектуальной системы управления ресурсами, обеспечивающей сопряженное планирование множества проектов в едином пуле ресурсов.

Процессы управления проектами НИОКР ВТИ до заключения контракта представлены на рисунке 2.

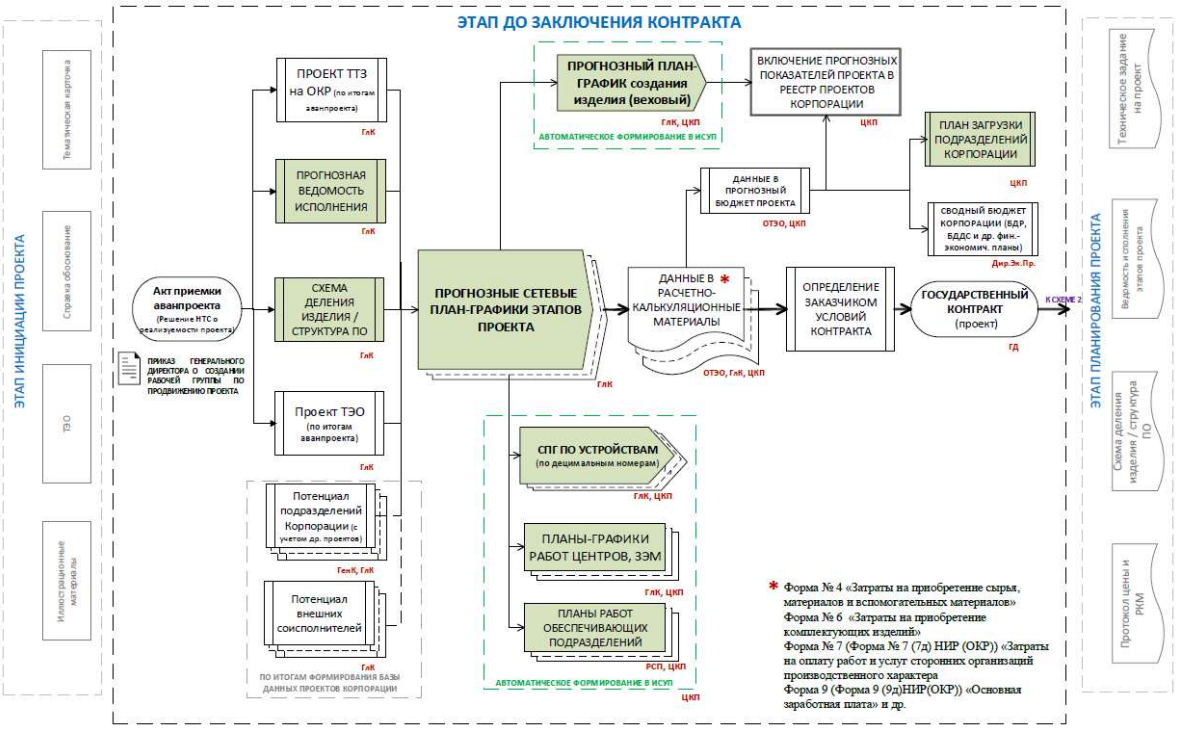


Рисунок 2 – Использование ИСУР при управлении проектом до заключения контракта

На основе проекта ТЗ на ОКР, прогнозной ведомости исполнения проекта, схемы деления изделия, схемы структуры программного обеспечения изделия, проекта ТЭО разрабатываются прогнозные сетевые план-графики этапов проекта, с последующим их согласованием с заинтересованными должностными лицами и балансировкой с учетом других проектов, проводимых в организации.

Из согласованных ПГ и этапов проекта формируются:

– прогнозный план-график создания изделия (веховый), который позволяет включать показатели ОКР в реестр проектов Организации;

– проекты ПГ по устройствам изделия, которые позволяют ключевым специалистам оценить порядок исполнения и затраты ресурсов на разработку, изготовление и испытания каждого устройства;

– проекты планов-графиков работ основных подразделений Организации, которые позволяют подготавливать данные в РКМ параллельно с ключевыми специалистами, что сокращает время их разработки;

– проекты планов работ обеспечивающих подразделений, которые позволяют им разрабатывать совместно с Главными конструкторами (далее ГЛК), соответствующие формы РКМ.

Эти документы позволяют разрабатывать обоснованные формы РКМ этапов проекта в соответствии с приказом ФАС 2019 года №1138/19, формировать план загрузки подразделений организации, а также вносить данные по предполагаемому проекту в реестр проектов и сводный бюджет.

В результате уточнения и согласования вышеуказанных документов формируются прогнозные экономические показатели проекта.

Процесс управлении проектом в ходе стадии планирования этапов проекта представлена на рисунке 3. После заключения контракта под руководством Главного конструктора разрабатываются уточненные план-графики исполнения этапов проектов.

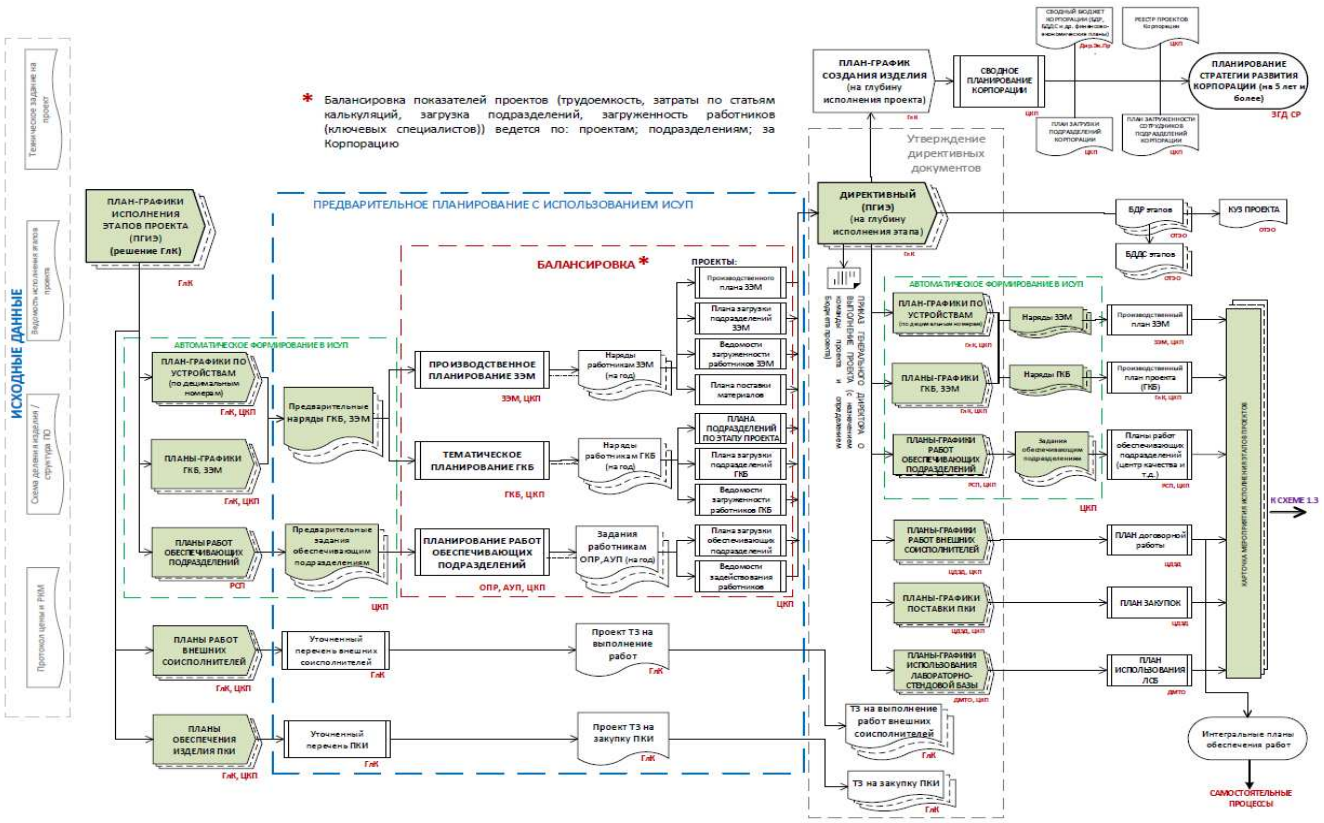


Рисунок 3 – Управление ресурсами в ходе планирования этапов проекта

Из согласованных ПГ и этапов проекта формируются:

– проект план-графика по устройствам изделия, который позволяет ключевым специалистам организовать деятельность заинтересованных лиц по разработке, изготовлению и испытаниям устройств и составных частей изделия на всех этапах ОКР;

– проекты разделов планов-графиков работ основных подразделений организации, которые позволяют организовать их работу по всем проектам текущего периода;

– проекты планов работ обеспечивающих подразделений, которые позволяют организовать выполнение ими соответствующих функциональных задач по всем проектам текущего периода.

Кроме того, формируются проекты планов работ внешних соисполнителей и проект плана поставки ПКИ.

В последующем, Главным конструктором выдаются предварительные наряды на выполнение работ основными подразделениями и задания на выполнение работ обеспечивающими подразделениями. На основе выданных предварительных нарядов и заданий руководителями соответствующих подразделений производится их детализация, взаимное согласование и балансировка показателей проекта.

Планы работ в основных подразделениях отражают задачи, выполняемые ключевыми специалистами по всем устройствам изделия (в соответствии со схемой деления изделия и схемой структуры программного обеспечения изделия), а также привлекаемыми работниками для выполнения мероприятий этапа работ проекта. Эти сведения передаются в Дирекцию проекта (Проектный офис) и ЦКП для балансировки загрузки подразделений, привлекаемых к работам на этапах проекта, по проекту, подразделениям и в целом по Организации, определяется достаточность трудовых ресурсов, необходимых для исполнения работ по этапам проекта, загрузка ключевых специалистов с учетом других проектов, эти сведения отражаются в плане загрузки подразделений и ведомости загруженности работников.

В результате всесторонней проработки выполнения мероприятий по этапам проекта и балансировки необходимых ресурсов разрабатывается директивный план-график исполнения этапов проекта. После утверждения директивного плана-графика издается приказ Генерального директора о выполнении проекта с определением команды проекта (Главный конструктор, его заместители, ключевые специалисты и другие лица).

На основании выданных нарядов, заданий и выписок из директивного графика руководителями подразделений разрабатываются производственные планы (планы работ подразделений) и другие планы (договорной работы, закупок и использования лабораторно-стендовой базы) на текущий год (помесячно, на последующие годы в укрупненных показателях) с учетом выполнения работ по всем проектам, которые утверждаются руководством организации.

Управление ресурсами при исполнении проекта представлено на рисунке 4.

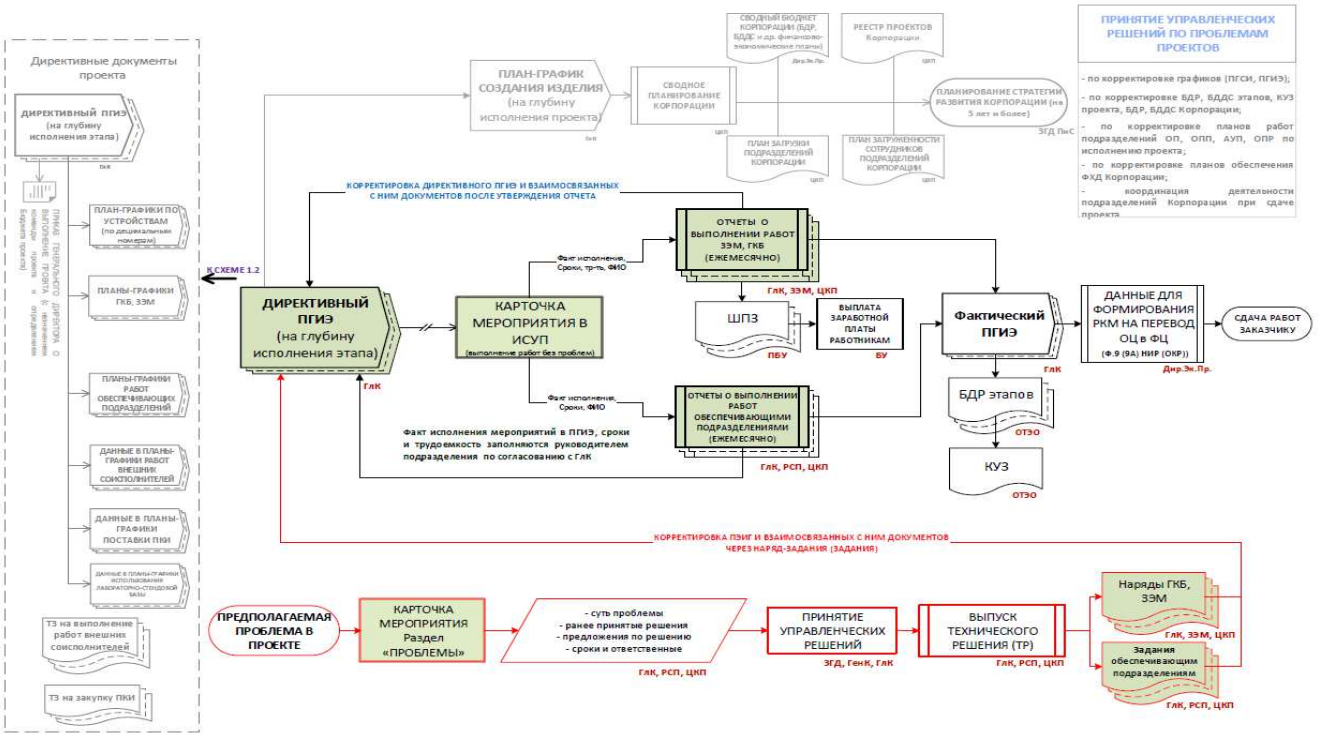


Рисунок 4 – Управление ресурсами в ходе исполнения проекта

В соответствии с утвержденным директивным планом руководителями подразделений организуется выполнение требуемых мероприятий.

По выполненным мероприятиям этапа проекта основными подразделениями формируется ежемесячный отчет с указанием фактической трудоемкости выполненных работ, в том числе каждым работником.

После согласования отчета Главным конструктором и его утверждения, фактически выполненные работы отражаются в директивном ПГИЭ, и формируется информация о соблюдении (нарушении) сроков выполнения работ, а также экономических показателей мероприятий.

Кроме того, отчет о выполнении работ может являться основанием для формирования проектного табеля выполнения работ с отражением фактической трудоемкости выполнения мероприятий по этапу (этапам) проектов для обеспечения выплат заработной платы основным работникам.

Для решения проблем в ходе исполнения этапа проекта предусмотрено ведение карточки мероприятий этапа проекта, одним из разделов которой является информация о разрешении возникающих проблем, в том числе о необходимости разработки технических решений и организации их исполнения.

В случае, если для решения проблем Главным конструктором изделия выпускается техническое решение, для его реализации формируются наряды и задания соответствующим подразделениям организации и осуществляется корректировка директивного ПГИЭ.

Рассмотренные и сформулированные процессы свойственны всем предприятиям, осуществляющим деятельность по управлению проектами и производству изделий ВТИ.

Ключевой особенностью системы управления в таких организациях является ее многоуровневый характер и сопряженность.

1.4 Многоуровневая система управления ресурсами предприятий

В результате системного анализа рассмотренных предприятий были сформулированы следующие особенности процессов управления ресурсами:

1) система управления ресурсами каждого предприятия является многоуровневой, что отражается в виде многоуровневых планов работ;

2) на каждом уровне управления ресурсами решается своя задача распределения, планирования, оптимизации и контроля использования ресурсов, имеются свои цели, предпочтения и ограничения;
3) процессы принятия решений по управлению на каждом уровне реализуются до определенной степени автономно, но согласовываются по срокам, требуемым ресурсам и параметрам работы с другими участниками;
4) процесс согласования решений носит характер переговоров, а не жестких директивных указаний, в которых стороны могут идти на уступки;
5) в случае возникновения конфликтов или непредвиденных ситуаций, которые нарушают ранее согласованный план, сначала проблема решается максимально локально, путем принятия управленческих решений по «нагону» сроков, а в случае невозможности – путем эскалации проблемы и пересмотра вышестоящего плана с перераспределением задач и ресурсов;
6) производственные планы работ подразделения на каждом уровне должны быть взаимоувязаны не только с производственными планами других производственных подразделений, но также и с планами работы обеспечивающих подразделений: планом обеспечения комплектующими и материалами; планами обслуживания оборудования; графиком отпусков; планом финансирования; планом обеспечения качества и другими;
7) на каждом уровне управления любого подразделения используется не один единственный план, а множество его версий: базовый/опорный утвержденный план, текущий план, прогнозный план, модельный план и другие, вариации планов могут использовать различные исходные данные и позволять моделировать принимаемые решения по управлению ресурсами.

В результате системного анализа была выявлено, что независимо от типа и вида предприятия и производимой им продукции, управление ресурсами для предприятия в целом осуществляется посредством организации комплекса взаимосвязанных ресурсных планов, которые декомпозируются по уровням управления, но имеют строгую систему связей и прослеживаемости. В системе

управления каждого из рассмотренных производственных предприятий так или иначе присутствуют следующие уровни ресурсных планов:

а) стратегический план реализации товарной продукции или портфеля проектов по ресурсным мощностям предприятия на длительном горизонте;
б) сквозной план работы группы подразделений предприятия (цехов, отделов, служб, внешних организаций или смежных цехов) на среднесрочном горизонте (6-12 месяцев) для реализации отдельных товарных позиций или работ из стратегического плана до уровня конкретных ресурсов (оборудование, персонал, команды, рабочие центры);
в) оперативный план работы каждого подразделения предприятия (цеха, отдела, службы) на краткосрочный горизонт (15-45 дней) для реализации заказов и работ сквозного плана до уровня конкретных исполнителей (работники, станки) с учетом детальных процессов реализации задач;
г) индивидуальный план действий каждого работника на короткий горизонт (до 10 дней) для реализации задач оперативного плана с учетом индивидуальных особенностей, ожиданий и других факторов, влияющих на продуктивное выполнение работ.

Фактически, для каждого уровня управления предлагается свой вид плана, направленный на достижение целей, учитывающий особенности заказов и ресурсов данного уровня, а также связи с другими уровнями, как вниз/ вверх по иерархии, так и по горизонтали (рисунок 5).

План каждого уровня при этом взаимосвязан как по «вертикали» с вышестоящими и нижестоящими планами, которые детализируют и уточняют вышестоящий план, так и по горизонтали с планами соседних подразделений в технологической производственной цепочке.

В результате анализа были выделены следующие основные виды планов предприятия (таблица 2).

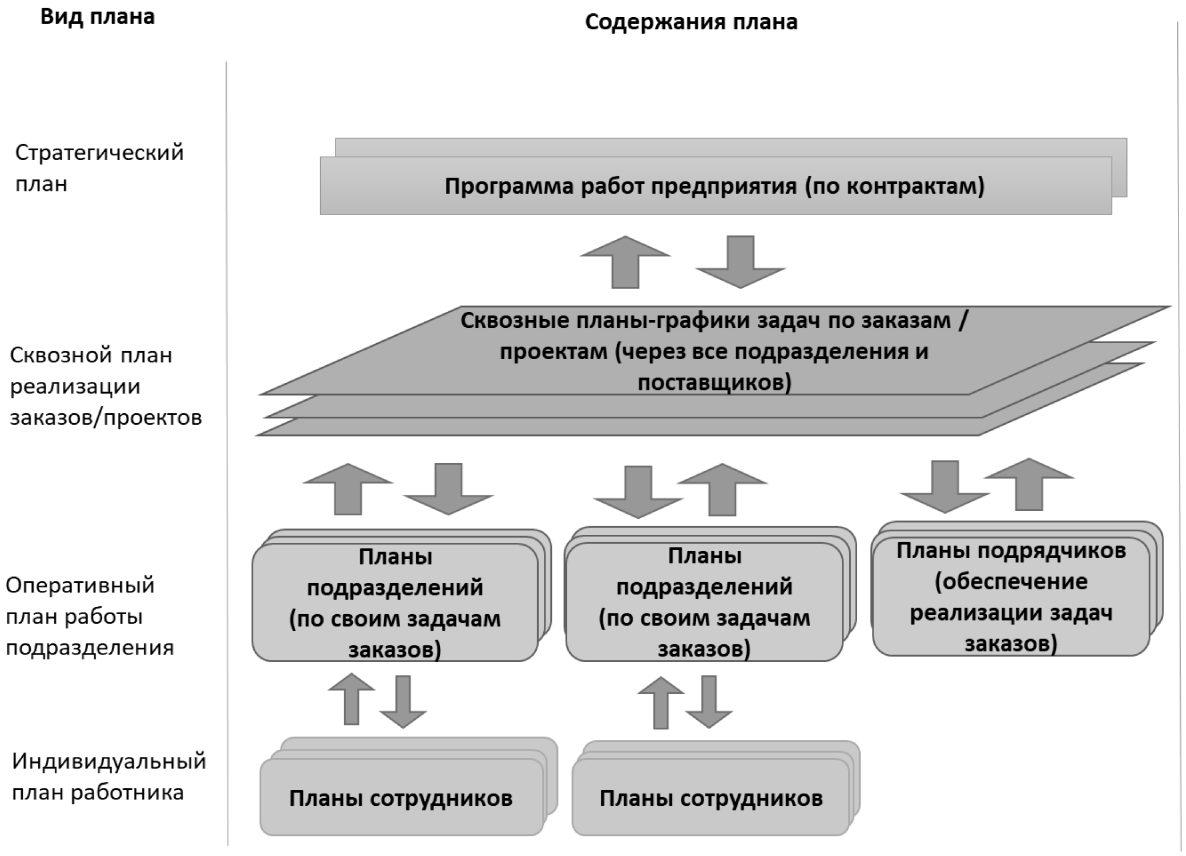


Рисунок 5 – Структура планов предприятия

При этом имеющиеся на предприятиях автоматизированные системы управления ресурсами, как правило, предлагают «каскадные» модели и методы решения задач управления ресурсами, в которых взаимодействия между подразделениями для согласования планов реализуются в ручном режиме, что приводит к следующим негативным последствиям:

— дополнительная сложность и трудоемкость планирования;
— планы на разных уровнях непрерывно расходятся по срокам и показателям и быстро теряют актуальность;
— имеются длительные задержки в принятии решений и согласовании планов;
— возникают риски срыва сроков заказов и выхода за границы бюджетов.

Таблица 2 – Виды планов предприятия

Параметры \ Виды Планов	**Стратегический план предприятия**	**Сквозной план реализации проектов/заказов**	**Оперативный план работ подразделения**	**Индивидуальный план задач работника**
Цель плана	Выполнение в заданные сроки и с наибольшей эффективностью всех работ по проектам/заказам Предприятия и равномерная загрузка подразделений	Выполнение работ СПГ проектов/заказов в установленные проектами сроки, бюджеты и в рамках выделенных трудовых ресурсов	Выполнение заданного набора работ, необходимых для реализации СПГ проектов, ресурсами подразделения в коротком горизонте времени с учетом заданных сроков	Выполнение задач сотрудников в заданные сроки, с учетом ограничений и предпочтений в рабочей группе.
Ответственное подразделение (планировщик)	Плановое диспетчерское управление Главный офис управления проектами	Офисы управления проектами по направлениям	Подразделения (отделы/цеха/бригады)	Работники (инженеры, рабочие, техники)
Критерии оптимизации	Выполнение портфеля проектов в заданные сроки Рост производительности труда Формирование задела для будущих проектов	Выполнение каждого проекта/заказа в рамках сроков, бюджетов и получения качественных результатов Максимизация прибыли по каждому проекту	Выполнение пула задач в заданные сроки и максимизация развития персонала (рост производительности) Минимизация отклонений по срокам передачи	Выполнение пула задач с минимальным отклонением от заданных сроков Максимально полно использовать

Параметры \ Виды Планов	**Стратегический план предприятия**	**Сквозной план реализации проектов/заказов**	**Оперативный план работ подразделения**	**Индивидуальный план задач работника**
			результатов в другие подразделения	специализацию сотрудников. Максимизация качества результатов
Горизонт планирования	3-5 лет	1-2 года	До 3 месяцев	До 30 дней
Проекты/Заказы	Все проекты верхнего уровня (Глобальные проекты)	Планы-графики заказов	Планы-графики заказов	Планы-графики заказов
Задачи	Работы по задачам проектов верхнего уровня	Работы по задачам исполнительных планов-графиков	Детализированные работы по задачам исполнительных планов-графиков	Задачи сотрудников
Исполнители	Подразделения уровня направлений деятельности (отделения, производства)	Подразделения уровня прикладных задач (отделы, цеха)	Подразделения уровня рабочих групп (направления, сектора, рабочие центры, бригады)	Сотрудники рабочей группы
Календарь доступности ресурсов	Определяется по календарям подчиненных подразделений	Определяется по штатному расписанию подразделения, с учетом поправочных	Определяется по календарям доступности сотрудников рабочей	Определяется календарем сотрудника с учетом базового календаря и индивидуальных

Параметры \ Виды Планов	**Стратегический план предприятия**	**Сквозной план реализации проектов/заказов**	**Оперативный план работ подразделения**	**Индивидуальный план задач работника**
		коэффициентов отпусков, больничных и т.п.	группы с учетом их доли участия.	исключений (отгулы, отпуск, больничный, переработка, и т.п.). Объем возможных переработок ограничивается как процент от календаря доступности. Переработки могут быть компенсированы «отгулами»
Производительность исполнителя	Производительность – степень владения видом работ (от 0 до 1) в единицу времени «Фокус фактор» – штрафная функция (от 0 до 1), означающая снижение производительности из-за внешних факторов (переключение на неизвестную ранее работу, переключение между работами, учет выполнения других видов работ, и т.п.)			
Профиль компетенций ресурса	Виды целевых изделий (объектов деятельности) Глобальные виды работ Производимые виды результатов	Виды целевых изделий (объектов деятельности), виды работ и производимые виды результатов	Виды целевых изделий (объектов деятельности), виды работ и производимые виды результатов	Виды целевых изделий (объектов деятельности), виды работ и производимые виды результатов

1.5 Обзор существующих подходов к управлению сложными многоуровневыми системами управления ресурсами

1.5.1 Сетевое управление

Как отмечается в фундаментальном обзоре А. В. Проскурникова и А. Л. Фрадкова, вышедшем в журнале «Автоматика и Телемеханика» в 2016 году [30], сетевое управление – новое быстро развивающееся направление в теории автоматического управления.

Под «сетевой системой» понимается совокупность автономных подсистем (узлов), соединенных физическими или информационными связями. Автономность подсистемы, состоящая в ее способности самостоятельно принимать решения за счет конвергенции различных информационных технологий, и есть один из главных факторов, который стимулирует возникновение и ускоряет развитие сетевых систем.

Среди примеров сетевых систем, развитие которых началось с систем автоматического управления, в частности, сетей взаимодействующих регуляторов, следует отметить транспортные и логистические сети, высокотехнологичные производственные системы, системы управления групповым движением космических, летательных и подводных аппаратов, распределенные системы управления электрическими сетями и другие. Можно утверждать, что даже такие новые объекты, как нейронные сети или социальные сообщества, также могут рассматриваться как сетевые системы.

Актуальность и научная значимость проблемы создания сетевых систем подтверждаются увеличением интереса к области сложных сетевых систем (Complex Networks) в мировой научной литературе. За последние 5-6 лет количество статей по этой теме удвоилось. В ведущем журнале в этой области, IEEE Transactions on Automatic Control, четыре из десяти последних статей посвящены сетевому управлению, что свидетельствует о быстром росте актуальности этой тематики. В статье [30] делается вывод о начале новой эпохи сетевого управления в ряде областей.

С развитием и конвергенцией интеллектуальных систем, Интернета вещей, кибер-физических систем и цифровых двойников, за последние 5-10 лет прошедших эволюцию от «цифровых теней» – к адаптивным, умным и когнитивным системам, одной из новых, актуальных и значимых областей применения принципов построения сетевых систем становятся системы «Искусственного интеллекта (ИИ)», которые охватывают не только нейронные сети, но и другие виды систем принятия решений.

Развивая эту мысль, можно предположить, что дальнейшей перспективой сетевого управления будут системы распределенного, децентрализованного, коллективного, самоорганизующегося и эмерджентного интеллекта [12].

1.5.2 Теория сетевого автоматического управления

В современной теории сетевого управления, следуя обзору [30], в последнее время выделяют два основных раздела, первый из которых может быть определен как управление через сеть (англ. «networked control»), а второй – как управление сетями или в сетях («control of networks»).

Первое направление «networked control» преимущественно связано с управлением при коммуникационных и вычислительных ограничениях, которые присутствуют в любой сложной компьютерно-управляемой системе. Примерами задач, которые исследуются в этой области, является влияние на поведение системы управления квантования и дискретизации данных, различных задержек и потери данных, ограниченной скорости передачи данных либо емкости канала связи и некоторых других ограничений.

Второе направление «control of networks» в сетевой теории управления изучает задачи управления в сетях. Здесь часто выделяют задачи «группового управления», «кооперативного управления», «мультиагентного (многоагентного) управления» и некоторые другие.

Рассматриваемые сетевые системы управления отличаются от классических как структурой объекта управления, так и структурой «регуляторов» или алгоритмов управления, которые в сетевой теории управления называют

«протоколами», т.к. при этом рассматриваются «алгоритмы взаимодействия алгоритмов», т.е. сопряженного взаимодействия и совместной работы нескольких алгоритмов, представленных различными системами. При этом важно отметить, что у таких систем предполагается определенный уровень автономности, тенденция роста которого наблюдается повсюду. Так, мультиагентные технологии в 2019 г. уже отмечались консалтинговой компанией Gartner в числе наиболее перспективных трендов по созданию «автономные вещей» [63], которые по предложенной классификации пришли на смену «цифровым вещам» и «умным вещам».

Как рассматривается в [30], объект управления в сетевом подходе разбивается (естественно или искусственно) на отдельные автономные подсистемы (узлы), которые, как правило, не управляются из единого центра, а принимают и реализуют решения самостоятельно (автономно) на основе доступной им информации. Такой способ поведения называется «агентным», соответственно узлы-подсистемы часто называются агентами, а вся система — мультиагентной (или многоагентной). Соответственно, алгоритмы управления в сетевой (мультиагентной) системе должны быть распределенными и децентрализованными – первый термин означает, что каждый узел (агент) сам по себе представляет собой автономную систему, а второй термин предполагает, что такие системы используют лишь «локальную» информацию, как правило, состояние самого узла и нескольких «соседних» узлов. Наиболее часто о «мультиагентном управлении» говорят в ситуации, когда изначально узлы сети полностью автономны, а информационные связи между ними возникают лишь в ходе применения совместного алгоритма управления, ставящего целью достижение некоторой общей, или кооперативной, цели.

Согласно [30, 40, 47] одной из основных задач сетевого управления является синхронизация, означающая согласованное поведение агентов. Так, полная или частичная координатная синхронизация означает асимптотическое сближение состояний агентов или их наблюдаемых выходов.

Достижению подобной цели соответствует наличие у динамической системы свойства частичной устойчивости или устойчивости относительно функции. В работах [1, 91] показано, что частным случаем задач синхронизации являются задачи достижения консенсуса, в которых состояния либо выходы агентов должны сойтись к общему значению (например, среднему начальных состояний) либо общей заданной траектории. Как показано в работе [92] к задачам частичной координатной синхронизации сводятся и задачи группового управления или управления формациями.

Специальным случаем координатной синхронизации (полной или частичной) является «консенсус» (по состоянию либо по выходу) – понимаемый как предел состояний, достижимых при синхронизации. При этом допускается, что для специальных случаев под консенсусом могут пониматься и другие типы поведения, не только по координатам (например, предел векторов скорости, сходимость к поведению лидера, к заданной траектории и т.д.). Термин «консенсус» имеет корни в социологии и прикладной статистике. Первое из направлений связано с моделями динамики мнений и социальной власти в социальных группах. Одна из первых сетевых моделей такого рода, описывающая итеративный процесс усреднения мнений, была предложена социальным психологом Френчем в 1956 г. [58].

С другой стороны, в исследовании операций и прикладной статистике рассматривалась задача принятия согласованного решения группой экспертов [55].

В качестве примера рассмотрим теоретические аспекты задачи формирования мнений в одной из наиболее известных моделей Де Грута [89]. В этой модели рассматривается система взаимодействующих агентов, в которой реализуется линейный алгоритм формирования мнений в группе участников. Модель Де Грута представляет собой простую итерационную процедуру, которая позволяет достичь консенсуса в виде профиля, где все компоненты имеют одинаковое значение. Однако консенсус в данной модели достигается лишь асимптотически, то есть, при $t \to +\infty$. Модель демонстрирует богатую динамику возникновения консенсуса (единого мнения) как в группе, так и кластеризацию участников на подгруппы, где мнения одинаков, но с потерей сходимости и

возникновением асимптотических периодических колебаний. Преимущество модели Де Грута состоит в том, что условия для всех этих типов поведения можно получить в аналитическом виде. Эти условия ясные и легко проверяемые.

При этом, основная критика модели Де Грута связана с тем, что определяющая динамику матрица весов агентов, не зависит от параметра времени. Поэтому в дальнейшем были построены модели с переменной матрицей влияний.

Следует отметить, что в последнее время все чаще интерес исследователей привлекают турбулентные условия, в которых агент может не следовать заданному алгоритму поведения и менять свое мнение случайно по заданному закону распределения. В связи с переходом на открытые мультиагентные системы в работах [57, 59] активно исследуется. При этом отмечается сложность получения каких-либо аналитических оценок и речь идет о поиске хотя бы асимптотических свойств случайного процесса, в частности, при наличии случайных скачков.

Рассматриваемые модели в основном применяются для описания распространения мнений в сообществах людей и влиянии СМИ, политиков и государственных деятелей на мнения сообществ людей и способов противостояния дезинформации и поляризации в обществе. Задачи по принятию решений и достижению консенсуса и синхронизации решений в ходе согласования производственных планов пока остаются неисследованными.

Таким образом, сетевое управление в теории автоматического управления до сих применяется, в основном, к относительно простым системам автоматического управления. Вопросы создания сетевых моделей более сложных автономных систем, в частности, класса ERP и MES систем, традиционно остаются за пределами указанной теории и практически не изучены, т.к. эти системы сами по себе не обладали требуемыми свойствами автономного принятия решений, и рассматриваемая теория в основном применялась для различного рода регуляторов.

1.5.3 Сетевое управление в ИИ системах для управления ресурсами

Как показано в предыдущем разделе, задачи сетевого управления решаются в настоящее время для относительно простых систем. В то же время, важное

значение имеет формирующаяся методология, выявление типовых задач и разработка подходов к их решению в сетевом управлении, которые могут быть перенесены на более сложные распределенные системы ИИ для управления ресурсами.

Современные производственные системы крупных предприятий отличаются распределенным характером своего географического расположения и наличием автономных (самостоятельных) центров принятия решений. Не менее сложные системы формируются и на уровне отдельных крупных предприятий и госкорпораций. В последнее время особенно актуальной стала задача производственной кооперации производственных предприятий между собой по горизонтали с целью решения проблемы импортозамещения комплектующих и материалов в рамках отрасли.

По управлению производственными сетями публикуется большое число работ и актуальность этих задач продолжает расти [51, 75, 85].

Однако, формализация задач управления для предприятий осложняется многоуровневым и распределенным характером процессов принятия решений в такого рода сетях, неоднородностью математических моделей процессов производства и обмена продукцией, финансами и информацией, а также большими размерностями возникающих массивов данных и высокой турбулентной динамикой принимаемых решений при изменениях спроса и предложения, например, при поступлении новых заказов, приостановке выполняющихся, выходе из строя ресурсов или задержках в поставках и т.д.

Кроме того, постановка задачи, причем как на уровне цепочки поставок, так и одного предприятия, обладающего рядом цехов и обеспечивающих служб, осложняется тем, что участники указанного процесса являются членами совместной сложной коллективной деятельности и обладают собственными интересами, предпочтениями и ограничениями. Иными словами, все участники имеют определенную автономность в принятии решений, включая как «центр», так и «части» производственной системы. При этом центр не может «командовать» сверху- вниз, т.к. не знает полностью ситуацию «внизу», равно как и части не видят

ситуацию «в целом» на большой горизонт времени. В этой ситуации всем участникам, как центру, так и его частям, приходится «договариваться» о планах действия и достигать консенсуса в том, кто и что в какое время будет делать, пересматривая эти договоренности при поступлении новых важных событий.

Одним из наиболее близких подходов для решения рассматриваемой задачи является теория активных систем В.Н. Буркова (ИПУ РАН) [5, 28], возникшая в конце 60-х годов на стыке теории автоматического регулирования и теории иерархических игр.

Кроме того, обзор литературы по теме показывает, что к данной проблематике все чаще примыкают игровые модели, сетевые динамические модели рынков, аукционов и экономики, описывающие взаимодействие торговых и экономических агентов, а также децентрализованных и групповых систем [18, 19, 54, 61, 62, 82].

1.5.4 Теория активных систем

Задача управления активными объектами или элементами, к числу которых можно отнести как людей, так и в контексте настоящей работы, автономные интеллектуальные системы, и составляет существо теории активных систем.

Основываясь на работах [5, 6 28] изложим ключевые принципы теории активных систем и определим их связь с настоящим исследованием. Так в этих работах дается определение, что теория активных систем (ТАС) – раздел теории управления социально-экономическими системами, изучающий свойства механизмов их функционирования, обусловленных проявлениями активности участников системы.

Для управления системами с активными элементами был предложен принцип открытого управления. Его суть состоит в следующем. Пусть имеется организационная система из элементов со своими интересами. Интересы системы в целом выражает Центр, который вырабатывает управляющие воздействия (планы) для элементов. Если Центр решает задачу выбора оптимального плана исходя из интересов системы в целом, этот план, в общем случае, не будет

оптимальным для элементов. Отстаивая свои интересы, элементы будут искажать информацию, представляемую Центру. Чтобы избежать этого, Центр должен назначать элементам выгодные для них планы, даже в ущерб интересам системы. Таким образом, Центр должен решать задачу оптимизации на множестве так называемых совершенно согласованных планов, т.е. планов, оптимальных для элементов. Считается, что в этом случае элементам выгодно представлять в Центр достоверную информацию. Это и была первая формулировка принципа открытого управления [4]. В это же время в начале 1970-х гг. в Вычислительном центре АН СССР под руководством Н.Н. Моисеева и Ю.Б. Гермейера развернулись исследования по созданию информационной теории иерархических систем на основе теории игр с не противоположными интересами [10].

Одним из важных первых результатов ТАС в области отраслевого управления предприятиями стал принцип «согласованного планирования», суть которого состоит в назначении элементам только таких планов, которые им выгодно выполнять (согласованных планов) [4]. В частности, было доказано, что если функции штрафа удовлетворяют «неравенству треугольника», то на множестве механизмов согласованного планирования существует оптимальный механизм. Более того, поскольку множество согласованных планов увеличивается с ростом «силы штрафов» за невыполнение плана, то оптимальной системой стимулирования является система с максимальными штрафами (максимальной степенью централизации [37, 39].

Работы по развитию ТАС проводились в условиях плановой экономики для повышения эффективности деятельности предприятий и целых отраслей, а также в направлении оптимизации налогообложения, прогрессивных механизмов обмена ресурсами, развития деловых игр и т.д. В работах [27, 29] приведено доказательство оптимальности механизмов честной игры. Был выполнен цикл работ по созданию типовой комплексной системы управления отраслевыми НИИ и КБ [42] на основе комплексной оценки результатов деятельности подразделений [15].

С Перестройкой и переходом к рыночной экономике начался новый этап развития ТАС под руководством Дмитрия Александровича Новикова совместно с

Михаилом Губко, Михаилом Искаковым, Николаем Коргиным, Сергеем Мишиным, Александром Чхартишвили и др. Одной из новых стала задача реформирования и реструктуризации крупных предприятий. Объединение теории принятия решений в распределенных системах с теорией активных систем и создание на этой основе практических методик и технологий реформирования оказалось крайне плодотворным для решения проблем трансформации предприятий в рыночную экономику.

За последнее время ТАС трансформировалась в более широкое направление – теорию управления организационными системами (ОС), включив в себя в том или ином смысле ряд подходов к управлению организациями – теорию активных систем, теорию иерархических игр, элементы системного анализа и mechanism design, теорию контрактов и другие [6, 15, 28].

В настоящее время, значительное внимание уделяется постановкам задач оптимизации и управления в распределенных и сетевых структурах с применением классических методов планирования и оптимизации ресурсов. Интеллектуальные системы пока остаются неисследованными в рамках указанной теории, но идеи согласованного планирования, оценки работы подразделений и управления с динамическими стратегиями поведения и штрафами представляют интерес для любых применений.

1.5.5 Теория аукционов в электронной коммерции

С развитием электронной коммерции в конце 1990-х и начале 2000-х годов все больший интерес исследователей начали вызывать автоматически проводимые переговоры, в частности, машинные аукционы.

[Аукционы – продажа объекта конкурирующим претендентам – проводились с древних времен (подтверждения можно найти в работах греческого историка Геродота, который еще в V в. до н. э. упоминает аукционы, проводившиеся в древнем Вавилоне). В XXI в. поисковики Google, Yandex используют аукционы для

продажи контекстной рекламы, а интернет-платформы типа eBay дают возможность каждому человеку продавать и покупать товары на аукционах.][1]

Теория аукционов [38] является «ядром» современной экономической теории, а стандартные аукционы – базовыми элементами множества моделей в микроэкономике, экономике общественного сектора и финансах. Теоретические исследования аукционов сформировали современное понимание экономической роли информации в работе конкурентного рынка и формировании рыночной цены. Прикладной анализ аукционов лег в основу важных практических механизмов, таких как механизмы приватизации и реприватизации радиоспектра и государственных закупок. Нобелевская премия 2020 г. присуждена Роберту Уилсону и Полу Милгрому одновременно за вклад в создание основ теории аукционов и за разработку масштабных практических приложений.

[Роберт Уилсон и Пол Милгром, лауреаты 2020 г., внесли фундаментальный вклад, разработав теории аукционов с общей компонентой ценности и объяснив роль информации, частной и публичной, в формировании цены, ожидаемых выигрышей участников и доходов продавца. Они и группа специалистов, многие из которых были их учениками в Стэнфордском университете, сыграли решающую роль в дизайне крупнейших аукционов последних 30 лет – от первых аукционов на радиочастоты в начале 1990-х годов до комбинаторных аукционов второго десятилетия XXI в. Их работы связали абстрактные результаты высокой теории с конкретными приложениями.][2]

[Фундаментальная идея Ф. фон Хайека, нобелевского лауреата 1974 г., состояла в том, что ключевую роль играет рыночная цена – носитель информации (Hayek, 1937, 1945). На уровне рынка в целом изменение цены сигнализирует о дефиците (цена растет) или избытке (цена падает). Производители товаров считывают этот сигнал и в ответ увеличивают или сокращают производство, чтобы увеличить прибыль. Хайек сформулировал теорию: цена на рынке складывается,

---

[1] Цитировано по работе [38, с. 6]

[2] Цитировано по работе [38, с. 6]

агрегируя информацию, распыленную среди множества потенциальных продавцов и покупателей.

Для Хайека ключевая роль рыночной цены давала серьезные преимущества свободному рынку над плановой экономикой. За полвека до конца плановой экономики аргументы Хайека теоретически обосновывали преимущества рыночной системы.

В рассматриваемой при этом децентрализованной капиталистической рыночной экономике единого планировщика нет. Тем не менее удобно представлять себе рынок в качестве площадки, на которой, помимо потенциальных покупателей и продавцов, существует гипотетический аукционист. Экономические агенты, наблюдая текущую цену, определяют оптимальные объемы производства и потребления и сообщают их аукционисту. Аукционист подсчитывает совокупные предложение и спрос и объявляет новый вектор цен на все товары, повышая цены на товары, спрос на которые превышает предложение, и понижая — на остальные. Процесс обмена информацией между планировщиками и агентами прекращается, когда ни на один товар нет избыточного спроса. Гипотетического аукциониста из этой модели называют вальрасовским, потому что он находит общее (вальрасовское) равновесие. Недостаток «вальрасовской» аукционной модели – предположение о том, что каждый агент на рынке, определяя свой спрос или предложение, смотрит только на цену и не учитывает возможное влияние собственных решений на нее и поведение остальных.][3]

Накопленные многочисленные теоретические заделы и практический опыт проведения аукционов в разных странах за всю историю человечества привели к тому, что теория аукционов стала первоосновой для разработки систем электронной коммерции, которые начали бурно развиваться в сети Интернет в начале 2000-х годов.

---

[3] Цитировано по работе [38, с. 7-8]

Один из важных семинаров по мультиагентным системам для электронной коммерции на основе аукционов с участием известных ученых и специалистов IBM, MIT, Stanford и ряда других известных организаций, был проведен в Стокгольме (Швеция) в рамках 16 International Joint Conference on Artificial Intelligence еще в 1999 году – наиболее интересные статьи были опубликованы в сборнике [43].

В работе [48] были предложены последовательные аукционы вместо комбинаторных и параллельных аукционов. Идея заключается в том, что агенту часто требуется несколько ресурсов для выполнения определенных действий. Получение одного ресурса без другого может сделать его бесполезным. Группы ресурсов часто взаимозаменяемы, и получение одного пакета может снизить ценность другого.

Как отмечается в статье [48], где предложен специальный метод на основе динамического программирования для выбора параметров предложенного аукциона, аукционы имеют много интересных свойств, в том числе, в определенных случаях позволяют находить Парето-оптимальные решения.

Проведенные исследования привели к созданию ряда мультиагентных платформ и практических приложений, например, по аукционо-подобным схемам переговоров для выбора грузовиков, перевозящих грузы [93].

В дальнейшем в задачах о распределении ресурсов начали рассматриваться несколько различных видов проблем в зависимости от того, способен ли один агент выполнять одну или несколько задач одновременно и планировать свою работу и, наоборот, может ли множество агентов объединять свои ресурсы для выполнения одной сложной задачи, что получило название «коалиции» агентов [49]. Такого рода проблемы требуют одновременного применения нескольких подходов, например, сочетания аукционных схем с распределенной и мультикритериальной оптимизацией, теорией игр, машинным обучением и других. При этом может рассматриваться задача как с наличием центрального узла, под надзором которого агенты ведут переговоры, так и без такого узла, где агенты могут договариваться друг с другом.

Аукционные схемы органично вытекают из общих принципов рыночной экономики, где каждый агент старается добиться максимальной возможной прибыли, которая в дальнейшем может быть распределена между агентами. Эти методы получили развитие в последнее время для управления спутниками, дронами и другими ресурсами. Развитие обусловлено тем, что для таких случаев были получены теоретические оценки худших вариантов распределения ресурсов, показана быстрая сходимость и низкая сложность алгоритмов.

Пример консенсусного алгоритма со связыванием ресурсов также рассматривается в ряде работ, где этот алгоритм использует рыночные стратегии для распределенного выбора задач и предлагает процедуру поиска консенсуса на основе только локальных переговоров агентов, причем с разрешением конфликтов до достижения согласия между ними. В источниках, приведенных в рассматриваемой работе, показывается, что подобные методы локальных переговоров могут позволять системе эффективно работать в асинхронном режиме. Сочетание аукционо-подобных методов с жадными алгоритмами позволяет агентам принимать оптимальные решения на их уровне обзора (в смысле их «миопии» – близорукости), которые при этом максимизируют глобальную цель. Некоторые подходы позволяют работать с гетерогенными агентами, вычисляя их локальные функции удовлетворенности, чтобы точнее давать предложения другим агентам в аукционо-подобных схемах. Такие алгоритмы позволяют учитывать индивидуальные особенности каждого агента, например, возможность конкретного грузовика посещать заправочные станции.

Еще один пример применения аукционо-подобных схем для производственного планирования приведен в работе [79]. Здесь рассматривается множество заказов, которые претендуют на несколько станков для их обслуживания. Аукционы проводятся не сразу для всех работ каждого заказа, а последовательно, что значительно сужает пространство вариантов. Экспериментально показывается, что даже несмотря на принятые упрощения, предлагаемый подход обеспечивает построение расписаний с более высоким уровнем качества по сравнению с другими методами и алгоритмами.

В результате можно утверждать, что аукционо-подобные методы (auction-based techniques) в теории и на практике доказали свою способность решать задачи квази-оптимально, причем с гарантированной сходимостью к бесконфликтным решениям. Другим преимуществом указанных методов является их высокая масштабируемость и устойчивость по отношению к различной топологии сети.

Анализ рассмотренных работ приводит к выводу, что возможным методом решения задачи многоуровневого управления ресурсами предприятий является формирование динамических аукционов, связанных с возникновением событий, меняющих ситуацию на виртуальном рынке системы. При этом важным является сопоставление выигрыша агента от выполнения поставленной задачи и расходов на исполнение этой задачи, зависящих от контекста состояния или ситуации, в которой находится каждый агент. Такого рода алгоритмы могут не давать глобального оптимума, но достигают рационального результата за короткое время, что делает их востребованными на практике.

1.5.6 Сравнение с классическими и эвристическими задачами исследования операций

В существующих задачах классического и эвристического планирования и оптимизации ресурсов рассматривается централизованная постановка, решаемая в интересах центра, который управляет всеми ресурсами.

С начала 2000х годов предлагались новые подходы, методы и разрабатывались соответствующие средства для управления ресурсами распределенном образом [87]. Они были связаны с переходом к распределенному решению задач (от англ. Distributed Problem Solving), в которых исходная сложная задача разделяется на ряд подзадач, находились частные решения, а затем формировался итоговый результат. Однако, предложенные методы продолжают во многом нести в себе черты «централизованного» подхода, в котором рассматривается одна общая целевая функция, выбор вариантов и принятие решений остается за центральным агентом. В ряде исследований [80, 88]

развивается применение теории игр к мультиагентным системам распределения ресурсов.

В то же время имеется целый ряд работ по применению мультиагентных систем в управлении производством, в которых развиваются принципы самоорганизации. В основе большинства мультиагентных систем лежит протокол, называемый Contract-Net, разработанный Р. Смитом из Стенфорда в 1978 г. [110, 111], который был предложен для решения задач распределения ресурсов в рамках Distributed Artificial Intelligence [97]. Большое влияние на дальнейшие разработки оказала работа [112] по системе PROSA (Product, Resource, Order, Staff Agents), в которой была предложена архитектура типовой холонической мультиагентной системы для управления производством.

В 2009-2010 г.г. в Кембридже были опубликованы две монографии [54, 100], которые посвящены исследованию методов и алгоритмов мультиагентных систем, базирующихся на модели виртуального рынка. В работе [34] рассматриваются новые модели и метолы для адаптивного ресурсами и приводится принцип работы МАС управления ресурсами с виртуальным рынком: для каждого Агента Ai вводится функция Ci, такая что для любого набора задач T, Ci (T) есть стоимость выполнения Агентом Ai всех задач T. Каждый агент стартует с некоторого произвольного начального набора задач, что дает неоптимальное распределение в том смысле, что сумма всех расходов агентов не является минимальной. При этом агенты начинают переговоры, которые улучшают распределение, что приводит рано или поздно к установлению «конкурентного равновесия» на виртуальном рынке, когда ни одно другое решение не может улучшить результат, что и считается решением задачи с минимальной стоимостью. Переговоры строятся как итеративный процесс взаимных уступок и перестановок, причем каждый шаг есть «контракт» между агентами, позволяющий агентам обмениваться задачами и деньгами.

В этих работах теоретически была показана возможность получения глобального оптимума при использовании предлагаемого метода для решения задачи о назначениях и высказаны аргументы в пользу перспективности

дальнейшего развития и применения этих методов при решении более сложных NP полных задач планирования и оптимизации.

В настоящее время эта методология применяется, в частности, для решения задачи о балансировке нагрузки в грид-сети вычислителей [44, 71]. На примере расчетов грид-сети из 1024 вычислителей показана возможность практического применения разработанных методов и алгоритмов в задачах большой размерности, где другие методы не применимы.

В ряде работ [100, 44, 71] отмечается, что мультиагентные системы в планировании дают лучше результаты по сравнению с традиционными централизованными Job-Shop алгоритмами, когда пространство решений проблемы сложное и неоднородное. Кроме того, мультиагентные системы дают лучшие результаты в задачах, где параметры зависят от времени. Обычно отмечается также способность мультиагентных систем отрабатывать внезапные возмущающие события. Но в целом мультиагентные системы могут давать худшие результаты в силу локальных решений, возникающих из-за «близорукости» агентов в ходе переговоров. Можно считать, что традиционные алгоритмы более применимы в случае, когда нет возмущающих событий и длительность расчета не ограничена. Однако, в глобальной экономике, где роль ответа в реальном времени повышается, таких ситуаций становится все меньше.

1.5.7 Анализ существующих программных систем

Традиционные информационно-управляющие системы класса Enterprise Resource Planning (ERP) разработки таких известных компаний как SAP, BAAN, Oracle, 1C, Галактика и многих других, хотя и называются системами планирования ресурсов предприятий, но в реальности остаются, в основном, учетными системами, с весьма ограниченными возможностями пакетного планирования. Ядро планирования таких систем строится на базе классических методов оптимизации, которые работают в последовательном пакетном режиме и требуют полных и неизменных сведений о заказах и ресурсах. Одним из основных

применяемых пакетом программ, применяемых для расчета расписаний, до последнего времени оставалась система Simens Opcenter APS (ранее Preactor APS).

Однако, в большинстве таких систем заказы и ресурсы обычно считаются известными заранее и не меняются в ходе вычислений, и даже небольшое изменение ситуации вызывает необходимость полного пересчета планов, что является следствием применения традиционных комбинаторных методов линейного программирования или различных эвристик и метаэвристик (методы отжига, табу и т.д.).

С ростом сложности решаемых задач бизнеса и динамики изменений спроса и предложения на рынке, использование классических методов и средств на практике встречает существенные трудности. Эти трудности во многом обусловлены ситуационным характером принимаемых решений по управлению ресурсами, требованием учитывать индивидуальные особенности заказов и ресурсов и специфические предметные знания, известные лишь исполнителям «на земле», и другие требования различных участников.

Эти проблемы характерны и для известных эвристических подходов, направленных на поиск допустимого решения: жадных алгоритмов локального поиска, генетических алгоритмов, муравьиной оптимизации и т.п. [52, 56, 73, 84, 86, 87, 114].

Можно утверждать, что классические математические методы комбинаторной оптимизации и различных эвристик, с точки зрения процессов принятия коллективных решений с многими участниками, по-прежнему отвечают **модели консонанса** (единства) ценностей, в которой всем участникам присущи одни и тех же критерии (ценности), в данном случае, пусть сколько угодно сложная, но одна целевая функция, как это было, например, во времена Госплана СССР.

Этой модели противостоит модель принятия коллективных решений **в условиях конфронтации,** как, например, во время войны или спортивных состязаний, а также жесткой конкуренции, когда у каждого участника есть свои

собственные ценности, и кто-то из сторон в результате своих планов действий и взаимодействия обязательно должен выиграть, а кто-то проиграть.

Однако, в последнее время в бизнесе и технологиях на первый план выходят идеи **поиска согласия (консенсуса),** который может строиться как по горизонтали, так и по вертикали, в ходе выработки и согласования коллективных решений, когда у всех участников ценности могут быть разные, но в рамках диалога стороны могут выявлять и разрешать конфликты и находить компромиссы путем переговоров и взаимных уступок, что отвечает растущей сетевой экономике, базирующейся на принципах p2p взаимодействия (от англ. «Peer-to-Peer» – «равный с равным» и «каждый с каждым») [50].

В этой модели, более отвечающей современной экономике разделяемых ресурсов (shared economy) сочетаются возможности как конкуренции, так и кооперации на рынке, что недавно метко названо новым термином «Coopetition» (от англ. «Competition» – конкуренция и «Cooperation» – кооперация). Например, небольшие грузовые компании могут конкурировать друг с другом на рынке, но при поступлении большого заказа объединять свои ресурсы. Или одна из таких компаний, имея все грузовики на юге, вдруг получает заказ на севере, где сосредоточены простаивающие грузовики другой компании – разумнее было бы разделить данный заказ со второй компанией и получить хотя бы 50% возможной прибыли, чем полностью потерять такой заказ.

1.5.8 Развитие методологии решения задач управления ресурсами в Самарской школе мультиагентных систем

Рассмотренные задачи построения «согласованных» расписаний в ходе коллективного принятия решений вызывают растущий интерес исследователей и разработчиков интеллектуальных систем к альтернативным подходам, моделям и методам, продуктам и технологиям в исследовании операций. Начиная с 80-90х гг. прошлого века все больше исследований посвящено разработке интеллектуальных систем управления ресурсами, моделирующих процесс поиска решений во взаимодействии участников этого процесса на основе мультиагентных технологий.

Важный технологический шаг в развитии указанного направления, связанного с переходом не просто к «распределенному», но «согласованному» управлению, был сделан в начале 2000-х годов в работах Самарской школы мультиагентных систем, посвященных моделям, методам и средствам коллективного принятия решений агентами для планирования ресурсов на основе виртуального рынка [7, 8, 31-33].

В этих целях была предложена концепция сетей потребностей и возможностей (ПВ-сетей) для управления ресурсами, предложен набор базовых классов и функций агентов потребностей и ресурсов, разработан набор методов взаимодействий для формирования согласия агентов на основе взаимных уступок и компенсаций, реализованы различные модели виртуального рынка и т.д. Агенты ПВ-сети могут активироваться как при возникновении событий, так и быть постоянно или временно проактивными, т.е. самостоятельно, без внешних побуждающих воздействий, искать возможности увеличения ценности своих решений.

Мультагентная система (МАС) для у для управления ресурсами базируется на теории сложных адаптивных систем и холоническом подходе, в котором в качестве базовых агентов ПВ-сети выделялись агенты заказов, продуктов и ресурсов, штабной агент. Разработанный подход был впервые реализован в 1999 году при создании мультиагентной системы управления поставками деревянных частей для оформления салонов автомобилей класса «люкс» на фабриках компании Фольксваген (Германия).

Развитие предлагаемого подхода позволило создать первые промышленные мультиагентные системы для управления танкерами (2002) [70], консолидацией грузовых перевозок (2004) [45], корпоративным такси (2006) [64], рекламными баннерами (2008) [9] и некоторые другие [94].

В этом подходе решение любой сложной задачи планирования и оптимизации ресурсов формируется как неулучшаемое «конкурентное равновесие» – баланс интересов, достигаемый на виртуальном рынке МАС за счет коллективного принятия решений и взаимодействия программными агентами

потребностей и возможностей, представляющими интересы, предпочтения и ограничения всех участников. Например, заказ «хочет» быть максимально быстро исполнен, ресурс «хочет» быть максимально загруженным, а продукт «хочет» меньше пролеживать. Итерационный процесс построения решения любой сложной задачи рассматривается как процесс самоорганизации агентов, способных самостоятельно принимать решения и путем переговоров согласованно выявлять и разрешать конфликты. Агент, пытающийся разрешить конфликт, может предложить другому агенту компенсировать потери, которые будут вызваны его переходом на новую позицию в расписании, возможно, с рекурсивным развертыванием этой ситуации на других конфликтующих агентов.

В развитие этой концепции и подхода к созданию МАС были предложены специализированные модели и методы решения задачи управления ресурсами в реальном времени для управления полными – Full Truck Load (FTL) и частично заполненными – Less Truck Load (LTL) грузовыми перевозками (2010) [105], движением поездов (2012) [95], фабриками (2014) [101] и проектами (2015) [106], грузопотоком Международной космической станции (2016) [96], мобильными бригадами (2017) [23], включая гибридную комбинацию классических и мультиагентных подходов.

В 2017-2019 гг. был сделан следующий шаг в развитии предлагаемого МАС подхода и предложены новые классы программных агентов для решения сложных задач управления производственными системами, в частности, агенты технологического процесса и каждой задачи, введена двухуровневая микроэкономика виртуального рынка и предложены индивидуальные функции удовлетворенности и бонусов-штрафов агентов, а также разработан метод «узкого звена» для гомеостатической регулировки агентами параметров планирования и методика расчета и прогноза рисков [107].

Переговоры агентов для определения направлений взаимных уступок в настоящее время реализуются на основе синхронных протоколов их взаимодействия по типу contract-net Сандхольма, расширенных функциями удовлетворенности и бонусов-штрафов, регулирующих их эластичность при

уступках для достижения баланса интересов агентов [81]. Кроме того, получило развитие применение онтологий для создания онтологически-настраиваемых мультиагентных систем для управления ресурсами [17, 65, 66, 108, 109].

Перспективы предлагаемого подхода связываются с развитием цифровых экосистем колоний интеллектуальных кибер-физических систем INDUSTRY 5.0 и умного Интернета вещей, которые призваны взаимодействовать и принимать согласованные решения с учетом их индивидуальных целей, предпочтений и ограничений всех участников [66, 109].

1.6 Выводы

1. Проведен системный анализ задач управления ресурсами крупных производственных предприятий, работающих на стадиях проектирования, производства и эксплуатации ВТИ по госконтрактам и гособоронзаказу, сформулированы их проблемы, особенности и ограничения.
2. Показано, что современные изменения в экономике, связанные с ростом сложности и неопределенности, динамикой изменения спроса и предложений, формированием новых цепочек кооперации и импортозамещением, порождают дополнительные новые вызовы к управлению ресурсами указанных предприятий, требующие согласованного позаказного и попроектного раздельного планирования и учета ресурсов на основе структуры ВТИ, чтобы «техника» и «экономика» предприятия не расходились и обеспечивался позаказный учет в разрезе как процессов и задач, так и частей изделий.
3. Проведен анализ применения существующих автоматизированных систем управления ресурсами, показаны их особенности и ограничения в части согласования производственных планов и работы в режиме реального времени. Результаты применения на предприятиях указанных автоматизированных систем управления ресурсами показывают, что эти системы, как правило, не учитывают структуру ВТИ и предлагают «каскадные» модели и методы решения задач управления ресурсами «сверху-вниз», в которых взаимодействия между подразделениями для согласования планов реализуются в ручном режиме, что приводит негативным последствиям.
4. Выделены основные уровни управления ресурсами крупных предприятий, включающие стратегическое планирование и оперативное управление ресурсами подразделений предприятия, которые могут быть дополнены уровнями тактического планирования, уровнем планов работников предприятия, планов субконтракторов и т.д.

5. Показано, что одной из центральных проблем современных предприятий является такое «интегрированное планирование», в котором отсутствуют механизмы согласования стратегических планов предприятия в целом и оперативных планов подразделений и подрядчиков в реальном времени.
6. С повышением сложности задач управления все большее значение приобретает теория сетевого автоматического управления, изучающая вопросы поведения и взаимодействия в сетевых структурах уровня одного предприятия, где взаимодействуют отдельные цеха и службы, и целых отраслей, где взаимодействуют предприятия. При этом на первый план выходят задачи достижения баланса интересов участников, формирования консенсуса и адаптивной синхронизации планов между узлами сети для нагона отставаний и достижения поставленных целей.
7. В теории активных систем сделан шаг применения сетевого управления к организационным системам. Там впервые появляется задача согласованного планирования «целого» и его «частей», а максимизация целевой функции системы в целом осуществляется за счет учета интересов отдельных «частей». Однако, за все результаты по прежнему отвечает только центр и переговоров между «целым» и «частями», а также между самими «частями», в рамках ТАС не предполагается. Свои ограничения имеют и аукционно-подобные схемы, которые в настоящее время не рассматривают формирование и синхронизацию планов прямо в ходе поступления запросов.
8. В качестве методической основы для создания многоуровневых систем управления ресурсами предлагается использовать модель ПВ-сети, которая ранее применялась к одиночным мультиагентным системам управления ресурсами. В ходе проведенного исследования не удалось найти примеры мультиагентных систем, которые работают как автономные и формируют собой более сложные сетевые «системы систем», но методология сетевого управления может быть использована и для этого нового класса систем.

2 ПРЕДЛАГАЕМЫЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ

В данной главе рассматриваются основные принципы предлагаемого сетевого подхода к управлению ресурсами и дается формализованная постановка задачи управления ресурсами крупных промышленных предприятий, работающих по основным стадиям жизненного цикла ВТИ, формулируются требования к АИС стадий управления проектами, производства и эксплуатации ВТИ. Математическая постановка задачи управления ресурсами предприятиями формулируется как многоуровневая многокритериальная задача с ситуативной составляющей, в рамках которой состав критериев и их важность могут меняться в ходе управления предприятием. Приводится описание разработанного метода сопряженного взаимодействия автономных интеллектуальных систем.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [14, 21, 25, 26, 60, 67, 76, 103, 104].

2.1 Основные принципы сетевого подхода к созданию автономных интеллектуальных систем управления ресурсами

Окружающие нас социально-технические системы становятся все более сложными и распределенными, причем «части» системы приобретают все большую автономность в принятии решений, т.е. изначально признается, что исполнители обладают собственными интересами и предпочтениями, и главным принципом управления становится согласованное взаимодействие между всеми участниками процессов управления как по «вертикали», так и по «горизонтали».

В качестве альтернативы «каскадному» управлению, которое присуще всем крупным организациям, в настоящей работе предлагается «распределенный» подход, в котором для каждого из уровней и для каждого из подразделений должна быть построена собственная интеллектуальная система, осуществляющая полный цикл управления ресурсами предприятия: распределение ресурсов, планирование и оптимизация заказов, мониторинг и контроль исполнения планов с автоматическим адаптивным перестроением планов в случае расхождения между

ожидаемыми и фактическими результатами. Такой подход позволит существенно разгрузить управленцев от рутинной работы и дать им возможность решать сложные и трудно формализуемые проблемы, которые пока могут решать только люди.

При этом ключевой проблемой распределенного управления предприятиями становится обеспечение автономности указанных систем в сочетании с непрерывной выработкой согласованных решений по планам, бюджетам и срокам заказов. Получается, что глобального детального плана предприятия в таких системах на любой момент времени как бы и не существует, но, с другой стороны, он образуется в ходе отработки запроса на его предъявление, через запросы к системам подразделений, вплоть до любого требуемого уровня. Вместе с тем, план, показанный в следующую секунду наблюдателю, уже становится не актуальным, т.к. он устаревает в момент своей «сборки», ведь в каждой системе подразделения в это время уже случаются события, которые нарушают соответствующие производственные планы и ведут к их адаптивному перестроению. Синхронизация планов при этом должна осуществляться в непрерывном режиме по выделенным в ходе анализа, наиболее частым, четырем типам событий, включая появление и отзыв новых заказов, недоступность и возврат в работу ресурсов, а также по факту выполнения задач подразделениями, которые могут быть выполнены раньше или позже планового срока.

Концептуальное различие между существующей «каскадной» и предлагаемой «распределенной» моделями управления ресурсами предприятия показано на рисунке 6.

В существующем «каскадном» подходе к управлению ресурсами предприятий имеется одна автоматизированная система управления ресурсами и жесткая иерархия уровней управления и соответствующих модулей: главный модуль дает планы как указания следующему уровню, а подчиненный в ответ дает отчеты по исполнению, редкое обратное поступление факта или других событий вызывает полный пересчет плана на верхнем уровне, с последующим новым каскадированием «сверху вниз» и так далее.

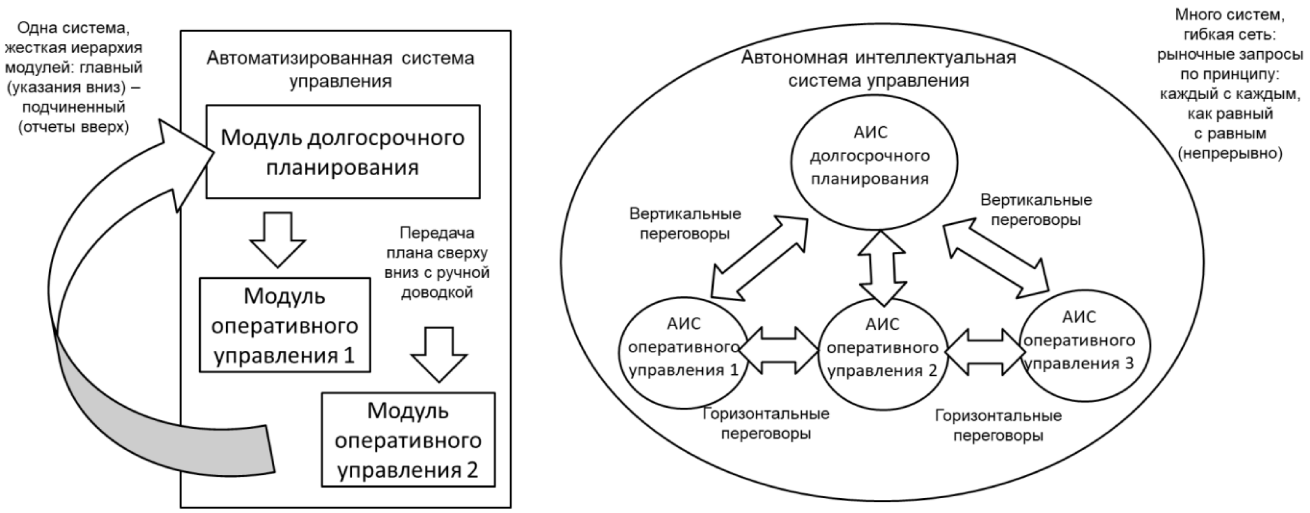


Рисунок 6 – Сопоставление каскадной и распределённой модели управления ресурсами

В предлагаемом «распределенном» подходе к управлению ресурсами предприятий имеется много автономных интеллектуальных систем (АИС) управления ресурсами нового класса и строится гибкая сеть АИС с рыночными запросами по сетецентрическому принципу p2p взаимодействий. В этом случае каждому уровню управления и каждому подразделению ставится в соответствие собственная АИС, способная к автоматическому принятию решений по управлению ресурсами и взаимодействию для проведения переговоров по синхронизации планов при появлении любых событий, часть которых «гасится» в соответствующих АИС, но те события, что «погасить» собственными ресурсами невозможно, инициируют пересогласования планов, чтобы обеспечить актуальность планов на любой момент времени.

Более детально основные отличия существующего «каскадного» и предлагаемого «распределенного» подхода к управлению ресурсами предприятий сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Основные отличия существующего «каскадного» и предлагаемого «распределенного» подхода к управлению ресурсами предприятий

№	Каскадная АСУ	Распределенная ИСУ
1	Автоматизированная система, состоящая из набора модулей различного уровня, ориентированная на учетные функции	Автономная интеллектуальная система из набора таких же автономных систем каждого уровня, ориентированных на планирование и контроль
2	Одна глобальная целевая функция ЦФ предприятия, интересы подразделений не принимаются во внимание	У каждого подразделения есть свои ЦФ, предпочтения и ограничения, позволяющие учесть интересы подразделений
3	Работает в заданном цикле (ритме): обычно 1 раз в месяц, реже – 1 раз в неделя, совсем редко – 1 раз день	Работает по любым событиям, синхронизируя планы (может много раз в день)
4	Формируется один глобальный план на предприятие, детализируемый и каскадируемый сверху-вниз на подразделения	Каждое подразделение строит свой собственный план в своей системе, которая самосинхронизируется с другими системами
5	Расчеты инициируются руководителями, экономистами и диспетчерами вручную по необходимости	Расчеты инициируются самими системами любого уровня в случае поступления событий в любой момент времени
6	Планы в каскадном подходе передаются «сверху-вниз» на	Планы формируются по запросам систем и взаимно влияют друг на

№	Каскадная АСУ	Распределенная ИСУ
	нижние подразделения без обратной связи	друга сверху-вниз и снизу-вверх, а также по горизонтали
7	Руководители подразделения или цеха доводят план вручную под свои критерии, предпочтения или ограничения	Системы адаптивно перестраивают планы и координируют их между собой
8	Нет постоянной обратной связи и адаптации между уровнями для синхронизации планов	Есть постоянная обратная связь и адаптация между уровнями для синхронизации планов
9	Факт поднимается наверх с заданной частотой (месяц, неделя или день)	Факт немедленно передается наверх для синхронизации планов в реальном времени, в результате планы всегда актуальные и согласованные
10	Непредвиденные события требуют полный пересчет планов сверху-вниз с их новым каскадированием вниз	Непредвиденные события адаптивно перестраивают планы своих подразделений и эскалируются в вышестоящее подразделение, когда не могут быть отработаны

Для создания АИС в ряде предшествующих работ были предложены онтологии и мультиагентные технологии, которые обеспечивают возможность адаптивного перестроения планов по событиям [14]. Решение задачи планирования на любом уровне при этом строится в ходе сопряженных взаимодействий программных агентов, изначально предложенных в [8], до достижения «конкурентного равновесия», что и позволяет адаптивно перестраивать планы в случае возникновения непредвиденных событий.

Вместе с тем, для случая, когда стратегический план строится на большой горизонт времени вперед и мало подвержен изменениям по событиям, целесообразно применять гибридный подход, формируя объемно-календарный план по мощностям на основе традиционных методов и различных эвристик, например, на основе методов линейного и динамического программирования, программирования в ограничениях и других методов [24]. Такого рода АИС могла бы дополнительно играть роль координатора, помогающего АИС нижнего уровня договариваться между собой.

В случае, когда решение задачи не достижимо из-за «комбинаторного взрыва» в связи с ростом размерности задачи и числа возможных вариантов, могут быть использованы различные эвристические методы [105]:

— жадные алгоритмы;

— генетические алгоритмы;

— нейросети и нечеткая логика;

— эвристические правила (Earliest Deadline First и пр.);

— метаэвристики локального поиска;

— Tabu Search и другие.

Гибридный подход для сочетания преимуществ классических и мультиагентных подходов уже был предложен ранее, например, в работе [77], но в этой работе решение применялось в рамках одной системы, сочетающей венгерский метод для начального решения транспортной задачи и мультиагентные технологии для дальнейшего адаптивного перестроения планов.

Вместе с тем, известные промышленные системы, использующие комбинаторное планирование и эвристики, строятся как централизованные, иерархические, последовательные системы, с каскадным планированием «сверху-вниз», в которых выполняется пакетное планирование, не реализуемое в реальном времени; нет возможности разрешить конфликты между отдельными заказами в общем пуле ресурсов и т.д.

В рассматриваемом подходе возникает новая задача конструирования распределенной АИС, построенной как сеть по принципу «системы систем» («роя

роев»), где каждая АИС может использовать свои собственные подходы к планированию или их комбинации – и такая задача ранее не решалась.

Подчеркнем, что указанная постановка задачи отличается от классической задачи разработки распределенных систем (distributed systems), начиная с классической работы [53], к которым в первую очередь, следует отнести интернет-системы с присущими им задачами организации веб-сервисов, масштабируемости, безопасности и т.п. В первую очередь, здесь рассматриваются задачи распределенной обработки и интеграции данных для ускорения процессов вычислений, но не процессы согласования решений. Более близким к рассматриваемой разработке является направление по созданию распределенных систем поддержки принятия решений (distributed decision making systems) [98], но здесь решается задача иерархического принятия решений по уровням управления. Задача распределенного сетевого принятия решений в производстве еще пока остается в направлениях перспективных исследований [90], что определяет новизну предлагаемого подхода.

Таким образом, в предлагаемом подходе распределенного управления требуется перейти от одной классической пакетной системы, работающей в недельно-месячном цикле без обратной связи – к распределенной «системе систем» АИС, работающих в реальном времени с постоянно действующей обратной связью, инициируемой поступающими событиями.

2.2 Постановка задачи распределенного управления ресурсами

Анализ содержательной постановки задачи распределенного управления ресурсами крупных промышленных предприятий, работающих по основным стадиям жизненного цикла ВТИ, показывает, что целевая функция может быть самоподобной, рекурсивно разворачиваясь и детализируясь с некоторыми вариациями на различных уровнях, от уровня предприятия в целом – до уровня каждого конкретного подразделения и его сотрудника.

Так, на уровне предприятия в целом обычно требуется выполнить все заказы в срок (задержка всегда грозит штрафными санкциями), с высоким качеством (что

определяется компетенциями сотрудников, участвующих в реализации производственного заказа, проекта НИОКР или задач эксплуатации), с минимальными затратами (для обеспечения максимальной прибыли предприятия), а также с минимальными рисками (обычно, срыва сроков заказов или появления брака в изделии). На уровне подразделений к этим критериям принятия решений добавляется максимальная загрузка персонала (для обеспечения выплаты зарплаты в срок), необходимость развития компетенций сотрудников (для подготовки к ожидаемым заказам), минимизация числа переналадок оборудования и т.д.

Таким образом, каждая АИС на своем уровне призвана решать многоуровневую многокритериальную задачу планирования и оптимизации ресурсов с определенной ситуативной составляющей, в рамках которой состав выбираемых критериев, предпочтений и ограничений, а также их важность, могут меняться в ходе работы предприятия.

В общем случае, формализованная задача формирования плана производственного предприятия, деятельность которого связана с выполнением заказов имеющимися производственными ресурсами, заключается в построении сбалансированного по срокам и загрузке ресурсов производственного расписания.

Под заказами будем понимать комплексную задачу с ограничениями по срокам, состоящую из набора связанных между собой отдельных задач (работ), исполнителем которой является организация. Каждая отдельная задача относится к определенному классу, требует определенных ресурсов и может быть реализована исполнителем. Под исполнителем будем понимать некоторую структурную единицу (например, подразделение организации или внешнюю организацию), обладающую ресурсами и способную к реализации определенного класса задач.

Задача формирования производственного расписания организации заключается в определении исполнителей, сроков начала и завершения выполнения каждой задачи с учетом имеющихся ресурсов и последовательности выполнения по производственному процессу.

Такие задачи ставятся в рамках исследований и работ [5, 52, 69, 73, 114], однако они не учитывают распределенный характер принятия решения и наличие индивидуальных особенностей заказов и ресурсов.

Для производственных предприятий характерно строить не один единый план, а комплекс взаимосвязанных планов, формируемых в соответствии с организационной структурой предприятия и сети кооперации.

Введем исходные множества.

Множество заказов предприятия по изделиям ВТИ $P(t) = \{p_k\},\ k = \overline{1..K}$, где K – количество заказов предприятия, образующих производственную программу предприятия.

Множество работ заказа (операций) $W^k(t) = \{w_i^k\},\ i = \overline{1..I}$, где I – количество операций k-го заказа. Работы заказа определяются либо в соответствии с процессами реализации (бизнес-процессы и технологические процессы), либо заданы экспертным образом.

Множество исполнителей $Dep(t) = \{d_j\}, j = \overline{1..J}$, где J – количество исполнителей, участвующих в реализации производственной программы предприятия.

Множество трудовых ресурсов исполнителя $EmpR^j(t) = \{empR_m^j\}, m = \overline{1..M}$, где M – количество трудовых ресурсов j-го исполнителя. Под трудовыми ресурсами понимается персонал предприятия.

Множество технических ресурсов исполнителя $TechR^j(t) = \{techR_q^j\}, q = \overline{1..Q}$, где Q – количество технических ресурсов j-го исполнителя. Под техническими ресурсами понимается специализированное оборудование, средства технологического оснащения и другие технические средства, применяемые при выполнении заказов.

Множество компетенций (качеств) трудовых и технических ресурсов $C(t) = \{c_g\},\ g = \overline{1..G}$, где G – количество компетенций ресурсов.

Множество видов работ $Wt = \{wt_z\},\ z = \overline{1..Z}$, где Z – количество видов работ.

Множество временных интервалов $T = \{t_h\},\ h = \overline{1..H}$, где H – количество интервалов, определяющее горизонт планирования. Каждый интервал t_h определен границами: $sartt_h$ и $finisht_h$, $finisht_h > sartt_h$.

Введем понятия планов предприятия: укрупненного плана предприятия $Plan_{\text{УП}}$ и множества оперативных планов подразделений исполнителей $Plan_{\text{Оу}} = \{plan^j_{\text{Оу}}\}$, где $plan^j_{\text{Оу}}$ – оперативный план j-го подразделения. Укрупненный и оперативные планы зависят от начальных состояний $S(t)$ и $S(t)^j$, определенных в начальный момент времени $t = t^*$:

$$S(t^*) = \{\, P(t^*), W(t^*), Dep(t^*), EmpR(t^*),\ \ TechR(t^*)\}, \tag{1}$$

$$S(t^*)^j = \{\ P(t^*)^j, \quad W(t^*)^j,\ Dep(t^*)^j, \quad EmpR^j(t^*), \quad TechR^j(t^*)\ \}. \tag{2}$$

Оценка формируемых планов производится по набору критериев, в числе которых могут быть сроки выполнения заказов, себестоимость и прибыль, качество результатов, уровень загрузки ресурсов, риски срывов сроков и другие.

Обозначим эти критерии: для укрупненного плана $KPI_{\text{У П}} = \{F_1, F_2, .., F_x\}$, для оперативных планов подразделений $KPI_{\text{О У}}{}^j = \{F_1{}^j, F_2{}^j, .., F_y{}^j\}$.

Укрупненный план предприятия $Plan_{\text{УП}}(t)$ задается в виде набора:

$$Plan_{\text{УП}}(t) = \{S(t), P(t), W(t), D(t), EmpR(t),\ \ TechR(t), KPI_{\text{У П}}(t)\} \quad (3).$$

Оперативный план управления j-м подразделением $Plan^j_{\text{Оу}}$ задается следующим образом:

$$Plan^j_{\text{Оу}}(t) = \{\ S(t)^j,\ P(t)^j,\ W(t)^j,\ D(t)^j,\ EmpR^j(t),\ TechR^j(t),\ KPI_{\text{О У}}(t)^j\ \}. \quad (4)$$

Предполагается, что подразделения предприятия могут получать заказы от центра предприятия, а также часть заказов может приходить с рынка. На каждом уровне у каждого подразделения может быть множество своих критериев, по которым формируются расписания, причем состав и важность этих критериев могут быть разными, и они могут ситуативно пересматриваться в ходе работ.

Пусть целевая функция на каждом уровне предприятия будет иметь вид взвешенной свертки или будет введено ранжирование заданных критериев. При этом сами критерии зависят от момента времени *t*.

Тогда целевая функция для укрупненного плана задается выражением

$$F_{\text{УП}}(t) = \sum_{x}^{X} \omega_x KPI_{\text{УП}_x}(t), \tag{5}$$

где $KPI_{\text{УП}_x}$ – показатель по критерию x= $\overline{1..\text{X}}$, ω_x – весовой коэффициент значимости критерия, такой что $0 \leq \omega_x \leq 1$ и $\sum_{x=1}^{X} \omega_x = 1$.

Аналогично задается целевая функция для каждого оперативного плана управления подразделения:

$$F_{\text{ОУ}}(t)^j = \sum_{y}^{Y} \varphi_{jy} KPI_{\text{ОУ}}{}^j{}_y(t), \tag{6}$$

где $KPI_{\text{ОУ}}{}^j{}_y$ – показатель по критерию $y = \overline{1..\text{Y}}$, для *j-ого* подразделения. φ_{jy} – весовой коэффициент значимости критерия, такой что $0 \leq \varphi_{jy} \leq 1$ и $\sum_{y}^{Y} \varphi_{jy} = 1$.

Оперативные планы подразделений строятся по поступлению заказа от центра предприятия путем детализации фрагментов укрупненного плана, и очевидно, что в результате такой детализации и наложения на реально доступные ресурсы подразделения (цеха) могут возникать расхождения между ними.

Введем понятие *D(t)* меры расхождения между укрупненным планом центра и оперативными планами подразделений:

$$D\left(t, KPI_{\text{УП}}, KPI_{\text{ОУ}}{}^1 \cup KPI_{\text{ОУ}}{}^2 \cup .. \cup KPI_{\text{ОУ}}{}^J\right). \tag{7}$$

Мера расхождения *D* рассматривается как вектор, который рассчитывается на момент времени *t* на основании детализации укрупненного плана на уровне подразделений и должен быть максимально согласован с ним, чтобы гарантировать исполнение каждого заказа в бюджеты и сроки. Процедура расчета меры расхождения *D* задается алгоритмически для численной оценки расхождения по каждой компоненте. Наличие расхождения между планами будем называть рассинхронизацией планов центра и подразделений, появление которого должно

вызывать запуск метода, позволяющего привести состояние системы к минимально допустимому отклонению:

$$D(t) \to min \tag{8}$$

Таким образом, рассматриваемая задача многоуровневого управления ресурсами является многокритериальной и многоуровневой, допускающей ситуативное изменение состава и весов критериев в ходе выполнения заказов:

$$\begin{cases} F_{\text{УП}}(t) \to max \\ F_{\text{0У}}{}^{1}(t) \to max \\ \quad .. \\ F_{\text{0У}}{}^{J}(t) \to max \end{cases} \tag{9}$$

Центр предприятия и его подразделения стремятся максимизировать свои показатели, но при этом должны минимизировать расхождение в планах.

В ходе работы АИС управления ресурсами на каждом шаге *t* могут возникать непредвиденные события *Event*, которые должны запускать метод перестроения планов, чтобы вернуть их к согласованным сроками и бюджетам, но если это невозможно, то либо попытаться решить проблему по горизонтали путем построения плана нагона или перестроить вышестоящие планы. В этой связи такой метод должен обеспечивать горизонтальные и вертикальные взаимодействия АИС для их сопряжения. Главной задачей АИС на произвольном шаге *t* при возникновении возмущения *Event*(*t*), в числе которых могут быть поступление нового заказа или недоступность ресурса, факт задержки или опережения в выполнении работ, будет минимизация расхождения.

Для принятия решений при формировании и сопряжении планов предлагается использовать модель виртуального рынка, в рамках которой проводить аукционо-подобные переговоры для определения подразделений, которые могут наилучшим образом выполнять работы по заданному критерию, и адаптивного перестроения их производственных планов. Состояние системы, при котором ни одно из подразделений не может улучшить свое состояние по заданным критериям, будем называть «конкурентным равновесием» (консенсусом) на виртуальном рынке системы, следуя работам Y. Shoham и K. Leyton-Brown.

Приведем дополнительные множества, соотношения для определения критериев целевых функций и ограничений.

Рассматриваемые заказы и работы имеют наборы характеристик и параметров.

Для каждого заказа p_k определен следующий набор параметров:

— $revenueP_k$ – максимальная сумма затрат на ресурсы (выраженная в деньгах), $revenueP_k \in R$;

— $priorityP_k$ – приоритет («вес») заказа, $revenueP_k \in R$;

— $minStartP_k$, $maxStartP_k$ – требуемые сроки начала заказа, где $minStartP_k < maxStartP_k$.

— $minFinishP_k$, $maxFinishP_k$ – требуемые сроки завершения заказа, где $minFinishP_k < maxFinishP_k$.

Для каждой работы w_i k-ого заказа определен следующий набор параметров:

— $amountW_i^k$ – объем работы (трудоемкость), необходимый для ее реализации, $amountW_i^k \in R$, $amountW_i^k \geq 0$;

— $startW_i^k$, $finishW_i^k$ – начало и завершение работы *i-ой* работы *k-го* заказа.

— $minDurationW_i^k$, $maxDurationW_i^k$ – минимальная и максимальная технологическая длительность выполнения работы, где $minDurationW_i^k \in R$, $maxDurationW_i^k \in R, minDurationW_i^k > 0$, при этом $maxDurationW_i^k \geq minDurationW_i^k$;

— $minEmpCountW_i^k$, $maxEmpCountW_i^k$ – минимальное и максимальное количество исполнителей, которые могут быть привлечены для выполнения работы, где $minEmpCountW_i^k \in \mathrm{N}_0, maxEmpCountW_i^k \in \mathrm{N}_0$, при этом $maxEmpCountW_i^k \geq minEmpCountW_i^k$;

— $minTechCountW_i^k$, $maxTechCountW_i^k$ – минимальное и максимальное количество технических ресурсов, которые необходимы и максимально возможны для реализации работы, где $minTechCountW_i^k \in \mathrm{N}_0, maxTechCountW_i^k \in \mathrm{N}_0$, при этом $maxTechCountW_i^k \geq minTechCountW_i^k$;

— $REC\left\{rC_{i,g}^{k}\right\}$, где $i = 1..I, g = 1..G$ – требуемый уровень компетенции *g*, которой должен обладать ресурс, для реализации *i-ой* работы *k-го* заказа. $rC_{i,g}^{k} \in R$;

— Между работами *k-го* заказа заданы отношения следования $WR = \left\{wr_{x,y}^{k}\right\}, x = 1..I, y = 1..I, x \neq y$. Каждый элемент $wr_{x,y}^{k} = [1..4]$. Данное отношение означает, что работа *y*, предшествует выполнению работе *x*.

При этом различается 4 типа отношения следования:

1 – означает тип отношения: «Окончание-Начало»;

2 – означает тип отношения: «Окончание-Окончание»;

3 – означает тип отношения: «Начало-Окончание»;

4 – означает тип отношения: «Начало-Начало».

Учет данных отношений накладывает определённые ограничения на варианты решений, которые будут рассмотрены в соответствующем разделе.

Подразделения-исполнители описываются наборами ресурсов, которые имеют различные характеристики и параметры.

Каждый трудовой ресурс $empR_{m}^{j}$ исполнителя d_j характеризуются следующими параметрами:

— $rateEmp_{m}^{j}, rateEmp_{m}^{j} \in R, rateEmp_{m}^{j} > 0$ – стоимость за единицу времени использования ресурса $empR_{m}^{j}$ при выполнении работы;

— $idleRateEmp_{m}^{j}$ – стоимость за единицу времени простоя ресурса $empR_{m}^{j}$. $idleRateEmp_{m}^{j} \in R, idleRateEmp_{m}^{j} > 0$;

— $EmpCal_{m}^{j} = \left\{empCal_{m,h}^{j}\right\}$, где $m = 1..M, h = 1..H$.

$empCal_{m,h}^{j} \in R, empCal_{m,h}^{j} > 0$; Означает доступность *m-го* трудового ресурса *j-го* исполнителя в единицах работы (например, часах) в заданный интервал времени *h*. Данное множество определяет календарь работы трудового ресурса.

— $PEmp^j = \{pEmp^j_{m,z}\}$, где $m = 1..M, z = 1..Z. pEmp^j_{m,z} \in R, pEmp^j_{mg} > 0$.

Означает производительность *m-го* трудового ресурса *j-го* исполнителя по виду работ z.

— $CEmp^j_m = \{cEmp^j_{m,g}\}$, где $m = 1..M, g = 1..G.\quad cEmp^j_{m,g} \in R, cEmp^j_{m,g} > 0$.

Означает уровень владения *m-го* трудового ресурса *g-ой* характеристикой.

Каждый технический ресурс $techR^j_q$ исполнителя d_j характеризуются следующими параметрами:

— $rateTech^j_q, rateTech^j_q \in R, rateTech^j_m > 0$ – стоимость за единицу времени использования ресурса $techR^j_q$ при выполнении работы;

— $TechCal^j_q = \{techCal^j_{q,h}\}$, где $q = 1..Q, h = 1..H$.

$techCal^j_{q,h} \in R, techCal^j_{q,h} > 0$; Означает доступность *q-го* технического ресурсов *j-го* исполнителя в единицах работы (например, часах) в заданный интервал времени *h*. Данное множество определяет календарь работы технического ресурса.

— $CTech^j = \{cTech^j_{q,g}\}$, где $q = 1..Q, g = 1..G.\qquad cTech^j_{q,g} \in R, cTech^j_{q,g} > 0$.

Означает уровень владения *q-го* технического ресурса *g-ой* характеристикой.

В рамках модели требуется построить расписание выполнения всех работ w^k_i всех заказов K ресурсами $EmpR^j$ и $TechR^j$ исполнителей *D* на горизонте *H*.

Требуется определить, в какие моменты t_h в каком объеме *v* должны быть задействованы трудовые ресурсы $empR^j$ и вовлечены технические ресурсы $techR^j$ исполнителя d_j для реализации *i-ой* работы *k-го* заказа. Для этого необходимо решить задачу календарно-сетевого планирования с ограничением по ресурсам и определить совместно с задачей назначения ресурса $empR^j$ и $techR^j$ на выполнение работ с учетом их характеристик.

Требуется сформировать назначения трудовых ресурсов $EmployeePlan = \{empP_a\}$, где $a = 1..A$, *A* – количество элементов расписания для трудовых ресурсов всех исполнителей.

Каждый элемент $empP_a$ представляет собой кортеж:

$empP_a = \langle planStart, planFinish, v, empR_m^j, w_i^k \rangle$, где

— $planStart$ – запланированное время начала работ, $planStart \in H$,

— $planFinish$ – запланированное время завершения работ, $planFinish \in H$,

$empV_{h,i^k,m^j}$ – объем запланированных работ в интервал h на m-ый трудовой ресурс j-го подразделения по i-ой работе k-го заказа с учетом его производительности по виду работ ,$empV_{h,i^k,m^j} \in R, empV_{h,i^k,m^j} \geq 0$,

$empR_m^j$– назначенный *m-й* трудовой ресурс *j-го* исполнителя,

— w_i^k– выполняемая *i-ая* работа *k-го* заказа.

Требуется сформировать множество назначений технических ресурсов $TechPlan = \{techP_b\}$, где $b = 1..B$, B – количество элементов расписания для технических ресурсов всех исполнителей.

Каждый элемент $techP_b$ представляет собой кортеж:

— $techP_b = \langle planStart, planFinish, v, techR_q^j, w_i^k \rangle$, где

— $planStart$ – запланированное время начала работ, $planStart \in H$,

— $planFinish$ – запланированное время завершения работ, $planFinish \in H$,

— $techR_q^j$– назначенный *q-й* технический ресурс *j-го* исполнителя,

— $techV_{h,i^k,q^j}$ - объем запланированных работ в интервал h на q-ый технический ресурс j-го подразделения по i-ой работе k-го заказа.

Признак, того, что i-ая работа k-го заказа назначена на m-й трудовой ресурс j-го подразделения определяется через функцию:

$$IsAssigned(i^k, m^j) = \begin{cases} 1, \text{если } \exists\, empV_{h,i^k,m^j} > 0 \mid \forall\, \mathrm{h} \in \mathrm{H}, empV_{h,i^k,m^j} \in EmpV. \\ 0, \text{иначе.} \end{cases}$$

Введем соотношения для расчетов показателей модели и целевых функций.

Сроки начала выполнения $startW_i^k$ работы w_i^k будут определяться:

$$startW_i^k = \min_{EmployeePlan}(planStart \mid w_i^k \in W^k).$$

Сроки завершения выполнения $finishW_i^k$ работы w_i^k будут определяться:

$$finishW_i^k = \max_{EmployeePlan}(planFinish \mid w_i^k \in W^k).$$

Длительность выполнения i-ой работы k-го заказа будет определяться из соотношения:

$$durationW_i^k = finishW_i^k - startW_i^k.$$

Количество назначенных исполнителей для выполнения работы будет определяться из соотношения:

$$empCountW_i^k = \sum_j^J \sum_m^M IsAssigned(i^k, m^j).$$

Загрузка m-го трудового ресурса j-ого подразделения на всем горизонте H определяется из соотношения:

$$EmpUtilization_m^j = \sum_h^H \sum_k^K \sum_i^I \frac{empV_{h,i^k,m^j}}{empCal_{m,h}^j}.$$

Простой m-го трудового ресурса j-ого подразделения на всем горизонте H определяется из соотношения:

$$EmpIdleTime_m^j = \sum_h^H \sum_k^K \sum_i^I empCal_{m,h}^j - empV_{h,i^k,m^j}.$$

Загрузка трудовых ресурсов j-ого подразделения определяется из соотношения:

$$EmpUtilizationD^j = \sum_m^M EmpUtilization_{m.}^j$$

Загрузка q-го технического ресурса j-ого подразделения на всем горизонте H определяется из соотношения:

$$TechUtilization_q^j = \sum_h^H \sum_k^K \sum_i^I \frac{techCal_{q,h}^j - techV_{h,i^k,q^j}}{techCal_{q,h}^j}.$$

Загрузка технических ресурсов j-ого подразделения определяется из соотношения:

$$TechUtilizationD^j = \sum_{q}^{Q} TechUtilization_q^j.$$

Суммарные затраты i-ой работы k-го заказа на привлечение ресурсов будут определяться из соотношения:

$$CostW_i^k = \sum_{h}^{H}\left(\sum_{m}^{M}\sum_{j}^{J} empV_{h,i^k,m^j} \times rateEmp_m^j\right) + \left(\sum_{q}^{Q}\sum_{j}^{J} techV_{h,i^k,q^j} \times rateTech_q^j\right).$$

Суммарные затраты k-го заказа на привлечение ресурсов будут определяться из соотношения:

$$CostP^k = \sum_{i}^{I} CostW_i^k.$$

Тогда прибыль k-го заказа будет определяться из соотношения:

$$ProfitP^k = maxCostP^k - CostP^k.$$

Суммарные затраты от простоя трудовых ресурсов j-го подразделения будут определяться из соотношения:

$$EmpIdleCost^j = \sum_{m}^{M} EmpIdleTime_m^j \times idleRateEmp_m^j.$$

Максимальное значение уровня компетенции среди трудовых ресурсов будет определять через функцию $MaxComp(g)$, определенную соотношением:

$MaxComp(g) = \max_{CompEmp}\left(compEmp_{m,g}^j\right)$ для любого трудового ресурса m любого подразделения j.

Уровень качества назначения исполнителей на выполнение i-ой работы k-го проекта определяется из соотношения:

$$QualityW_i^k = \sum_g^G \sum_j^J \sum_m^M IsAssigned(i^k, m^j)$$
$$\times \left(\frac{1}{2} + \frac{compEmp_{m,g}^j - requiredComp_{i,g}^k}{2MaxComp(g)} \right).$$

Показатель уровня качества выполнения k-го заказа определяется из соотношения:

$$QualityP^k = \frac{\sum_i^I QualityW_i^k \times amountW_i^k}{\sum_i^I amountW_i^k}.$$

В работе рассматривается 4 основных критерия, применимых для укрупненного и оперативного плана: F_{dates} – соблюдение директивных сроков выполнения заказов, $F_{quality}$ – выполнение заказов с максимальным качеством, $F_{utilization}$ – максимизация загрузки ресурсов предприятия, F_{profit} – повышение прибыльности предприятия. Тогда вектор критериев для укрупненного плана примет следующий вид: $KPI_{\text{УП}} = \{F_{dates}, F_{quality}, F_{utilization}, F_{profit},\}$, а для плана оперативного управления *j-го* подразделения следующий вид: $KPI_{\text{ОУ}}{}^j = \left\{F_{dates}{}^j, F_{quality}{}^j, F_{utilization}{}^j, F_{profit}{}^j\right\}$. Весовые коэффициенты критериев целевой функции укрупнённого плана и оперативных планов задаются экспертами или руководством.

Приведем соотношения для определения показателей планов:

$$\text{F}finishP_k = \begin{cases} 0, finishP_k \leq minFinishP_k \\ \dfrac{finishP_k - minFinishP_k}{maxFinishP_k - minFinishP_k}, \quad minFinishP_k \leq finishP_k \leq maxFinishP_k \\ 0, finishP_k \geq maxFinishP_k \end{cases}$$

$FfinishP_k$ – означает функцию удовлетворенности своевременным завершением заказа.

$$FstartP_k = \begin{cases} 0, startP_k \leq minStartP_k \\ \dfrac{startP_k - minStartP_k}{maxStartP_k - minStartP_k}, \quad minStartP_k \leq startP_k \leq maxStartP_k \\ 0, startP_k \geq maxStartP_k \end{cases}$$

$FstartP_k$ – означает функцию удовлетворенности своевременным началом заказа

$$\boldsymbol{F_{dates}}(\mathrm{t}) = \frac{1}{2}\sum_{k}^{K} \beta_1 \times FfinishP_k + \beta_2 \times FstartP_k \tag{10}$$

где β_1 и β_2 – важность соблюдения сроков начала выполнения работ и завершения соответственно. $\beta_1 + \beta_2 = 1$.

$$\boldsymbol{F_{utilization}}(\mathrm{t}) = \frac{1}{J}\sum_{j}^{J}\sum_{m}^{M} EmpUtilization_m^j. \tag{11}$$

$$\boldsymbol{F_{quality}}(\mathrm{t}) = \frac{1}{K}\sum_{k}^{K} \frac{\sum_i^I QualityW_i^k \times amountW_i^k}{\sum_i^I amountW_i^k}. \tag{12}$$

$$\boldsymbol{F_{profit}}(\mathrm{t}) = \frac{\sum_k^K ProfitP^k - \sum_j^J EmpIdleCost^j}{\sum_k^K revenueP^k}. \tag{13}$$

На множество вариантов решений для формирования расписания предприятия накладывается ряд ограничений.

Формируемые планы должны удовлетворять ограничениям:

1. Весь объем работ по заказу должен быть запланирован:

$$amountW_i^k - \sum_{h}^{H}\sum_{j}^{J}\sum_{m}^{M} empV_{h,\, i^k, m^j} = 0,\ \forall w_i^k. \tag{14}$$

2. Количество привлекаемых ресурсов для реализации работ должно находиться в требуемых границах:

$$minEmpCountW_i^k \le empCountW_i^k \le maxEmpCountW_i^k. \tag{15}$$

3. Длительность выполнения i-ой работы должна находиться в заданных границах требований:

$$minDurationW_i^k \le durationW_i^k \le maxDurationW_i^k. \tag{16}$$

4. Ограничение на качества трудового ресурса:

$$rComp_{i,\,g}^k - compEmp_{m,g}^j \ge 0, \tag{17}$$

где $\forall g \in G$, $\exists i^k \in W^k$, $m^j \in M^j \mid IsAssigned\left(i^k, m^j\right) = 1$.

5. Ограничение на качества технического ресурса:

$$rComp_{i,g}^{k} - cTech_{q,g}^{j} > 0, \tag{18}$$

где $\forall g \in G,\ \exists\ i^k \in W^k,\ q^j \in Q^j \mid IsAssigned\left(i^k, q^j\right) = 1.$

6. Ограничение по доступности трудовых ресурсов и технических ресурсов:

$$\begin{gathered} empCal_{m,h}^{j} - \ \sum_{j}^{J}\sum_{m}^{M} empV_{h,i^k,m^j} \geq 0, \\ techCal_{q,h}^{j} - \ \sum_{j}^{J}\sum_{m}^{M} techV_{h,i^k,q^j} \geq 0. \end{gathered} \tag{19}$$

7. Ограничение на экономическую целесообразность планов:

$$\sum_{k}^{K} ProfitP^k - \sum_{j}^{J} EmpIdleCost^j > 0. \tag{20}$$

8. Ограничение на порядок выполнения работ:

$$\begin{cases} finishW_y^k \geq startW_x^k\ , \text{ если } wr_{x,y}^k = 1, \\ finishW_y^k \leq finishW_x^k\ , \text{если } wr_{x,y}^k = 2, \\ startW_y^k \geq finishW_x^k\ , \text{если } wr_{x,y}^k = 3, \\ startW_y^k \geq startW_x^k, \text{если } wr_{x,y}^k = 4. \end{cases} \tag{21}$$

Таким образом ***задача многоуровневого сопряженного управления ресурсами при производстве ВТИ*** формулируется следующим образом: в момент времени $t = t^*$ известно начальное состояние заказов и ресурсов предприятия (1), заданий и ресурсов подразделений (2). Необходимо сформировать укрупненный план предприятия (3) и множество детальных планов подразделений (4), максимизируя частную целевую функцию укрупнённого плана и частные целевые функций планов оперативного управления (5) каждого участвующего подразделения (6), в качестве главного критерия минимизируя расхождения между указанными планами (7), с учетом ограничений (14)-(21).

Таким образом, главная особенность постановки рассматриваемой задачи состоит в многоуровневой декомпозиции задач управления проектами или цехами производственных подразделений, рекурсивно разворачиваемых в ходе построения сети АИС от уровня стратегического планирования на большой горизонт времени

– до уровня отдельных подразделений для исполнения подготовленных планов в заданные сроки и бюджеты.

2.3 Метод решения задачи распределенного управления ресурсами

Для решения задачи предлагается модифицированный метод сопряженных взаимодействий в мультиагентной сети потребностей и возможностей (ПВ-сети), позволяющий создать многоуровневую «площадку» взаимодействия отдельных АИС на основе разработанной сетецентрической платформы.

В этих целях проведена модификация базовых классов агентов ПВ-сети, моделей и методов их функционирования, а также протоколов взаимодействия для поддержки протоколов многоуровневого вертикального и горизонтального p2p взаимодействия экземпляров АИС в реальном времени. Разработан также метод стратегического планирования ресурсов на основе метода ветвей и границ для построения долгосрочных планов, что позволяет дополнить мультиагентные технологии оперативного управления ресурсами в реальном времени.

Для решения поставленной задачи разработан ***метод многоуровневых сопряженных взаимодействий АИС*** для управления ресурсами предприятия:

1. Производственная программа (множество заказов *P(t)*) предприятия формируется в виде сквозных (вовлекающих все подразделения) сетевых планов-графиков работ (СПГ) по разработке, производству или эксплуатации ВТИ, заданных множеством мероприятий $W^k(t)$ и графом связей WR.
2. Спецификация работ заказов или проектов производится в терминах прикладной онтологии управления ресурсами на базе схемы деления ВТИ.
3. В АИС СП задается множество критериев $KPI_{\text{УП}}$ и производится настройка целевой функции $F_{\text{УП}}(t)$ заданием экспертами весов критериев ω_x.
4. В АИС СП решается задача сводного укрупненного объемно-календарного планирования всего набора СПГ в едином пуле ресурсов предприятия, производится балансировка загрузки ресурсов. В результате формируется непротиворечивый по срокам и ресурсам укрупненный план $Plan_{\text{УП}}$.

5. На основании $Plan_{\text{УП}}$ для каждого подразделения (исполнителя) формируются задания (исходные данные) для построения детальных планов $Plan_{\text{УП}} \rightarrow \{\{P(t)^1\},..,\{P(t)^j\}\}$, которые передаются в виде заказов нижестоящим АИС ОУ ($w_i^{k^{\text{УП}}}(t) \rightarrow P_k{}^{\text{ОУ}}(t)$).
6. В АИС ОУ каждого исполнителя производится детализация заданий до уровня задач сотрудников и оборудования – формируется множество мероприятий $W^k(t)$ и граф связей WR.
7. В АИС ОУ каждого подразделения задается множество критериев $KPI_{\text{ОУ}}$ и производится настройка целевой функции $F_{\text{ОУ}}(t)^j$ путем задания экспертами уровня подразделения весов φ_{jy}.
8. На основании онтологической модели подразделения определяются множества $EmpR^j(t), TechR^j(t)$ и их характеристики: $EmpCal_m^j, PEmp^j, CEmp_m^j, TechCal_q^j, CTech_m^j$.
9. В каждом АИС ОУ решается задача оперативного планирования задач в едином пуле доступных сотрудников и оборудования с учетом их ограничений, в результате формируется $Plan_{\text{ОУ}}^j(t)$ и рассчитываются значения показателей $KPI_{\text{ОУ}}{}^j$.
10. Определяется значение меры рассогласования *D* между оперативным планом $Plan_{\text{ОУ}}^j$ и укрупненным планом $Plan_{\text{УП}}$ по каждому компоненту ЦФ.
11. Определяется критерий с максимальным значением *D*. Для данного критерия из базы знаний выбирается список рекомендаций, которые могут улучшить показатель. Выбирается рекомендация, минимально ухудшающая показатель, по которому отклонение относительно *D* наименьшее, т.е. где есть максимальный запас ресурсов. Выбранная рекомендация применяется к локальному плану и выполняется итерация перестроения *iter* для $Plan_{\text{ОУ}}^j$.
12. Производится расчет показателей $KPI_{\text{ОУ}}{}^{j^{iter}}$ и D^{iter}. Если $D^{iter} < D^{iter-1}$, рекомендация фиксируется, иначе – отклоняется и система приходит к предыдущему состоянию. Процесс повторяется с шага 10.

13. Если за заданное число итераций *iterMax*, значение *D* уменьшить не удалось, инициируются горизонтальные и вертикальные взаимодействия для сопряжения планов, например, путем увеличения ресурсов подразделения или коррекции желаемых сроков укрупненного плана на основе экспертных рекомендаций, заданных в онтологии (ввести дополнительную смену и др.).
14. В АИС СП для минимизации *D*, аналогично, как и в АИС ОУ, сначала производится корректировка весов целевой функции, и далее изменяются параметры ресурсов или заказов посредством рекомендаций.
15. Работа метода завершается, когда ни одна из АИС более не может улучшить свой план и общий план предприятия в целом, т.е. достигнуто новое «конкурентное равновесие» (консенсус).

Данный метод позволяет как решать задачу формирования планов в момент *t,* так и обеспечивать его корректировку в случае возникновения событий *Event(t)*. Тогда локализуется место возникновения события и производятся локальные перестроения $Plan_{\text{ОУ}}^{j}$ и, при необходимости, $Plan_{\text{УП}}$.

Разработанный метод может быть применим на любом уровне управления ресурсами предприятий, работающих на основных этапах жизненного цикла ВТИ.

2.4 Функции и протоколы взаимодействия АИС

АИС-Стратегического планирования предприятия:

1. Задает ЦФ-Предприятия: максимизация прибыли предприятия от совокупности заказов, максимизация качества и минимизация сроков заказов и рисков.

2. Строит сквозной план реализации заказов на максимальный горизонт (известен по последнему заказу).

3. Учитывает ограничения: наличие производственных мощностей, доступное количество работников, график поставки комплектующих или работы субподрядчиков.

4. Выполняет укрупненную балансировку ресурсов по всем подразделениям.

5. Фрагменты построенного плана передает конкурирующим подразделениям на детализацию до ФИО людей и согласования трудоемкостей и сроков.

6. Выбирает те подразделения, которые дают наилучшие по качеству, срокам, цене и рискам предложения.

7. Корректирует планы на основе обратной связи от АИС подразделений до окончательного их утверждения.

8. Выдает наряд-задания в подразделения на каждый месяц с указанной трудоемкостью.

9. Адаптивно корректирует стратегический план на основе поступающего факта исполнения задач.

АИС Оперативного управления ресурсами подразделения:

1. Задает ЦФ-Подразделения (цеха): стремится выполнить назначенные работы с максимальным качеством, минимальными сроками, ценой и рисками.

2. Строит сводный план работы подразделения до задач и ФИО в пуле своих ресурсов с учетом структуры изделия, технологического процесса, количества, календаря и компетенции работников, наличия и режима работы оборудования, его производительности.

3. Кроме того, стремится развивать компетенции персонала в перспективных направлениях, минимизировать количество переключения людей между задачами и ряд других ограничений.

4. Согласовывает полученный план с АИС-СП предприятия.

5. Приступает к исполнению согласованного плана с ежемесячным отчетом для выдачи зарплаты работникам в случае выполнения заданий.

6. Учитывает ограничения: наличие мощностей, доступное количество, календарь и компетенции работников.

7. При невозможности исполнения задания в срок и бюджет инициирует корректировку плана.

Рассмотрим протоколы вертикальных и горизонтальных взаимодействий АИС СП и АИС ОУ подразделениями предприятия, показанные на рисунках 7 и 8.

Описание содержания разработанных вертикальных протоколов АИС приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Протоколы вертикальных переговоров АИС

Протокол	**Действие**	**Содержание протокола**
Протокол ПВ1	Запрос на детализацию	Запрос на детализацию работ от АИС-СП в АИС-ОП, возвращается уточненный план со сроками начала и завершения работ, ФИО работников и трудоемкостью.
Протокол В2	Выбор лучшего предложения	Собирает ответы от подразделений, включая уточненный сетевой план-график работы (СПГ) и бюджеты, которые предлагают свои услуги по выполнению работ, упорядочивает их по выбранным критериям и выбирает наилучший вариант, фиксирует договор с выбранной АИС.
Протокол В3	Запуск плана в работу	Дает сигнал по запуску работы на основе согласованного выше плана и выдает первое наряд-задание на выполнение работ в подразделение. В ответ через месяц получает отчет по выполнению работы от подразделения, который вызывает перестроение дальнейшего плана, т.к. становится ясно, какая часть трудоемкости потрачена по наряду-заданию

Протокол В4	Инициализация пересмотра согласованного плана снизу	В случае такого расхождения плана и факта, который не может быть реализован внутри подразделения, инициирует пересмотр большого плана в АИС-СП, с созданием плана нагона
Протокол В5	Инициализация пересмотра согласованного плана сверху	Если другие подразделения не справляются, план может быть пересмотрен по инициативе АИС-СП.
Протокол В6	Завершение работы по этапу проекта	АИС-СП передает в АИС-ОП информацию о завершении работ, закрытии приема трудоемкости и фактов по заданиям.

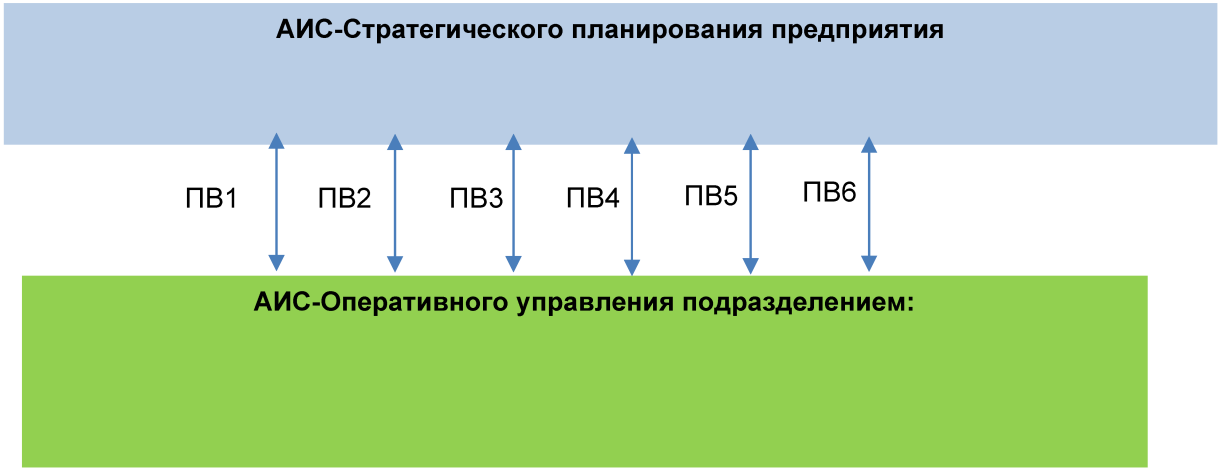


Рисунок 7 – Протоколы вертикальных взаимодействий АИС СП и АИС ОУ предприятия

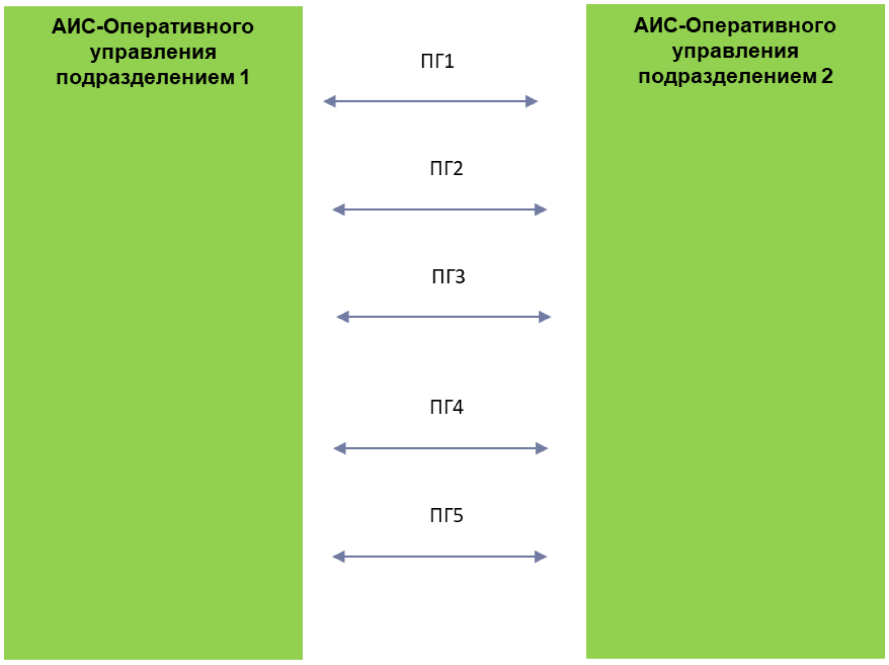


Рисунок 8 – Протоколы горизонтальных взаимодействий АИС стратегического планирования и АИС оперативного управления подразделениями предприятия

Описание содержания разработанных горизонтальных протоколов приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Протоколы горизонтальных переговоров АИС

Протокол	**Действие**	**Содержание протокола**
Протокол Г1	Согласование срока передачи результатов	Первый АИС-ОП1 подразделения передает АИС-ОП2 второго подразделения сведения, когда результаты работы будут переданы в это второе подразделение, подтверждая данные от АИС-СП в сквозном общем процессе, что запоминается в АИС-ОП-2.
Протокол Г2	Информирование о задержке	В случае возникновения угрозы задержки по передаче результата на стороне АИС-ОП1, эта система информирует АИС-ОПА2 о возможной задержке, что вызывает адаптивное перестроение плана

Протокол	Действие	Содержание протокола
		в АИС-ОП2 для их синхронизации. В свою очередь, АИС-ОП2 должна будет аналогично передать сведения о задержке в АИС-ОП 3 и далее по цепочке
Протокол Г3	Эскалация проблемы	Если задержка в АИС ОП1 так велика, что не может быть компенсирована в АИС-ОП2, то АИС-ОП2 должна уведомить АИС-СП для корректировки сквозного плана или выделения дополнительных ресурсов в АИС-ОП1 или АИС-ОП2 для совместного формирования плана нагона, например, путем введения сверхурочных работ
Протокол Г4	Информирование о нагоне	В случае, если АИС-ОП1 смогла сделать нагон и срок передачи результатов сократился, то АИС-ОП2 уведомляется о событии, чтобы снова адаптивно перестроить свой план
Протокол Г5	Завершение совместной работы	По завершению работы АИС-ОП1 и передаче результата в АИС-ОП2 протоколы взаимодействия указанных АИС завершаются.

Аналогичные протоколы разработаны для взаимодействия АИС на уровне предприятий в отраслевых цепочках кооперации [26, 35].

Данные протоколы могут быть инициированы в АИС-СП и АИС-ОУ в ответ на возникающие события или запросы пользователя. В ходе работы были сформулированы следующие типовые события и запросы пользователей:

1. Запрос пользователя к АИС-УП на формирование производственного плана по всему портфелю заказов;
2. Запрос пользователя к АИС-УП на размещение нового заказа, как для исполнения, так и для предварительной оценки реализуемости;
3. Запуск заказа в работу и запрос на получение текущего отчета о выполнении наряд-заданий;
4. Запрос пользователя на получение текущего плана по заказу, с учетом текущих фактов исполнения;
5. Поступление фактических сведений о выполнении мероприятия заказа;
6. Поступление событий о возникновении проблемы: задержка выполнения, увеличение объема работ, недоступность ресурса, приостановка заказа и другие, влияющие на планы работ;
7. Изменения исходных параметров заказов или ресурсов: изменение сроков, объемов, бюджетов или стоимости ресурсов, требующих выработки корректирующих планов.

Запросы и события такого рода инициируют сессии взаимодействия между АИС, которые сводятся к следующим типовым процедурам:

1. Обработка запроса на формирование или корректировку сводного плана;
2. Исполнение производственных планов в подразделениях и реализация локальных изменений в планах подразделений с эскалацией проблемы при неразрешимости;
3. Корректировка планов по ходу исполнения заказов, требующих пересмотра укрупненных планов;
4. Корректировка планов при возникновении непредвиденных событий.

Ключевые сценарии взаимодействия АИС-СП и АИС-ОП для формирования плана по запросу и исполнения плана показаны на рисунке 9.

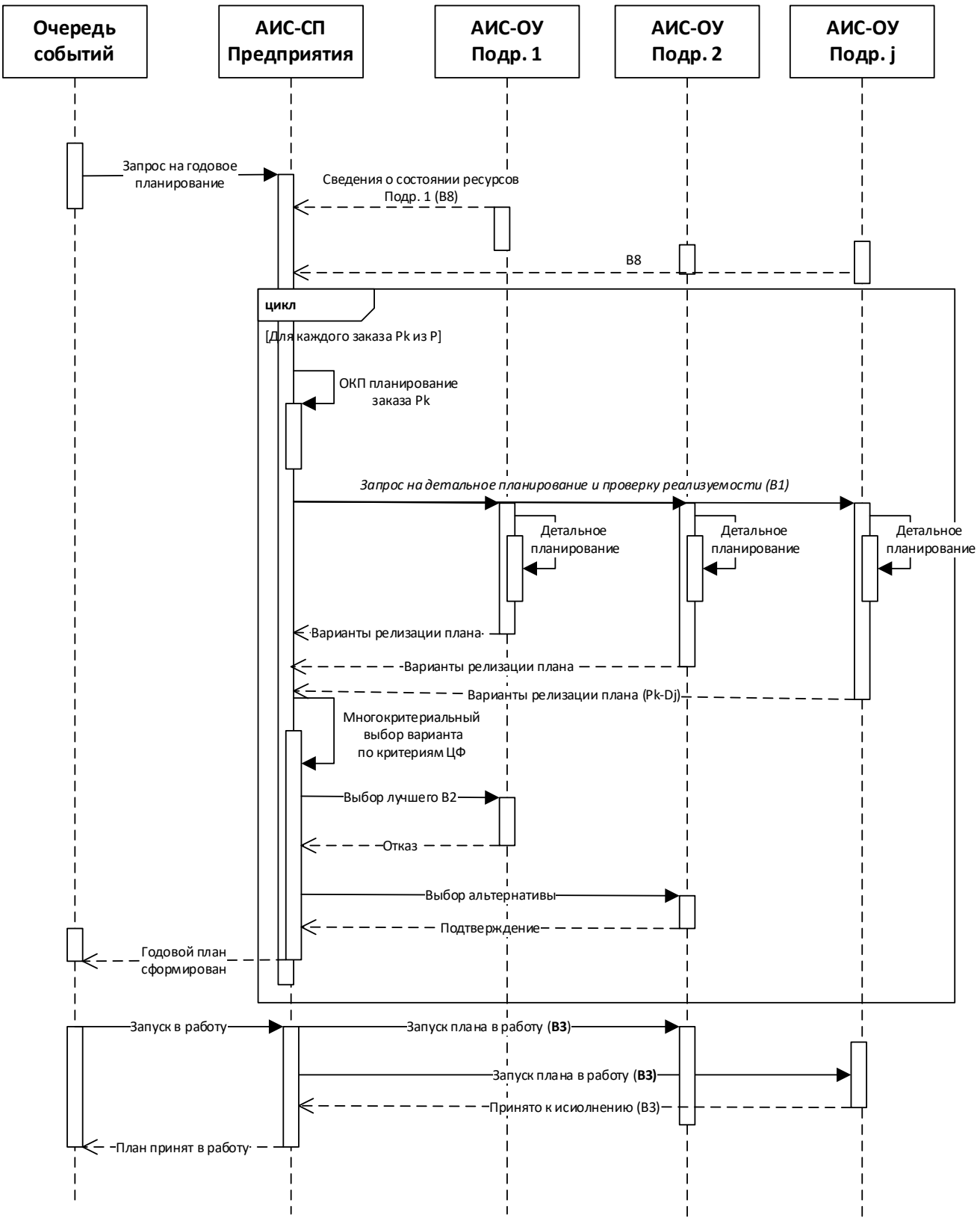


Рисунок 9 – Протокол вертикальных переговоров (B1-B3) для формирования начального годового плана

- По запросу или событию АИС-СП запускает сессию планирования;

- АИС-ОУ информируют АИС-СП о текущем состоянии ресурсов (доступность, загрузка, производительность);
- Для каждого заказа в АИС-СП решается задача начального планирования с учетом заданных требований и ограничений;
- Сформированный вариант плана АИС-СП по протоколу В1 согласовывает с АИС-ОУ, запрашивая детальные варианты планов;
- АИС-ОУ проводят детальное планирование, возвращая варианты в АИС-СП;
- В случае, если в одном из АИС-ОУ невозможно выполнить план, то АИС-СП идет на уступки или выделяет ресурс.

На этапе исполнения плана корректировка планов может исходить как от подразделений, так и от пересмотра общего плана предприятия. Схема работы в таком сценарии представлена на рисунках 10 и 11.

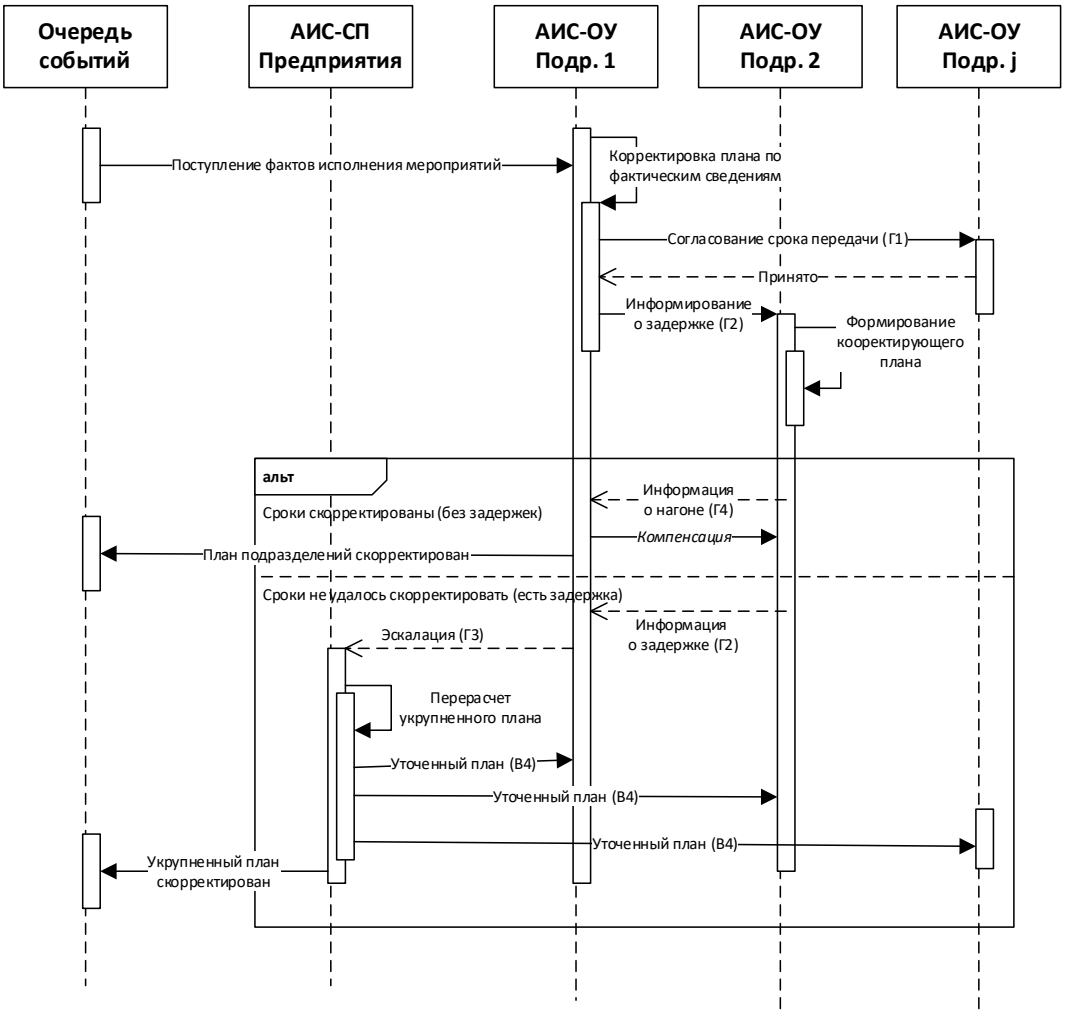


Рисунок 10 – Протоколы вертикальных и горизонтальных переговоров для исполнения текущего плана

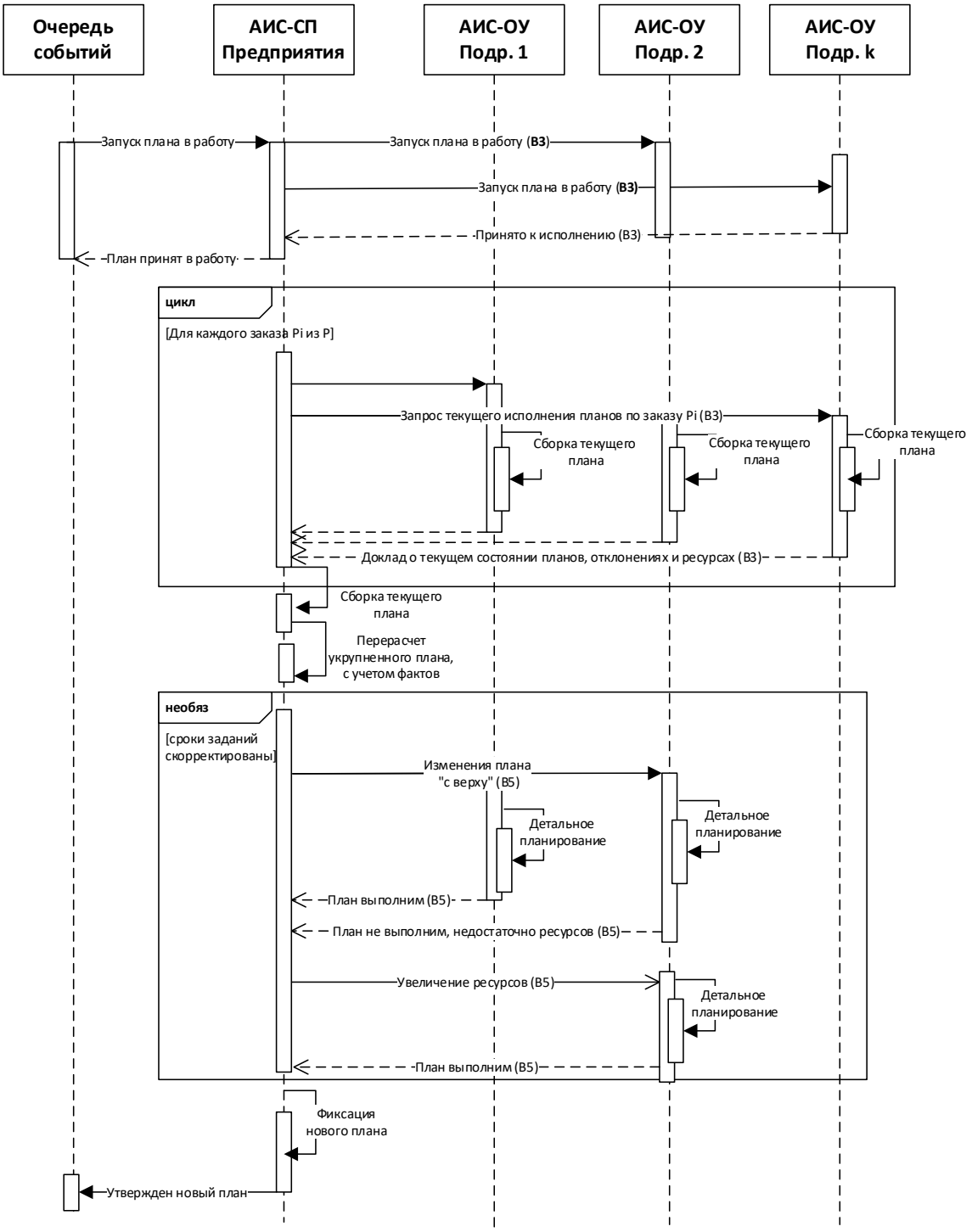


Рисунок 11 – Протоколы вертикальных переговоров (В3, В5) для сборки актуального плана и его корректировки по фактическим данным

- По событиям фактов выполнения или проблем исполнения запускается процесс корректировки плана;
- АИС-ОУ Подр. 1 производит адаптивную корректировку своего плана, и в случае отклонений информирует о задержке по Г2 АИС-УР Подр 2.
- АИС-ОУ Подр. 2 Формирует план нагона.
- Если корректировка успешна, то требует компенсацию

Если корректировка плана невозможно, то о проблеме сообщается в АИС-СП для принятия решения.

2.5 Логика работы АИС для поддержки протоколов

Схема алгоритма работы АИС для обработки поступления нового задания представлена на рисунке 12.

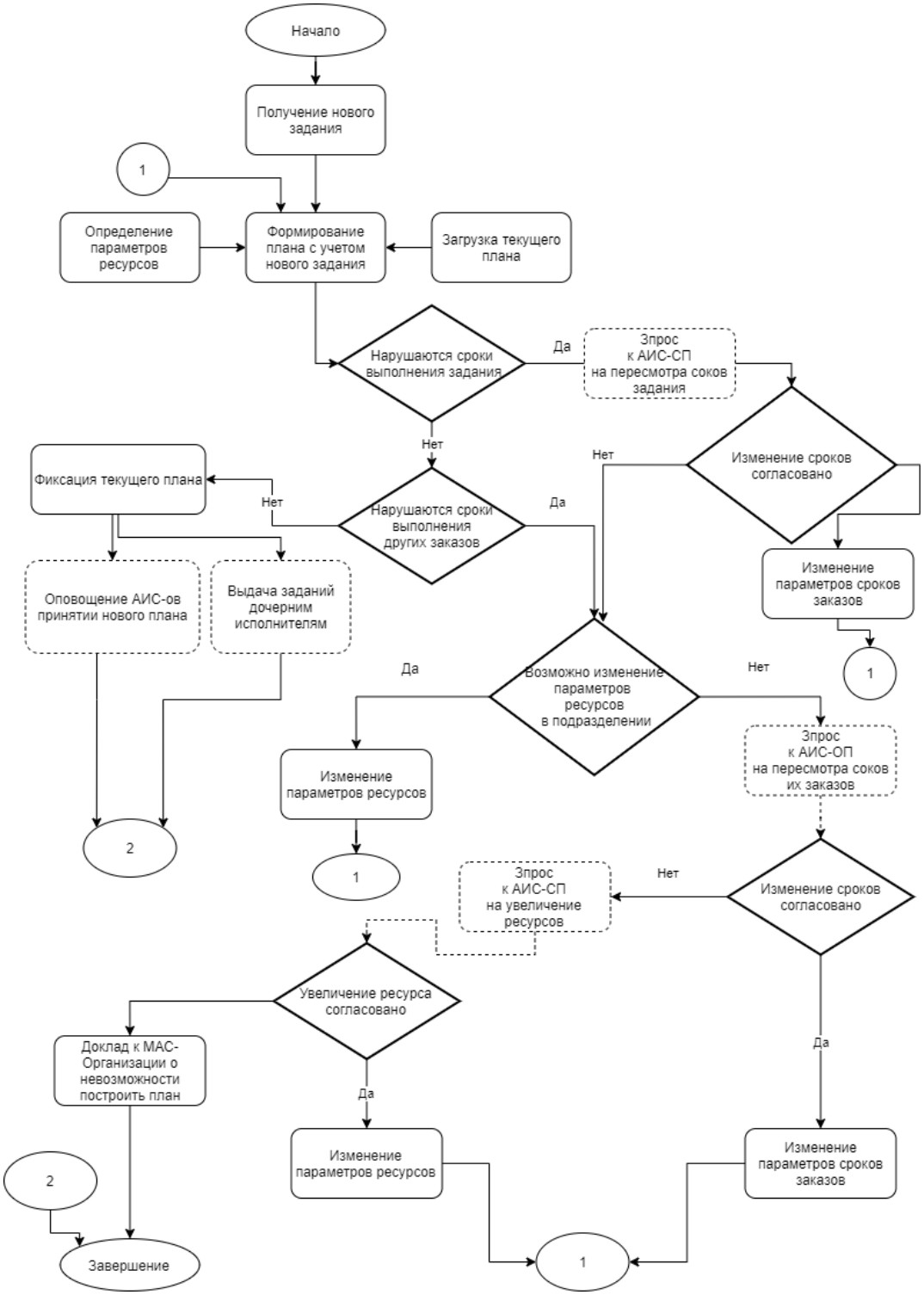


Рисунок 12 – Схема алгоритма работы АИС

Алгоритм работы АИС запускается при поступлении события запроса на включение нового задания в план, возникающее во время протоколов B1.

1. От вышестоящей системы АИС-СП поступает запрос на реализацию нового Заказа в виде задания для АИС-ОП.

2. АИС-ОП производит планирование нового задания совместно с другими ранее заданными заказами, с учетом имеющегося доступного количества и режима работы ресурсов

3. В результате формирования в АИС-ОП плана подразделения производится оценка его исполнимости и согласованности на предмет соблюдения сроков.

4. Если в результате расчета расписания сроки задания соблюдаются и сроки других, ранее запланированных, заказов не нарушены, то новый план фиксируется (становится текущим для АИС-ОП) и производится оповещение для АИС-ОП потребителей, поставщиков и АИС-СП об утверждении плана и передаются скорректированные сроки.

5. При успешном завершении АИС-Оп запускает процедуры выдачи заданий нижестоящим АИС.

6. Если сроки нового задания нарушаются или нарушаются сроки выполнения других заказов, то агенты АИС запускают механизм разрешения проблемной ситуации

7. Для разрешения проблемной ситуации производятся переговоры с другими АИС для ее разрешения.

8. При отклонении сроков по новому заданию производятся переговоры с АИС-СП об изменении директивных сроков на дельту, определенную в результате формирования собственного расписания.

9. Если параметры сроков согласованы, то производится корректировка плана АИС-ОП и переход к циклу анализа.

10. Если параметры изменения сроков не согласованы АИС-СП или имеются отклонения по срокам ранее запланированных заказов, то производится

процедура изменения параметров ресурсов (изменение режима работы) в локальном режиме для восстановления сроков

11. Если изменение режима работы ресурсов невозможно, то данная АИС проводит сессии горизонтальных переговоров с АИС потребителей и АИС поставщиков для корректировки их сроков.

12. В случае невозможности изменить сроки АИС-ОП производит запрос к АИС-СП на увеличение ресурсов (привлечение дополнительных средств или новых исполнителей), и в случае отказа – фиксирует неразрешимый конфликт.

13. Новое задание исключается из плана, и система переходит в ожидание новых сведений.

2.6 Выводы

1. Предложен сетевой подход к создания автономных интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий нового поколения, которые могут быть построены как цифровые экосистемы («системы систем»), состоящие из автономных интеллектуальных систем (АИС) стратегического планирования и оперативного управления ресурсами подразделений предприятий для автоматического согласования и синхронизации производственных планов по событиям в реальном времени.
2. Сформулированы основные принципы предлагаемого «распределенного» сетевого подхода к управлению ресурсами производственных предприятий, позволяющего преодолеть ограничения «каскадного» подхода.
3. Для решения сложных задач управления ресурсами крупных предприятий предлагается перейти от одной классической пакетной системы, работающей в недельно-месячном цикле без обратной связи – к распределенной сети АИС, построенной как цифровая экосистема АИС («система АИС систем») стратегического планирования и оперативного управления, работающих в реальном времени с постоянно действующей обратной связью, инициируемой поступающими событиями.

4. В качестве моделей и методов распределения, планирования и оптимизации ресурсов АИС могут быть выбраны как классические комбинаторные методы планирования и оптимизации для стратегического планирования на большой горизонт планирования, так и онтологии и мультиагентные технологии для оперативного управления на коротком горизонте, наиболее подверженном непредвиденным динамическим (турбулентным) изменениям.
5. Сформулированы содержательные требования к решению задачи многоуровневого управления ресурсами и дана формализованная математическая постановка задачи, которая может рекурсивно разворачиваться в ходе построения сети АИС от уровня стратегического планирования на большой горизонт времени – до уровня АИС отдельных подразделений для исполнения принятых планов в сроки и бюджеты.
6. Предложен метод сопряженного взаимодействия АИС стратегического планирования и АИС оперативного управления, реализуемый посредством разработанных протоколов их вертикального и горизонтального взаимодействия, а также алгоритмы, реализующие предлагаемый подход к решению задачи управления ресурсами крупных предприятий.

3 РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ АИС

В данной главе приводится описание функций и архитектуры цифровой экосистемы АИС для распределенного управления ресурсами на различных стадиях жизненного цикла создания ВТИ. Рассматриваются структура и функции типовой АИС и сервисов (компонентов) сетецентрической платформы для поддержки вертикально-горизонтального взаимодействия АИС СП и АИС ОУ в ходе распределенного управления ресурсами предприятия.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [2, 11, 13, 21, 25, 103].

3.1 Автономная интеллектуальная система

Уточним, что под «автономной интеллектуальной системой» (АИС) далее будем понимать такую частично или полностью автономную информационно-управляющую кибер-физическую систему, которая способна сама вырабатывать решения в области управления ресурсами, предлагать варианты таких решений лицам, принимающим решения, и далее обеспечивать их выполнение и контролировать результаты на каждом этапе процесса управления ресурсами.

Такая АИС призвана выполнять функции менеджеров, беря на себя задачи по построению и контролю выполнения сбалансированного плана предприятия по срокам, стоимости и качеству реализации заказов.

В автономной интеллектуальной системе в фоновом режиме непрерывно реализуется цикл Деминга [16] («Планируй – Делай – Контролируй – Анализируй») по отношению к переданным ей на управление набору заказов и пулу ресурсов. Основные функции АИС для реализации цикла Деминга приведены на рисунке 13. П – планируй, Д – делай, К – контролируй, А – анализируй.

Автономность заключается в том, что система, располагая базой знаний, реализует во взаимодействии с пользователями и другими системами целенаправленное поведение и стремится выполнять формируемые ею же планы работы, несмотря на возникающие отклоняющие события.

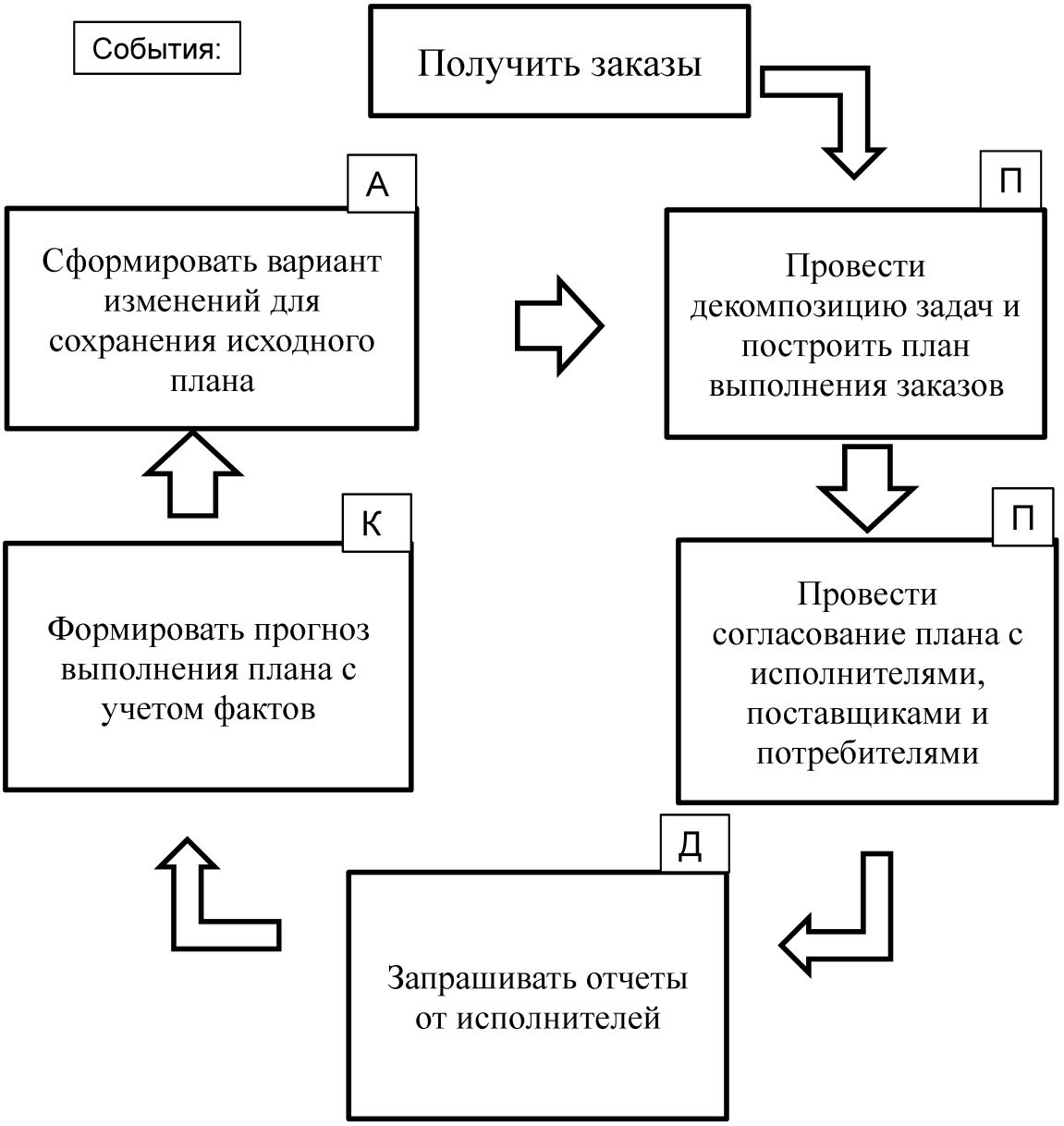


Рисунок 13 – Основной функциональный цикл работы типовой АИС

Важно отметить, что, следуя принципам мультиагентной технологии, система должна взаимодействовать с другими АИС для выработки и согласования общих решений посредством предложенных выше протоколов вертикальных и горизонтальных переговоров, и если раньше протоколы взаимодействий разрабатывались на уровне «агент-агент», то теперь протоколы строятся на уровне «система-система», т.е. теперь взаимодействие строится на уровне «рой роев».

Взаимодействие АИС обеспечивается через сетецентрическую платформу, предоставляющую общую шину для передачи данных и согласования решений.

Поддержка такого цикла программной системой АИС требует определения функций, разработки архитектуры и выбора соответствующих технологий их реализации.

Для реализации рассмотренного подхода предложена следующая логическая архитектура АИС для управления ресурсами предприятия (рисунок 14).

Рисунок 14 – Логическая архитектура типовой АИС

Типовая АИС включает следующие компоненты:

— сервис доступа к графу знаний – компонент для работы с базой знаний системы, представленной в виде онтологии и графа знаний;
— мультиагентная среда (ядро) – инструмент для хранения, запуска и исполнения программ и коммуникации агентов АИС;
— сервис управления планами – средство для управления формируемыми планами, исходными данными, параметрами планирования и их согласования с внешними участниками;
— очередь событий – сервис отслеживания, накопления и диспетчеризации обработки событий;
— сервис доступа к данным – компонент для работы с хранилищем данных и планов системы;

— сервис коммуникации – компонент для взаимодействия с внешними системами, в том числе с другими АИС;

— пользовательский интерфейс – подсистема формирования автоматизированных рабочих мест для пользователей, ведения данных, формирования отчетов и поддержки бизнес-процессов.

На физическом уровне АИС реализуется в виде сервис-ориентированной или микро-сервисной архитектуры для обеспечения процессов работы в непрерывном режиме, масштабирования к размеру задачи и учета специфики предметной области.

Общий вид физической архитектуры одной АИС представлен на рисунке 15.

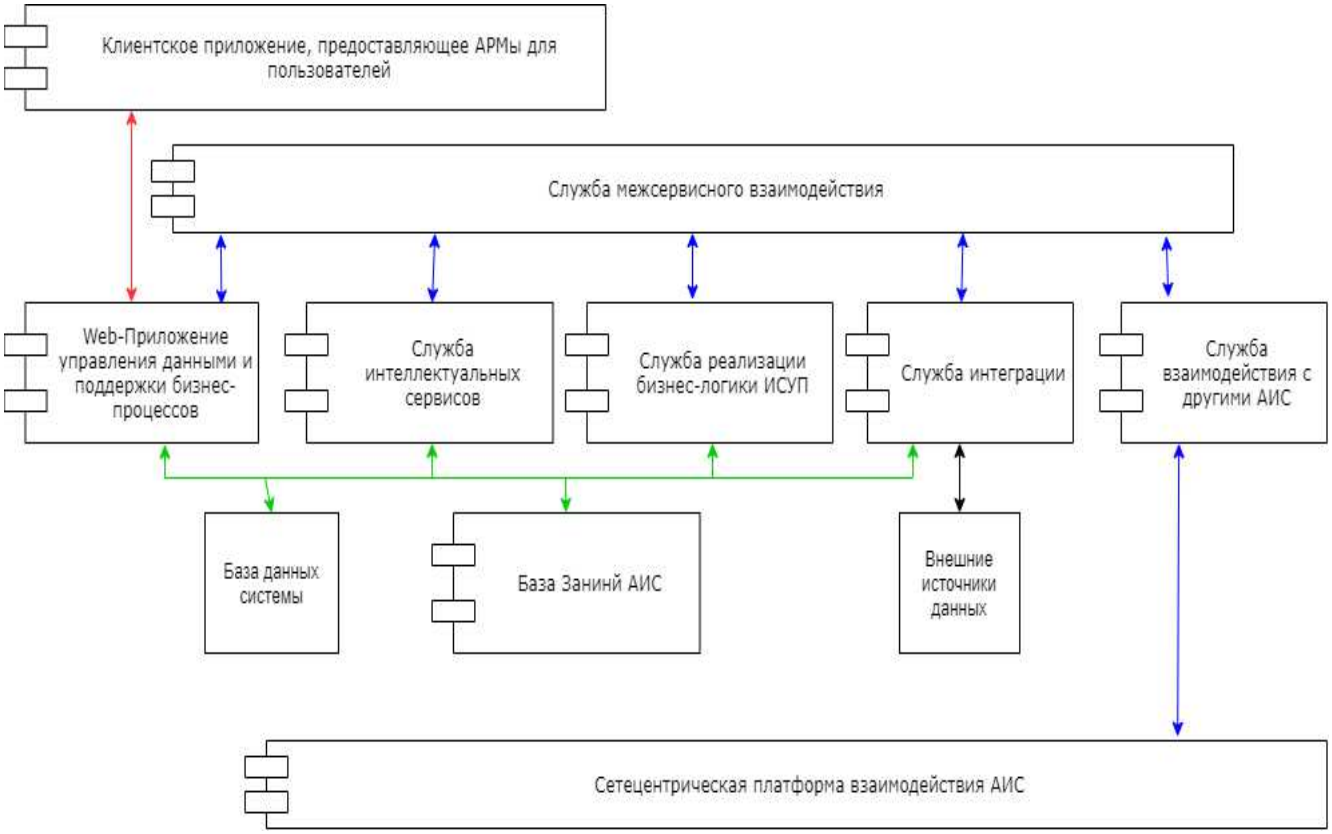


Рисунок 15 – Укрупненная физическая архитектура АИС

Типовая АИС включает следующие компоненты:

— Клиентское приложение – веб-приложение, работающее в стандартных браузерах на рабочих местах пользователей, предоставляющее

автоматизированные рабочие места в соответствии с функционалом ролей пользователей.

- WEB-Приложение управления данным и поддержки бизнес-процессов – серверное Web-приложение, обеспечивающее функции редактирования основных данных, разработки планов-графиков, конструирования планов и реализующее бизнес-процессы планирования и исполнения заказов и их мероприятий с учетом разграничения доступа.
- Служба интеллектуальных сервисов – непрерывно работающее серверное приложение, включающее в себя мультиагентные планировщики (стратегический и оперативный), сервисы поиска проблемных ситуаций и формирования прогнозов.
- Служба реализации бизнес-логики АИС – непрерывно работающее серверное приложение, которое обеспечивает запуск и реализацию всех правил бизнес-логики процессов планирования и исполнения заказов, расчета показателей для аналитических панелей и отчетов, формирования очереди событий и оповещения пользователей об их возникновении.
- Служба интеграции – непрерывно работающее серверное приложение, которое обеспечивает интеграцию данных с внешними системами и предоставляет API для доступа к данным системам.
- Служба межсервисного взаимодействия – непрерывно работающее серверное приложение, которое обеспечивает взаимодействие между сервисами системы: производит передачу сообщений и событий между сервисами системы.
- Служба взаимодействия с другими АИС – непрерывно работающее серверное приложение, которое обеспечивает взаимодействие АИС с другими АИС цифровой экосистемы, является клиентом для сетецентрической платформы.
- База данных системы – реляционная база данных, обеспечивающая хранение всех данных и реализующая функции их обработки.
- База знаний – внешний по отношению к АИС интеллектуальный компонент, который позволяет создавать онтологические модели организации, подразделений, процессов, изделий, которые используются мультиагентными

планировщиками, а также при работе бизнес-логики и функций конструкторов планов.

— Внешние источники данных – внешние системы, подключаемые к службе интеграции.

Автономная интеллектуальная система является минимальным атомом для создания цифровой экосистемы. Для создания цифровой экосистемы АИС должна быть подключена к сетецентрической платформе взаимодействия, которая обеспечивает координацию и возможность взаимодействия. Рассмотрим понятия цифровой экосистемы, ее функции и архитектуру.

3.2 Понятие цифровой экосистемы АИС для распределенного управления ресурсами

Определим цифровую экосистему АИС как сложную социотехническую систему, обладающую следующими свойствами:

- **Открытость** – возможность вводить новые АИС в работающую экосистему «на лету», без остановки и перезапуска, что касается и возможностей динамического установления связи и появления взаимодействия между АИС, а также вывода АИС из эксплуатации. Отметим, что при этом новая АИС должна создать семантический дескриптор на основе онтологии, чтобы «объяснить» уже работающим АИС, для каких задач можно обращаться в новую систему;
- **Распределенность** – предполагает, что вместо одной глобальной АИС в цифровой экосистеме функционируют локальные АИС, способные синхронизировать свою работу по событиям с учетом имеющихся критериев, предпочтений и ограничений в принятии решений;
- **Адаптивность** – способность цифровой экосистемы АИС изменять свою структуру или функции под действием внешних факторов, что в более узком понимании трактуется как способность адаптивно реагировать на события, частично изменяя, например, построенные ранее комплексные производственные планы в связи с изменением ситуации;

- **Самоорганизация** – способность АИС самостоятельно устанавливать связи и в ходе работы пересматривать их по изменениям ситуации. Ключевым отношением между АИС любой рассматриваемой экосистемы являются отношения «потребность-возможность», что должно позволять сервисам формировать связанные цепочки, когда результат одной АИС поступает на вход другой для дальнейшего согласования;
- **Конкуренция и кооперация** – предполагает, что одна и та же АИС в цифровой экосистеме может быть «клонирована» для разных потребителей, действуя от их лица и в их интересах. Например, АИС цеха может быть лизирована, настроена для работы в каждом цехе предприятия. При этом несколько цехов могу бороться за один небольшой заказ или кооперироваться в реализации большого заказа, а также более гибко помогать друг другу в реализации такого заказа, например, задержка в исполнении части заказа в одном цехе может «гаситься» в следующем, чтобы не распространять задержку далее вправо, путем построения плана нагона.

Основные принципы построения предлагаемой цифровой экосистемы АИС:

— Экосистема АИС строится как многоуровневая сеть;
— Каждая АИС имеет связь с вышестоящей АИС, от которой получает задания и ресурсы;
— АИС через планы (или организационную схему) связана с АИС-Поставщиками и АИС-Потребителями, от которых она получает ограничения по срокам и ресурсам;
— АИС может иметь подчиненные АИС нижестоящего уровня.

Цифровая экосистема АИС потенциально может проявлять свойства эмерджентности в рамках формируемого коллективного искусственного интеллекта за счет взаимодействия АИС [2].

Образ базового «строительного элемента» цифровой экосистемы АИС произвольного уровня представлен на рисунке 16.

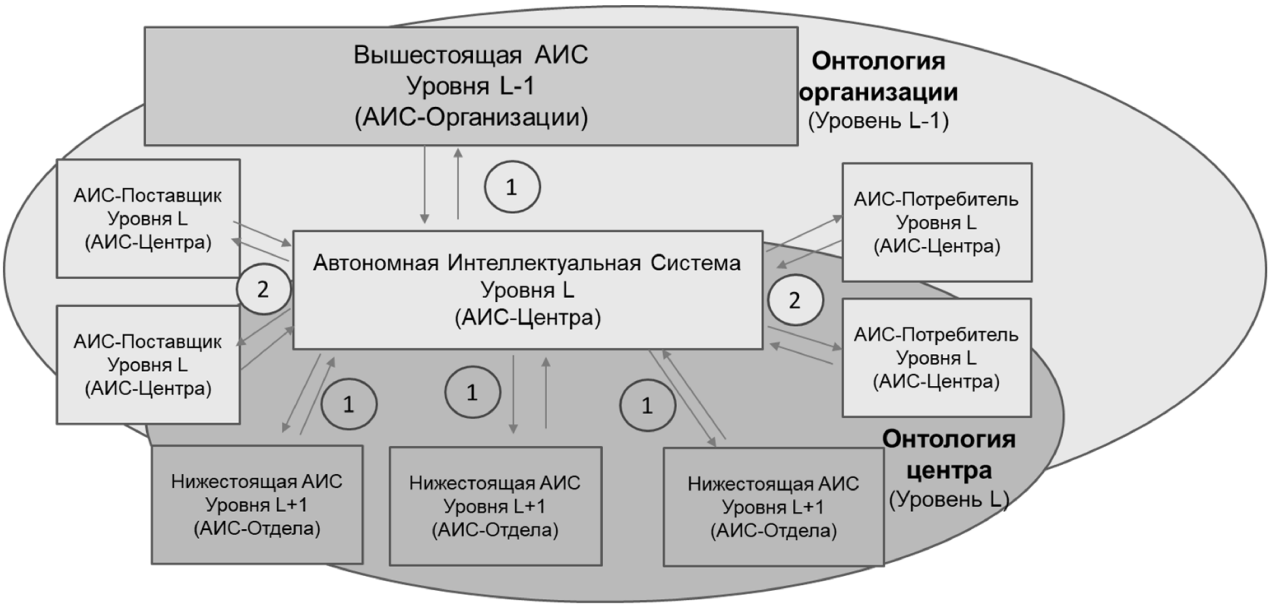


Рисунок 16 – Базовый элемент многоярусной цифровой экосистемы АИС

Здесь выделены:

1 – протоколы вертикальных взаимодействий АИС: декомпозиция заданий и сборка плана, подъем факта и событий;

2 – протоколы горизонтальных взаимодействий АИС: синхронизация плана, запрос на изменение сроков и обмен ресурсами.

Построение цифровой экосистемы АИС возможно на основе общей онтологии и базы знаний предприятия, разработка которых должна соответствовать следующим принципам:

— выстраивается сеть онтологий для каждого уровня экосистемы АИС;
— работа АИС базируется на онтологиях соответствующих уровней;
— онтология каждого уровня специфицирует классы задач и ресурсов, в терминах которых строятся планы;
— протоколы 1 и 2 работают в терминах соответствующих онтологий, позволяя различным АИС иметь «общий язык» и обеспечивая их взаимодействие.

Более подробно применение холонических принципов для построения планов и применения в организациях рассматривается в работах [21, 66, 76].

Далее рассмотрим в качестве примера реализацию цифровой экосистемы АИС для управления ресурсами производственного предприятия высокотехнологичных изделий (ВТИ).

3.3 Функции и архитектура цифровой экосистемы АИС для распределенного управления ресурсами

Разработанная в настоящей работе типовая схема построения цифровой экосистемы АИС включает в себя следующие основные подсистемы (рисунок 17):

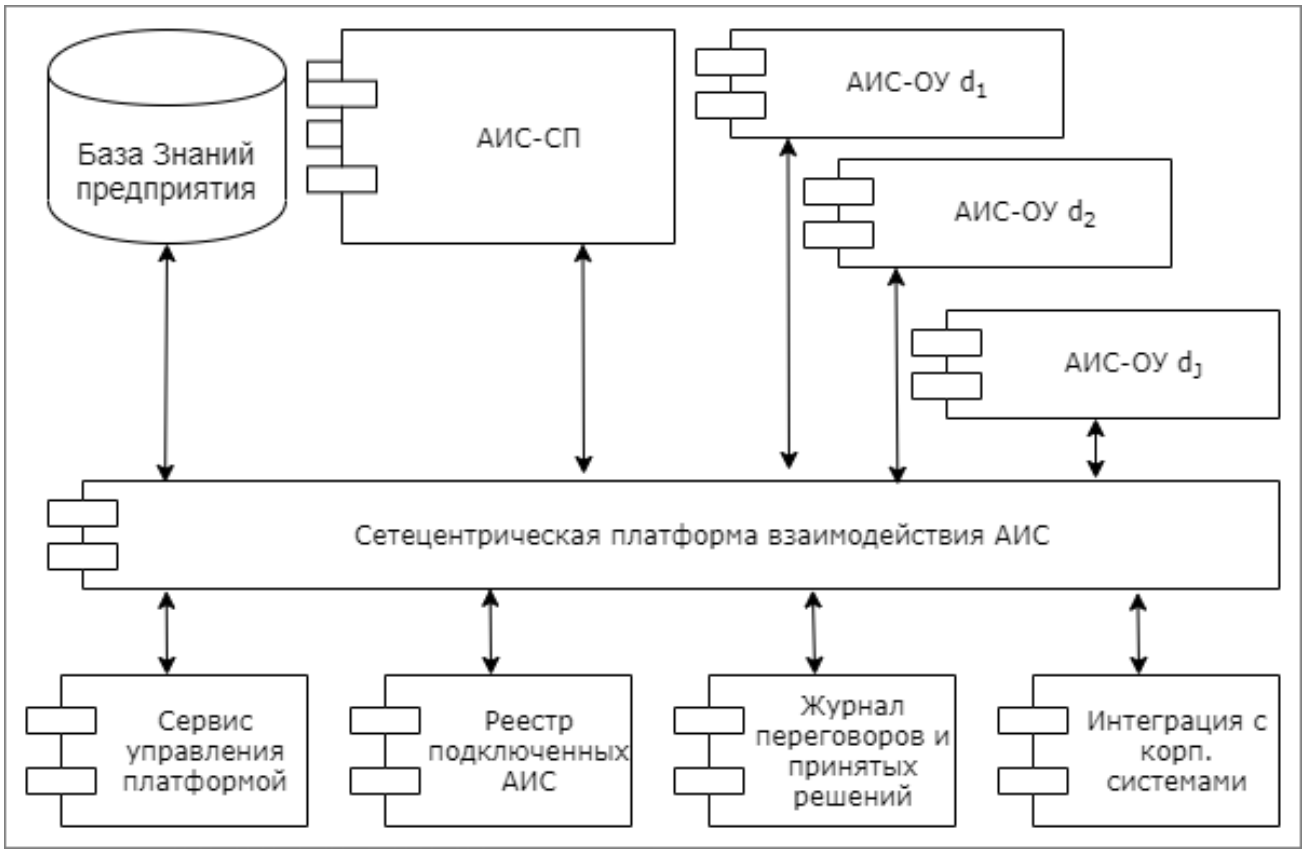


Рисунок 17 – Логическая архитектура цифровой экосистемы АИС

Основой функционирования разработанной цифровой экосистемы АИС является сетецентрическая платформа, обеспечивающая p2p взаимодействие АИС для согласования решений, а также сохранение данных, безопасность и ряд других функций. Именно сетецентрическая платформа обеспечивает динамический, параллельный и асинхронный характер одновременной работы разрабатываемых АИС, где каждая действует на своем уровне или на своем участке (подразделении) предприятия, но с передачей сообщений и поддержкой предложенных протоколов

вертикально-горизонтальных взаимодействий для синхронизации принимаемых решений между уровнями и подразделениями каждого предприятия [66,72].

Обзор существующих платформ, их отличие от предлагаемой, а также архитектура и свойства детально рассматриваются в работах автора [11, 13].

В составе цифровой экосистемы выделяются элементы:

1) АИС СП – для стратегического планирования ресурсов на большой горизонт времени;
2) АИС ОУ – для оперативного управления ресурсами подразделения на короткий горизонт времени;
3) Онтология предметной области деятельности и база знаний предприятия;
4) Сетецентрическая платформа для p2p взаимодействия АИС;
5) Журнал переговоров, жизненного цикла возникновения событий и принятия решений в цифровой экосистеме АИС;
6) Сервис управления цифровой экосистемой АИС;
7) Очередь событий цифровой экосистемы АИС.

Рассмотрим подробнее функции каждого компонента.

АИС Стратегического планирования и АИС Оперативного управления ресурсами

Базовые функции АИС в цифровой экосистеме:

— реакция на событие: постановка события в очередь, изменение важности критериев, маркировка времени появления событий, отправка события на перепланирование и т.д.;
— распределение ресурсов: решение, какие ресурсы следует использовать для достижения целей, не требуется ли вовлечение новых ресурсов из резервов руководителя;
— планирование: решение о назначении задач на ресурсы и определение сроков начала и завершения их выполнения с учетом индивидуальных особенностей;
— оптимизация ресурсов (пока есть время) – поиск вариантов улучшения ключевых показателей;

— мониторинг и контроль: наблюдение за ходом выполнения построенного системой плана работы с фиксацией сигналов от пользователей об успешном завершении операций или появления проблемных ситуаций (выход за сроки, брак, задержки и т.д.);
— согласование с пользователями: получение подтверждения, что построенный план отвечает представлениям потребителей или выработка встречных предложений для перепланирования;
— выявление расхождений между планом и фактом с активацией перепланирования задач и ресурсов;
— обучение из опыта: получение индуктивных правил из данных, например, если рабочий многократно допустил брак на определенной операции, то не стоит в следующий раз снова назначать на него такие операции;
— анализ опыта и генерация предложений по улучшению результатов.

Онтология и база знаний отрасли, каждого предприятия и изделия

База знаний строится на основе онтологий – формализованной модели знаний предметной области, которая содержит базовые классы понятий и отношений предметной области, выступая в качестве «толкового словаря» и семантической интероперабельности для АИС.

В настоящее время онтологии и базы знаний активно развиваются в рамках направления Semantic Web [17, 41, 74], следствием чего явилось построение целого ряда конструкторов онтологий. На основе онтологии в конструкторе онтологий может быть построена онтологическая модель каждого подразделения предприятия, которая может включать в себя описание видов создаваемой на предприятии продукции или оказываемых услуг, технологических процессов (до уровня отдельных задач с учетом их особенностей и взаимосвязи между ними), элементов производственно-логистической инфраструктуры и организационной структуры подразделений предприятия, состава работников предприятия с их компетенциями, применяемой техники, станков и другого оборудования, инструментов и материалов и т.д.

Онтологическая модель предприятия, в свою очередь, может быть использована для настройки на предметную область и специфику предприятия унифицированной МАС для проектной, производственной или сервисной организации.

Кроме того, наличие понятий и отношений позволяет записывать в базе знаний различные правила, чтобы преобразовывать нормативно-справочную информацию из текста законов или инструкций, которые пока не доступны для понимания компьютерам, в форму правил, применимых в той или иной ситуации.

Сетецентрическая платформа с p2p взаимодействием

Сетецентрическая платформа предоставляет общую шину и ряд системных и прикладных сервисов для поддержки взаимодействия АИС между собой и их функционирования, включая общую шину взаимодействия систем, хранение динамически расширяемых наборов данных, передачу данных между сервисами, согласование решений, поддержку сессий переговоров, защиту информации и безопасность пользователей, веб-интерфейс пользователей и т.д.

Журнал переговоров, жизненный цикл событий и принятия решений в цифровой экосистеме АИС

Данный компонент фиксирует результаты, достигаемые в ходе переговоров представителей АИС для понимания, объяснения и аудита принятых решений.

Процесс переговоров отражает суть и позволяет документировать эмерджентный интеллект, возникающий в цифровой экосистеме по каждому событию или за счет внутренней проактивности, в виде запросов и ответов, встречных предложений, наконец, фиксаций взаимных уступок между системами.

Важным фактором при этом является отслеживание характеристических времен АИС, позволяющих проследить весь процесс отработки событий и принятия решений, начиная с момента появления события – до отработки соответствующего решения в реальной жизни конкретным исполнителем (так называемое Time-To-Go – время до исполнения).

Динамика переговоров и принятых решений по достижению результатов позволит в любой момент времени по запросу выполнить аудит любых решений.

Сервис управления цифровой экосистемой АИС

Этот модуль требуется для поддержки работоспособности цифровой экосистемы, подключения новых систем и их включения в реестр, управления правами пользователей и т.д. Процесс подключения новых сервисов предполагает определенный регламент подключения, связанный с пополнением общей базы знаний предметной области и извещением АИС и других сервисов, аналогично и в случае отключения устаревших сервисов, с их постепенным выводом из обращения (когда к ним уже нет обращений). В любой момент времени модуль управления может показать, сколько пользователей зарегистрировано и работает в текущий момент, сколько и каких АИС и сервисов подключено, в каком состоянии они находятся, кто с кем взаимодействует в настоящий момент в сессиях и на какой стадии находятся переговоры, какие сервисы востребованы, какие задачи они решают и какой счет будет представлен каждому пользователю.

Очередь событий

Важным элементом цифровой экосистемы является Очередь событий, т.к. основной принцип работы системы – событийный, т.е. на вход системы поступает информация об изменениях в реальном мире, что и вызывает реакцию системы на эти изменения. Очередь событий используется как для регистрации автоматических событий, так и для создания, редактирования, сохранения и отмены новых событий вручную. АИС может обрабатывать событие за событием или запускать обработку целой группы событий. События формируются как пользователем, так и автоматически по согласованной политике.

Предполагается, что предложенная архитектура должна иметь рекурсивный или фрактальный характер, разворачиваясь в самоподобные по своей архитектуре структуры нижнего уровня – до уровня АИС каждого подразделения, участка и сотрудника, изделия и наоборот. Экосистема АИС отрасли может строиться по таким же принципам.

3.4 Основные классы агентов цифровой экосистемы АИС

Для создания цифровых экосистем АИС ВТИ различного применения были выделены классы агентов, представленные в таблице 6.

Выделены два основных класса агентов:

- групповые – отвечают за баланс интересов в целом по подразделениям предприятия и являются менеджерами для дочерних агентов;
- элементарные – отвечают за достижение целей отдельными конкретными сущностями предприятия (рабочий, станок и т.д.).

Принципиально новым по отношению к предшествующим работам является разработка групповых агентов.

Основные классы групповых агентов АИС представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Основные классы групповых агентов цифровой экосистемы АИС

Класс группового агента и его цель	**Поведение агента**
Агент менеджера заказов Цель: *Все заказы выполняются в срок и с прибылью*	Проверка возможности выполнить новый заказ при текущей загрузке ресурсов Оценка штрафов за отказ от заказа и для влияния на производственные показатели Выделение дополнительных ресурсов для нагона сроков выполнения заказа в случае отклонений Поиск возможности изменения способа выполнения заказа для сокращения затрат
Агент менеджера производственных процессов Цель: *Заказы выполняются по известным процессам*	Предложить типовой процесс получения результата для обеспечения качества заказа Предложить меры при появлении отклонений по качеству Предлагать уточнение норм трудоемкости в базе знаний по фактическим данным
Агент менеджера трудовых ресурсов	Выявить дефицитные компетенции и специальности для планирования обучения и опережающего найма Предложить изменение требований к ресурсам для перераспределения задач в случае недогруза части ресурсов

Цель: *Трудовые ресурсы загружены и работают в нормальном режиме*	Предложить перенос отпусков на интервалы недогруза ресурсов Выявление трендов роста и падения производительности трудовых ресурсов и прогноз скорости
Агент менеджера производственных ресурсов Цель: *Производственные ресурсы загружены и работают в нормальном режиме*	Предложить перенос периодов обслуживания на интервалы недогруза ресурсов Предложить изменение требований к ресурсам для перераспределения задач в случае недогруза части ресурсов
Агент менеджера финансовых ресурсов Цель: *Финансовых ресурсов достаточно для обеспечения выполнения заказов*	Выявление дефицита финансовых ресурсов Оценка необходимых средств для обеспечения производственного плана и влияния на прибыль проектов Расчет бюджета проекта и подразделения по запросу
Агент менеджера внешних исполнителей Цель: *Поиск лучших вариантов и контроль выполнения планов подрядчиками*	Поиск варианта выполнения части заказа внешними исполнителями при дефиците ресурсов Сбор и анализ предложений от внешних исполнителей Анализ надежности внешнего исполнителя

Групповые агенты представляют интересы руководителей предприятия разного уровня или подразделений, их поведение обусловлено конкретными корпоративными политиками и направлено на высокую эффективность ресурсов в целом.

Для решения комплексных задач, например, принять решение о размещении нового заказа, групповые агенты формируют «команды», в рамках которых они оценивают каждый аспект физической возможности размещения заказа, включая

производственные возможности, загрузку ресурсов, финансы, возможность привлечения подрядчиков, а также влияние на существующий производственный план и показатели.

Результатом работы групповых агентов для конечных пользователей системы является набор рекомендаций, представленный в вариантах производственных планов и набор аналитики, достаточный для принятия решения.

В ходе планирования реализации производственных заказов и на этапе исполнения, групповые агенты производят непрерывный мониторинг складывающейся ситуации, выявляют и оценивают отклонения и за виртуальным круглым столов вырабатывают варианты разрешения проблемных ситуаций для минимизации ущерба и роста показателей эффективности.

Групповые агенты взаимодействуют как между собой, для решения «стратегических» вопросов, так и с агентами подчиненных им сущностей, для разрешения конфликтов и инициализации сессии переговоров по различным задачам.

Агенты сущностей создаются для каждого экземпляра процесса управления (сотрудник, задача, заказ, оборудование и др.) и обслуживают его в течении всего его жизненного цикла в МАС. Эти агенты непосредственно решают задачи управления ресурсами.

Основные классы агентов сущностей АИС приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные классы элементарных агентов цифровой экосистемы АИС

Класс агента сущности и его цель	**Поведения агента**
Агент заказа Цель: *Заказ выполняется в заданные сроки и с требуемыми*	Поиск наиболее подходящей структуры результатов и работ в базе знаний под заданный дескриптор заказа Запрос оценки трудоемкости и сложности задач Планирование задач для реализации заказа Мониторинг выполнения задач и выявление отклонений Расчет бюджета и контроль показателей

Класс агента сущности и его цель	**Поведения агента**
показателями бюджета и качества	Расчет показателей качества результатов и выявление проблем Контроль разрешения проблем задач и заказа в целом Выделение дополнительных бюджетов для задач для расшивки узких мест Запрос на «усиления» исполнителей для сокращения сроков
Агент задачи Цель: *Быть завершенной в заданные сроки с минимальными затратами*	Поиск лучших практик и оценок в базе знаний на основании дескриптора задачи Поиск потенциальных исполнителей для задачи Поиск возможных вариантов исполнения ресурсами с учетом требований, ограничений, связей и бюджетов (матчинг) Сбор предложений от агентов исполнителей, их анализ и проведение переговоров об условиях Выбор исполнителя и согласование параметров выполнения Контроль выполнения задачи исполнителем Анализ отклонений по срокам, объемам и качеству Оповещение агента исполнителя об уточнении параметров или отмене (для пересмотра решения) Рассмотрение запроса на уступку (сроки, исполнитель, качество) по запросу агента другой задачи Рассмотрение запроса от агента исполнителя на перепланирование или уточнение параметров (тарифа) Запрос к агенту проекта на увеличение бюджета для разрешения конфликта

Класс агента сущности и его цель	**Поведения агента**
Агент продукта Цель: *Иметь высокое качество и минимальную себестоимость*	Найти типовой процесс в базе знаний получения результата Рассчитывать себестоимость Анализировать процесс получения результата на предмет обеспечения качества и себестоимости Запрашивать изменение исполнителей задач для повышения уровня качества и снижения рисков Принимать решение об отмене части задач, для сокращения сроков или себестоимости Быть произведенным точно в срок для снижения издержек
Агент сотрудника Цель: *Максимизация личного дохода и компетенций*	Рассмотрение запроса на планирование от агента задачи Подготовка предложение по размещению для агента задачи Идентификация конфликта и списка конфликтных задач Оповещение агентов задач об изменении календаря доступности Рассмотрение возможности изменения календаря доступности Запрос задач для обучения и развития компетенций Расчет показателей эффективности сотрудника Расчет личного бюджета
Агент оборудования Цель: *Максимизация загрузки и выполнения графика*	Рассмотрение запроса на планирование от агента задачи Подготовка предложение по размещению для агента задачи Идентификация конфликта и списка конфликтных задач

Класс агента сущности и его цель	Поведения агента
технического обслуживания	Оповещение агентов задач об изменении календаря доступности Рассмотрение возможности изменения календаря доступности Расчет показателей эффективности использования оборудования Расчет личного бюджета

Агенты указанных сущностей создаются с заданными настройками и параметрами при старте АИС или при поступлении событий. Агенты выполняют определенные для них поведения по заданным запросам или произошедшим внешним событиям. При этом поведение агента каждой конкретной сущности может быть настроено или определено в зависимости от семантики этой сущности, определенной в базе знаний, или в соответствии с параметрами и ограничениями, заданными пользователями.

Для решения задачи управления агенты взаимодействую между собой в соответствии с протоколами, реализующими метод построения расписания, в основе которого лежит максимизация целевой функции каждого агента и системы в целом, более подробно рассмотренные в работе [67].

3.5 Структура планов и схема их согласования в АИС подразделения

В ходе разработки и внедрения предлагаемых цифровых экосистем АИС было обнаружено, что в каждом подразделении предприятия вместо одного плана обычно возникает 4 типа плана, состав которых и взаимодействие между ними на примере производственного цехового планирования представлены на рисунке 18.

Рисунок 18 – Структура планов и схема их согласования в АИС подразделения

Процесс управления вариантами оперативного плана в рамках одного подразделения на приме ре цеха состоит из следующих действий:

1. Утвержденный план цеха передается на исполнение и создается рабочий (текущий) план.

2. С участков сборки поступают фактические отметки, непредвиденные события и уточнения по планам комплектации.

3. По непредвиденному событию автоматически формируется новый вариант плана: «План-Прогноз», учитывающий наличные ресурсы. План отражает текущую ситуацию и вариант назначений рабочих и является предложением для принятия решений.

4. Если «План-Прогноз» не нарушает ключевых параметров базового плана, то он утверждается и замещает текущий план (выполняются процедуры по актуализации производственных заданий рабочим, которые были затронуты).

5. Если «План-Прогноз» или «Текущий план» значительно отклоняется от базового по показателям, то плановик цеха может инициировать пересчет производственного расписания и формирует «модельный план» для выработки решений с целью возврата к базовому плану или оптимизации. При этом план-прогноз может быть утвержден как временное решение, пока вырабатывается уточненный план. В рамках модельного плана могут быть приняты решения по преодолению ограничений: усиление бригад дополнительными работниками, сверхурочная работа, частичное выполнение операций с доработкой на последующих этапах и др.

6. Модельный план может быть утвержден в качестве текущего плана.

7. Если в результате пересчета не получается вернуть план к базовому, то происходит сообщение о проблеме на уровень вверх для пересчета сквозного плана или выделения дополнительных ресурсов.

8. Непрерывно в фоновом автоматическом режиме происходит сравнение плана, факта и прогноза с целью выявления отклонений, рисков и возможных проблем с вариантами их решения.

Такая схема работы с оперативным планом позволяет в локальном режиме обрабатывать все возмущения и находить компромисс локально.

Рассмотренная схема работы оказывается эффективной и на межцеховом, и на стратегическом уровне, различия будут только в источнике фактов и плана верхнего уровня.

3.6 Выводы

В рамках третьей главы получены следующие основные результаты:

1. Уточнено понятие цифровой экосистемы АИС для распределенного управления ресурсами предприятий ВТИ;
2. Разработаны функции и архитектура типовой АИС для управления ресурсами подразделения;
3. Предложена схема построения и разработаны функции и архитектура цифровой экосистемы АИС, основным элементом которой становится

сетецентрическая платформа для поддержки разработанных вертикальных и горизонтальных взаимодействий АИС стратегического уровня и уровня оперативного управления.

4. Детализированы и специфицированы основные сервисы сетецентрической платформы для создания цифровых экосистем АИС.
5. Разработанная схема построения цифровой экосистемы АИС и сетецентрической платформы может быть использована для широкого круга применений, включая управление планами проектов НИОКР, машиностроительного дискретного производства и эксплуатацией сложных высокотехнологичных изделий.
6. Разработанные ранее классы программных агентов элементарной ПВ-сети, создаваемой на уровне одного подразделения, доработаны для применения на уровне «система-система» в рамках построения открытых цифровых экосистем АИС для распределенного управления ресурсами.
7. Разработана структура планов и схема их согласования для АИС подразделений на примере процесса управления ресурсами цеха машиностроительного предприятия.
8. Разработанные методы и средства являются в значительной степени универсальными, не зависящими от специфики предметной области и организационной структуры предприятия.

4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ АИС

В данной главе приводится описание проведенных экспериментальных исследований с целью проверки возможности реализации предлагаемого подхода и получения оценки выигрыша при переходе от централизованного – к распределенному управлению ресурсами.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями [25, 35].

4.1 Методика экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований была разработана модель производства самолетов на основе проведенного системного анализа производственных процессов сборки самолетов МС-21.

Модель содержит схожие принципы организации производства, но имеет упрощенную структуру изделия, меньшее количество используемого оборудования и трудовых ресурсов. Данная модель отражает структуру реального производства и требует сопряженного планирования для разных цехов.

Целью проводимых экспериментов является проверка реализуемости предлагаемого сетецентрического подхода к планированию ресурсов и получение оценки выигрыша при переходе от централизованного – к распределенному управлению ресурсами для крупных предприятий.

Модель производства для проведения экспериментальных исследований включает в себя следующие аспекты:

— структура (схема) сборки изделия «Самолет»;
— ресурсная схема организации производства (структура производства и связи цехов);
— сквозной процесс сборки изделия «Самолет»;
— ресурсная модель (состав оборудования и персонала цехов);
— товарная программа.

Рассмотрим аспекты модели подробнее.

Изделие «Самолет» состоит из:

— фюзеляжа, состоящего из трех отсеков: переднего, центрального и хвостового;

— концевых частей крыльев (КЧК), Шасси, Двигателей;

— самолетного оборудования и агрегатов (рассматривается как единое целое).

Каждая секция состоит (собирается) из различного количества секций и имеет каркас пола. Каждая секция состоит (собирается) из трех панелей, которые сами производятся в рамках процесса. В рассматриваемой схеме крупные узлы и компоненты являются поставляемыми и не производятся в рамках сквозного процесса. В общем случае даты поставок данных компонентов могут выступать ограничениями по срокам начала операций сборки. Общая схема сборки изделия «Самолет» представлена на рисунке 19.

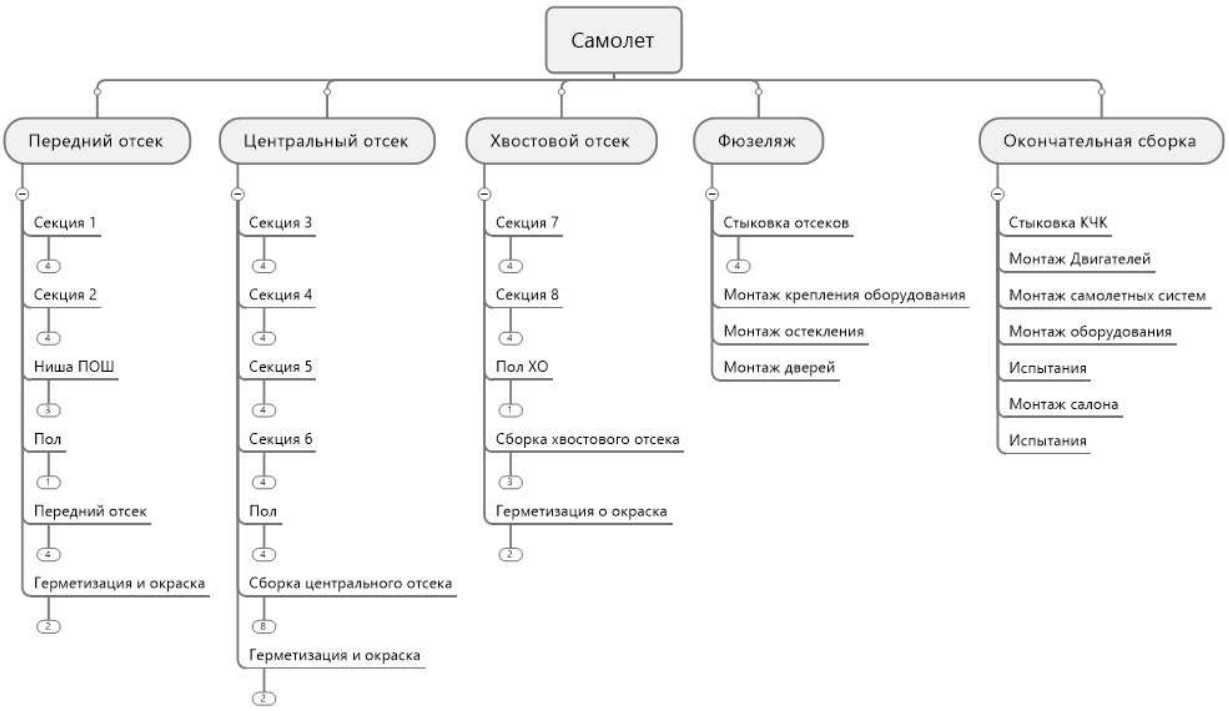


Рисунок 19 – Схема сборки изделия «Самолет»

Для сборки изделия моделируемый завод состоит из нескольких цехов, которые связаны в поточно-непрерывную линию. Это предполагает, что собираемые компоненты передаются от рабочего цеха к цеху, находясь в

постоянном движении. Моделируемое производство состоит из следующих производственных подразделений:

1. цех изготовления панелей и каркаса пола (ЦИП);
2. цех сборки переднего отсека (ЦСПО);
3. цех сборки центрального отсека (ЦСЦО);
4. цех сборки хвостового отсека (ЦСХО);
5. цех сборки фюзеляжей (ЦСФ);
6. цех окончательной сборки (ЦОС);
7. цех покраски (ЦП).

Цеха характеризуются наличием специализированного оборудования для сборки составных частей изделия и штатом необходимого персонала. Производственная схема связи цехов между собой представлена на рисунке 20.

Схема отражает последовательность сборки изделия и участие цехов в сквозном процессе. Сквозной процесс представляет собой набор взаимосвязанных операций изготовления и сборки составных частей, каждая из которых характеризуется трудоемкостью, длительностью и требованиями к необходимым ресурсам. Каждая операция описывается набором параметров в соответствии с разработанной ранее математической моделью. Разработанный сквозной процесс включает более 100 операций, которые связаны между собой различными отношениями следования. Обзорная схема сквозного процесса представлена на рисунке 21. Детальное описание состава операций процесса приведено в приложении.

Рисунок 20 – Схема связи цехов модельного производства

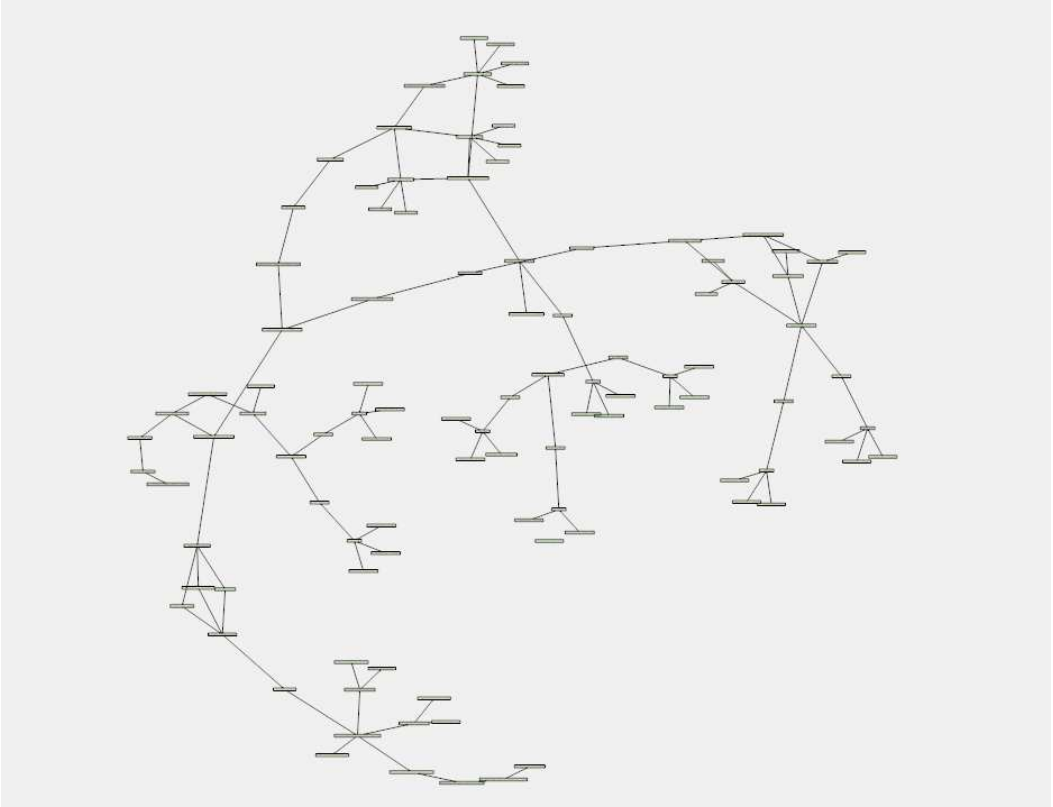


Рисунок 21 – Обзор схемы сквозного процесса сборки изделия «Самолет»

Рассмотрим общую схему процесса сборки изделия «Самолет»:

1. В цехе изготовления панелей производится сборка панелей для секций на оборудовании автоматической клепки панелей.
2. В цехе изготовления панелей производится сборка каркаса пола для различных секций на оборудовании клепки каркаса пола.
3. В цехе изготовления панелей производится сборка панелей для ниш шасси.
4. Изготовленные панели передаются в цеха сборки отсеков.
5. В цехах сборки отсеков выполняется процесс:

   5.1.из панелей собираются секции;

   5.2.секции на стапелях сборки отсеков собираются в отсеки;

   5.3.в отсеках монтируется пол самолета;

   5.4.устанавливаются элементы крепления оборудования;

   5.5.производится герметизация отсека;

   5.6.отсек передается на стыковку фюзеляжа.
6. В цехе сборки фюзеляжа отсеки стыкуются между собой, образуя фюзеляж;

7. В цехе сборки фюзеляжа производится монтаж крупных узлов: двери, остекления.
8. Собранный и испытанный на герметичность фюзеляж передается на окончательную сборку.
9. В цехе окончательной сборки на стапеле производится:
   9.1. Стыковка КЧК и двигателей;
   9.2. Установка шасси;
   9.3. Установка самолетных систем;
   9.4. Производятся финальные испытания.
10. Испытанный самолет передается на летные испытания.

Фрагмент сквозного процесса со связями представлен на рисунке 22.

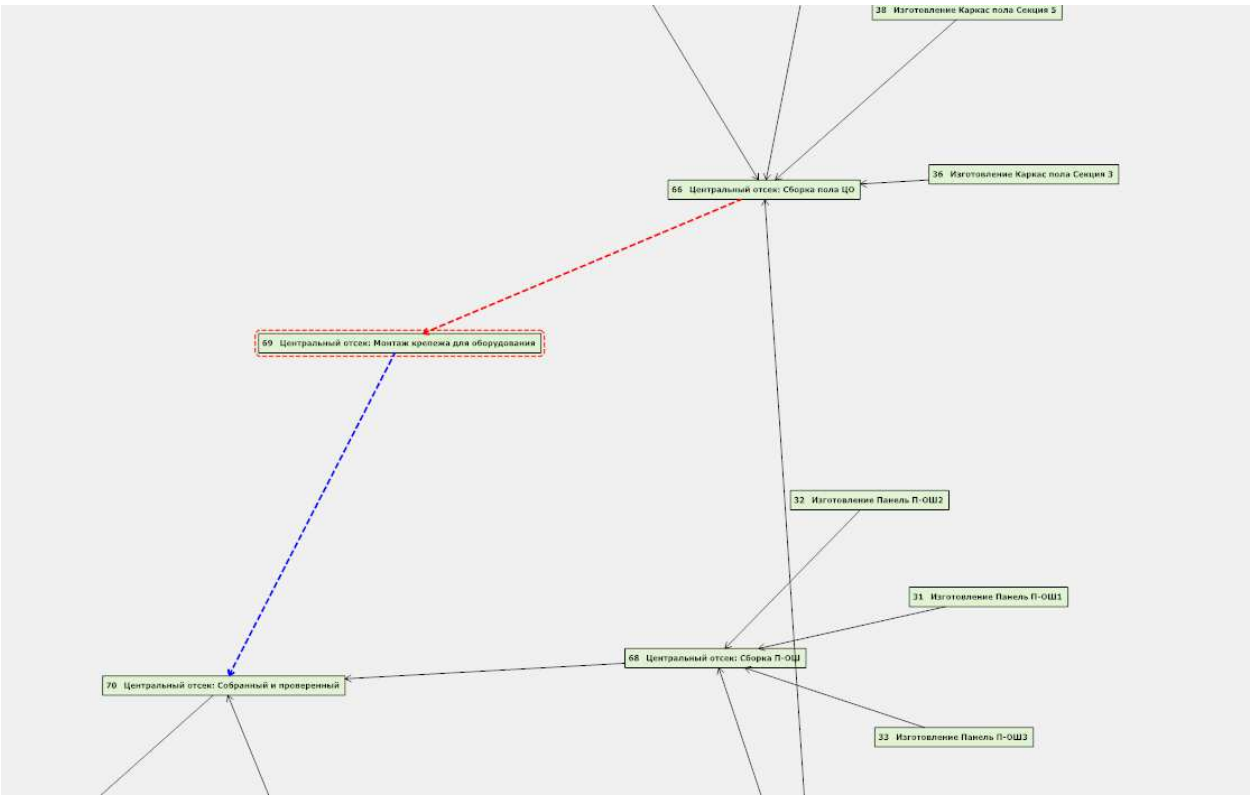


Рисунок 22 – Фрагмент визуализации сквозного процесса

Важной особенностью такого процесса является то, что множество работ выполняется одновременно, пока изделие находится в стапели. При этом при формировании расписания важно учитывать, что группа операций должна

выполняться на одном оборудовании и оно освободится только тогда, когда изделие будет передано на следующую стадию сборки.

Данный процесс сборки характерен для сборочного производства самолетов (МС-21, SuperJet), а также всех высокотехнологичных изделий. Для формирования производственного расписания необходимо спланировать сопряженную работу всех цехов, задействованных в них экземпляров оборудования и персонала.

Ресурсная модель включает в себя описание штата персонала и оборудования в терминах сквозного процесса.

Всего в рамках модели по всем цехам рассматривается численность штата 150 человек и 30 единиц оборудования.

Каждый ресурс характеризуется календарем доступности, описанным в количестве времени, доступного в течение рабочего дня.

4.2 Исследование производительности

Формирование производственного расписания для данного производства возможно на различных уровнях, но наиболее затратным по времени и сложности является построение оперативного детального плана сборки до уровня единиц оборудования и персонала.

В классическом подходе для решения данной задачи потребуется рассчитать план по всей товарной программе в едином пуле ресурсов. В предлагаемом подходе план будет рассчитан независимо для каждого цеха и согласован между собой посредством протоколов переговоров. Задача исследования заключается в сравнении показателей производительности и качества двух подходов.

Проведем серию экспериментов на одинаковом наборе ресурсов с постепенным ростом числа заказов. Для каждого эксперимента оценим показатели времени, необходимого для построения расписания, а также количественные показатели числа запросов агентов операций к ресурсам за размещениями и общего количества агентов, характеризующие объем необходимой памяти.

Для стратегического планирования ресурсов был выбран один из классических методов – модифицированный Constraints satisfaction метод, чтобы

оценить выигрыш от подхода в предельном случае. Для оперативного уровня использовался тот же метод для однородности результатов там, где адаптивность не требовалась.

Сравнивались результаты трех сценариев экспериментов (рисунки 23, 24):

— Эксперимент №1: Одна стратегическая «большая» АИС планирует сразу 8 цехов по изготовлению ВТИ;
— Эксперимент №2: Сеть «малых» АИС, отвечающих за каждый цех, планирует свою работу последовательно/параллельно по созданию частей ВТИ;
— Эксперимент №3: Стратегическая большая АИС рассчитывает начальный план и далее малые оперативные АИС строят свои планы (параллельно).

Измерялись временные затраты на расчеты производственного плана с учетом постепенного роста числа заказов.

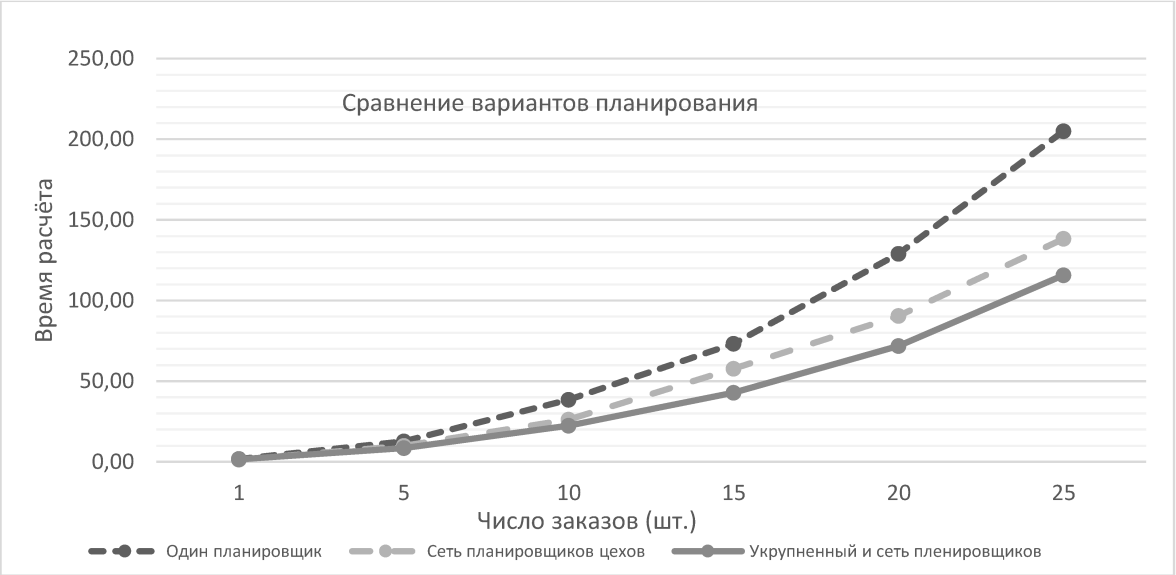


Рисунок 23 - График зависимости времени вычислений от выбранного сценария

По результатам анализа данных экспериментов можно сделать следующие выводы:

— время расчета для одной АИС в эксперименте №1 начинает расти экспоненциально, что ограничит возможности метода в централизованном варианте управления ресурсами;
— время расчета при сетецентрическом подходе в эксперименте №2 растет более плоско по степенной функции;

— время расчета в эксперименте №2 зависит от структуры производственной сети: при последовательном характере производства рост производительности на фазе планирования незначительный. Однако, события обрабатываются локально в АИС-ОУ за время, не превышающее продолжительность расчета одного плана;

— время расчета в эксперименте №3 растет медленнее и не зависит от структуры производства. Время расчета плана АИС-СП растет по степенной функции. Время расчета каждого оперативного плана не превышает 15% от общего времени.

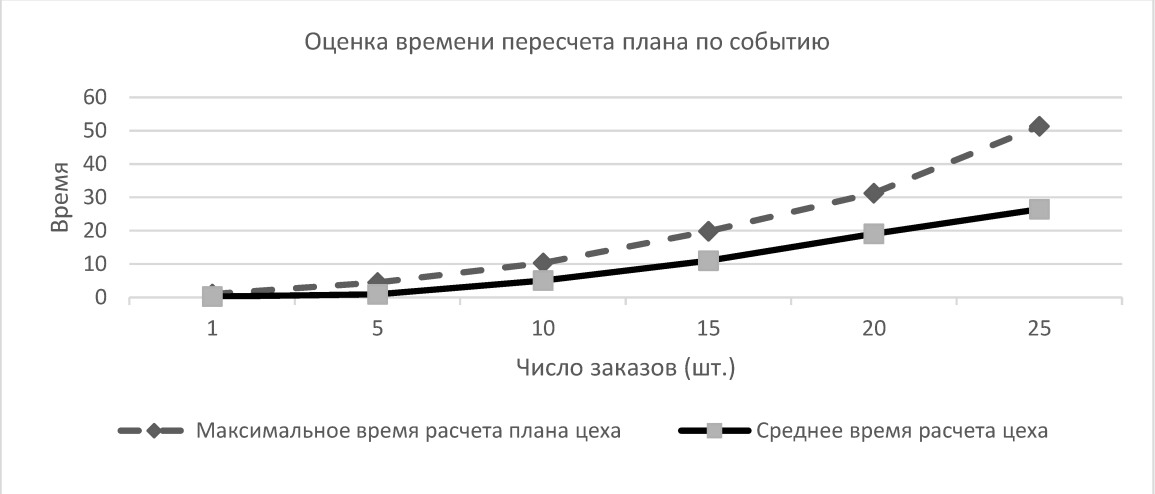


Рисунок 24 - График зависимости времени вычислений для одного цеха

Результаты экспериментов показывают, что переход от централизованной – к распределенной «системе АИС систем» для согласованного построения планов крупного производственного предприятия может быть реализован на практике.

Переход к распределенному режиму позволяет формировать комплексные планы за меньшее время (в среднем в 1,45 раза быстрее) без потери качества по целевой функции. Максимально локальная обработка событий в рамках каждой АИС с эскалацией событий в другие системы лишь в случае, если локально обработать событие не получается, позволяет работать АИС предприятия в целом в режиме реального времени за счет параллельных вычислений и постоянной синхронизации планов на всех уровнях.

В этой связи разработанный подход может обеспечить повышение оперативности, гибкости и эффективности процессов принятия решений, а также

производительности, масштабируемости, надежности и живучести распределенных АИС предприятий.

4.3 Выводы

В рамках четвертой главы были получены следующие результаты:

1. Сформулирована задача экспериментального исследования для проверки реализуемости предлагаемого подхода к планированию ресурсов и получения оценки выигрыша при переходе от централизованного – к распределенному управлению ресурсами для крупных предприятий.
2. Разработана методика проведения экспериментального исследования для решения поставленной задачи и обоснования возможности построения открытых цифровых экосистем АИС для распределенного управления ресурсами на основе разработанных протоколов вертикально-горизонтальных взаимодействий АИС стратегического планирования и АИС оперативного управления.
3. Проведены запланированные эксперименты на примере решения задачи распределенного управления ресурсами в агрегатно-сборочном производстве самолетов МС-21 для ПАО «Яковлев».
4. Результаты экспериментов в задаче планирования сборки самолетов показывают возможность обеспечить повышение оперативности, гибкости и эффективности процессов принятия решений, а также производительности, масштабируемости, надежности и живучести распределенных АИС предприятий.

5 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В данной главе приводится описание разработки и внедрения методов и средств построения цифровых экосистем АИС для управления ресурсами предприятий, ведущих разработку проектов, производство и эксплуатацию ВТИ по государственным контрактами (ГК) и контрактам по гособоронзаказу (ГОЗ), а также в других применениях.

В Приложениях А – Д представлены акты внедрения результатов.

В Приложении Е представлен перечень свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Материал главы излагается в соответствии с публикациями соискателя [25, 26, 35].

5.1 Управление ГОЗ проектами НИОКР в МАК «ВЫМПЕЛ»

Разработанная распределенная АИС реализует сопряженное планирование проектов НИОКР в подразделениях Конструкторского бюро МАК «Вымпел», обеспечивая согласованное планирование на двух уровнях: укрупнённом и оперативном, который формирует планы сотрудников подразделений.

В настоящий момент система реализована в полном объеме и проходит опытную эксплуатацию в КБ.

В системе планируются все проекты НИОКР (более 60) корпорации, примерно 50 тыс. связанных задач.

Примеры экранов представлены на рисунке 25 (а и б).

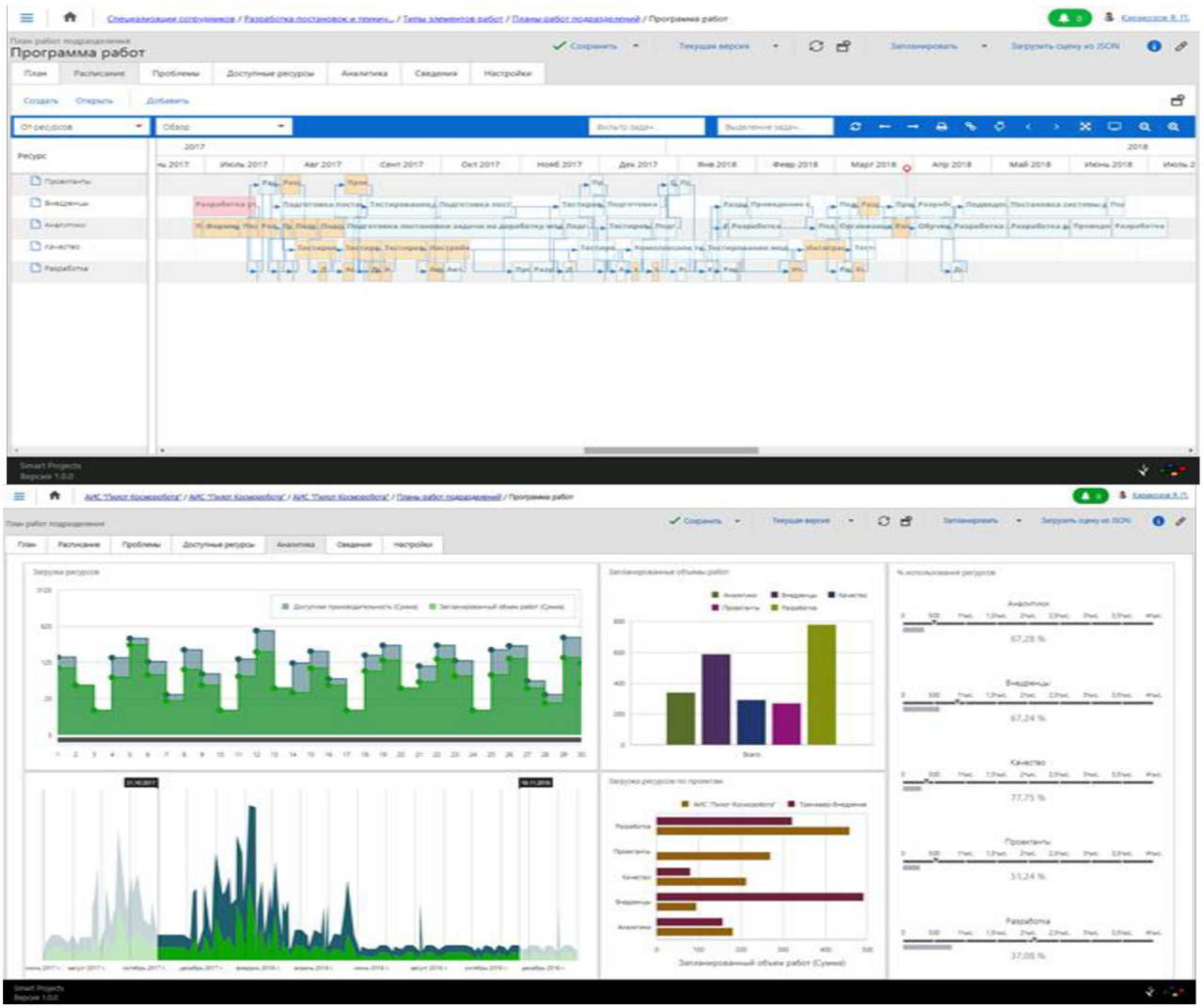


Рисунок 25 – Виды экранов АИС «Вымпел»:
а) диаграмма Перта производственного плана подразделений;
б) показатели выполнения плана и загрузки производственных подразделений.

Система позволяет разрабатывать сетевые планы-графики, производить в автоматическом режиме балансировку загрузки подразделений, детализировать планы до уровня специалистов, формировать оперативные планы работ подразделений и задания для предприятий соисполнителей и обеспечивающих подразделений.

Система формирует и корректирует по событиям два вида планов:

— Долгосрочный план реализации программы НИОКР – до 3 лет, все СПГ в едином пуле трудовых ресурсов до уровня пропускной способности
— Оперативное планирование работы каждого подразделения до уровня конкретных сотрудников по заданиям из разных проектов.

Планы синхронизируются между собой в случае событий четырех типов.

Среднее время на формирование планов:

— Долгосрочный план – 1,5 часа (180 проектов, на горизонте 3 лет)
— Оперативного плана подразделения – 8 минут (150 конструкторов, 2 тыс. задач на горизонте три месяца).

Результаты внедрения: сокращение сложности и трудоемкости планирования примерно в 2 раза (по сравнению с реализацией процесса в «ручном» режиме), повышение прозрачности и контролируемости процессов реализации проектов по государственному оборонному заказу, уменьшение возможных рисков срыва поставок продукции.

Акт об использовании результатов работы в интересах «МАК Вымпел» приведен в приложении А.

Ранее в организации решалась аналогичная задача для «РКК «Энергия», в которой были впервые созданы макеты сетецентрической платформы и системы управления проектами АИС-Проекты. Акт о использовании результатов работы в интересах «РКК Энергия» приведен в приложении Б.

5.2 Управление ресурсами цехов агрегатной и окончательной сборки самолетов МС-21 в АО «ИРКУТ»

Рассмотренные в настоящей работе принципы формирования многоуровневых планов и решения задачи распределенного управления ресурсами в масштабе предприятия были использованы для формирования и корректировки производственного расписания сборки среднемагистральных самолетов МС-21, выполняемой на Иркутском Авиационном Заводе (ИАЗ).

Самолет МС-21 является современным проектом авиационной промышленности России, в рамках которого создается принципиально новый современный пассажирский самолет с применением композитных материалов, эффективных двигательных установок и повышенной комфортности для пассажиров (ближайшими аналогами являются Airbus A320 и Boeing 737-MAX).

Одной из проблем этого нового производства является сложность многоуровневого планирования и контроля использования производственных ресурсов, включая персонал, оборудование, материалы, финансы, поставки и др.

Эта проблема особенно актуальна на этапе освоения производства (Ramp-Up), когда новое изделие еще только выходит в серийное производство. На этой стадии особенно часто возникают непредвиденные события и требуется постоянная адаптация планов, чтобы план соответствовал реалиям и можно было точно прогнозировать работу и обеспечивать сдачу продукции точно в бюджет и сроки.

Рассмотрим характеристики задачи производства и сборки МС-21:

— производство до 72 изделий в год на одной производственной площадке;
— сборка изделия включает тысячи узлов и агрегатов со совей технологией;
— сборка изделий организована в виде поточной линии, фактически – конвейер, где задержка на одном из участков может сорвать график выпуска продукции;
— производство работает в многосменном режиме, близком к круглосуточному;
— в сборке участвует несколько тысяч рабочих различных специальностей, которые распределены между десятком цехов;
— задействуется уникальное сложное оборудование: стапели сборки, средства логистики крупных агрегатов и самолета в целом, промышленные роботы;
— над производственными заказами одновременно работает бригада, включающая специалистов разной специализации и уровня;
— общий цикл сборки изделия от агрегатов до конечного изделия должен составлять порядка 60 дней;
— для обеспечения непрерывности сборки необходима своевременная поставка десятков тысяч комплектующих, доставляемых из различных частей мира.

Основные функции распределенной АИС для сборки МС-21:

- Стратегическое планирование максимального выпуска предприятием товарной продукции с учетом доступных ресурсных мощностей, а также с учетом планов поэтапной модернизации производственной инфраструктуры;
- Формирование различных версий сквозного производственного расписания цехов на значительный горизонт времени с различной степенью детализации плана, с учетом межцехового взаимодействия, разными параметрами производственной инфраструктуры и режимами работы;
- Расчет и анализ загрузки ресурсных мощностей и отслеживания узких мест в производственном процессе;
- Формирование уточненного плана комплектации на основании утвержденного сквозного производственного расписания;
- Оперативное планирование реализации производственных заказов на горизонте до месяца для каждого рабочего центра и выдача сменных заданий для каждого рабочего;
- Интеграция с корпоративными информационными системами с целью получения актуальной информации о заказах, ресурсах, графиках обслуживания, технологических процессах и данных о состоянии поставок комплектующих и материалов;
- Накопление специальных сведений о производстве в базе знаний системы, содержащей дополнительную информацию об изделиях и техпроцессах, оборудовании и оснастке, компетенциях и опыте рабочих и других особенностях производства, позволяющих улучшить качество формируемых планов;
- Анализ, формирование и выбор вариантов решения проблем, возникающих при выполнении производственного расписания;
- Адаптивное перепланирование всех планов в случае возникновения отклонений, влияющих на первоначальное производственное расписание.

В ходе разработки было предложено решать задачу планирования на трех уровнях: долгосрочном, сквозном и оперативном и реализовать схему планирования, рассмотренную в разделе 5.

В результате архитектура распределенной АИС включает три типа АИС для каждого уровня планирования; в целом, на сегодня это одна АИС стратегического планирования, две сквозных АИС и 7 АИС оперативного управления цехами, которые работают в режиме 24/7 в реальном времени.

Общая схема работы АИС-Иркут для формирования совокупного плана сборки самолетов МС-21 выглядит следующим образом:

1. Из Корпоративных систем в базу знаний АИС-Иркут загружаются основные сведения о производственных процессах и ресурсах;
2. В АИС стратегического планирования формируется план реализации товарной программы на горизонт в пять лет. Данный план строится до уровня АИС ОУ цехов линии сборки и используемого стапельного оборудования с дискретизацией планирования до дней.
3. Сформированный стратегический план утверждается и передается на исполнение в производство и службу комплектации.
4. Часть плана, запускаемая в производство, передается в сквозные АИС агрегатного производства и окончательной сборки.
5. В сквозной АИС каждой группы цехов стратегический план детализируется до уровня реальных производственных заказов и формируется сквозной план на горизонт до 6 месяцев. Сквозной план строится до уровня АИС рабочих центров цехов и специализаций рабочих с учетом реального графика поставок комплектующих, режимов работы и графика технического обслуживания оборудования. Главным ограничением при формировании плана являются утвержденные сроки стратегического плана.
6. Если в результате формирования сквозного плана утвержденные сроки не могут быть выполнены, сквозная АИС посредством вертикальных протоколов переговоров запрашивает у стратегической АИС либо изменение сроков, либо увеличение доступных ресурсов. Процесс согласования плана продолжается до тех

пор, пока не будет сформирован исполнимый сквозной план для группы цехов, взаимоувязанный с внешними производствами и поставщиками.

7. Сформированный сквозной план утверждается и передается на исполнение в АИС цеха. Такие параметры как сроки запуска и завершения заказов, режимы работы персонала цехов являются ограничениями для оперативных планировщиков цехов.

8. В АИС цехового уровня на основании согласованного межцехового плана формируются детальные оперативные планы до уровня конкретных рабочих с детализацией до сменных заданий. Главная задача – обеспечить реализацию сквозного плана и утвержденные сроки в рамках выделенных ресурсов.

9. В случае невозможности обеспечить утвержденные межцеховые сроки оперативная АИС цеха производит сессию переговоров со сквозным планировщиком для разрешения конфликта за счет изменения сроков или выделения дополнительных ресурсов.

10. На этапе исполнения плана в цехах фиксируются факты запуска и завершения заказов, брак и другие события, в том числе непредвиденные.

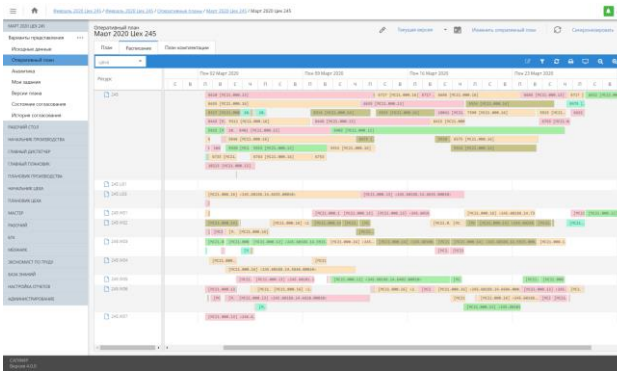
11. В ходе выполнения плана в цехах возникает факт, который передается наверх для автоматического перепланирования и коррекции вышестоящих планов.

12. При возникновении проблемных событий на уровне цехов строятся планы по типу «Что будет, если», которые позволяют выбрать варианты решений.

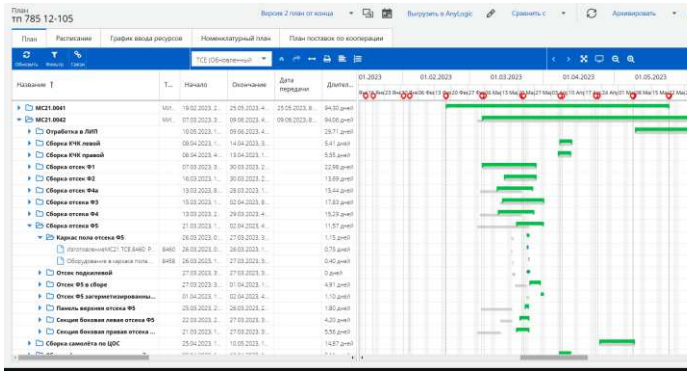
Разработанный подход позволяет вместо одного глобального плана построить сеть связанных между собой локальных планов, которые постоянно самосинхронизируются между собой методом «набегающей волны» («прилив-отлив») в автоматическом режиме с учетом интересов всех участников.

На этапе исполнения построенные планы обычно корректируются по фактическим событиям, но главная цель АИС-Иркут – минимизировать отклонения от вышестоящего плана на каждом уровне за счет гибкой перестройки планов и рационального использования заложенных резервов.

Примеры экранов системы приведены на рисунке 26.



а)



б)

Рисунок 26 – Примеры экранов ИСУР для производства: а) план загрузки ресурсов, б) план выполнения заказов

Если в рамках цеха нет возможности обеспечить передачу изделия в другой цех вовремя, оперативный планировщик может сначала произвести переговоры с планировщиком другого цеха для согласования задержки, т.к. в следующем цехе может быть возможность «нагнать» сроки или имеются свои резервы. Если такие отклонения незначительны, пересматривать весь межцеховой план не требуется, а достаточно его актуализировать по принятым локальным решениям.

В настоящий момент АИС-Иркут для управления сборкой самолетов МС-21 реализована в полном объеме и проходит апробацию на производстве. В системе планируются все рабочие и оборудование всей линии сборки конечных изделий (примерно 5 тыс. единиц ресурсов).

Среднее время на формирование стратегического плана – 3 часа (300 изделий на горизонте 5 лет), сквозного плана – 1 час (50 тыс. заказов на 6 месяцев), оперативного плана цеха – 45 минут (200 рабочих, 4 тыс. производственных операций на горизонт один месяц).

Время корректировки стратегического и сквозного плана составляет в среднем от 5 до 13 минут, оперативного – от 1 до 5 минут.

Первые результаты показали, что применение многоуровневого планирования позволяет сократить время разработки оперативных планов цехов на 75% по сравнению с планированием без учета вышестоящих планов и сокращает количество ресурсных конфликтов в 3 раза.

В Приложении В представлен акт внедрения результатов работы.

5.3 Управление эксплуатацией инфраструктуры в «ЦУП-ЦНИИМАШ»

Рассмотренные в настоящей работе принципы формирования многоуровневых планов и решения задачи распределенного управления ресурсами в масштабе предприятия были использованы для решения задачи сопряженного планирования обслуживания элементов инфраструктуры Базового ЦУП Роскосмоса и их целевого задействования.

Целью проекта являлось создание специализированного программного обеспечения автоматизированной интеллектуальной системы управления ресурсами базового ЦУП Роскосмоса, которое должно обеспечивать автоматизацию всего комплекса процессов управления ресурсами базового ЦУП при реализации деятельности по управлению КА.

В рамках данного проекта были разработаны алгоритмы и реализовано программное обеспечение, которое решает задачу сопряженного планирования задействования КА, необходимых ресурсов НАКУ КА и ресурсов ЦУП сопряженно с графиками технического обслуживания ресурсов наземной инфраструктуры и происходящих нештатных ситуаций.

В рамках проекта была разработана система, которая позволяет вести реестр объектов всей инфраструктуры, формировать графики технического обслуживания и ремонта объектов инфраструктуры на длительный горизонт и формировать оперативный план обслуживания до уровня конкретных специалистов.

Разработанные методы сопряженного планирования позволили в рамках проекта построить двухуровневую модель планирования: сначала формировался план задействования инфраструктуры в соответствии с программами полета каждого КА, проведения тренировок, других целевых задач и технического обслуживания средств инфраструктуры на горизонт до 3 месяцев. Далее сформированный план передавался на исполнение в АИС управления работами обслуживания конкретных подразделений, где план детализировался для уровня задач сотрудников на скользящем горизонте до месяца.

При возникновении нештатных ситуаций или появлении незапланированных задач производилась корректировка оперативного плана и далее, при необходимости, сквозного.

В результате проекта была разработана АИС, которая интегрирована с другими комплексами (телеметрии, баллистики и др.). Основными пользователями системы являются руководители подразделений, отвечающих за планирование, а также специалисты отдела оперативной организации работ.

Виды экранов системы приведены на рисунках 27-29.

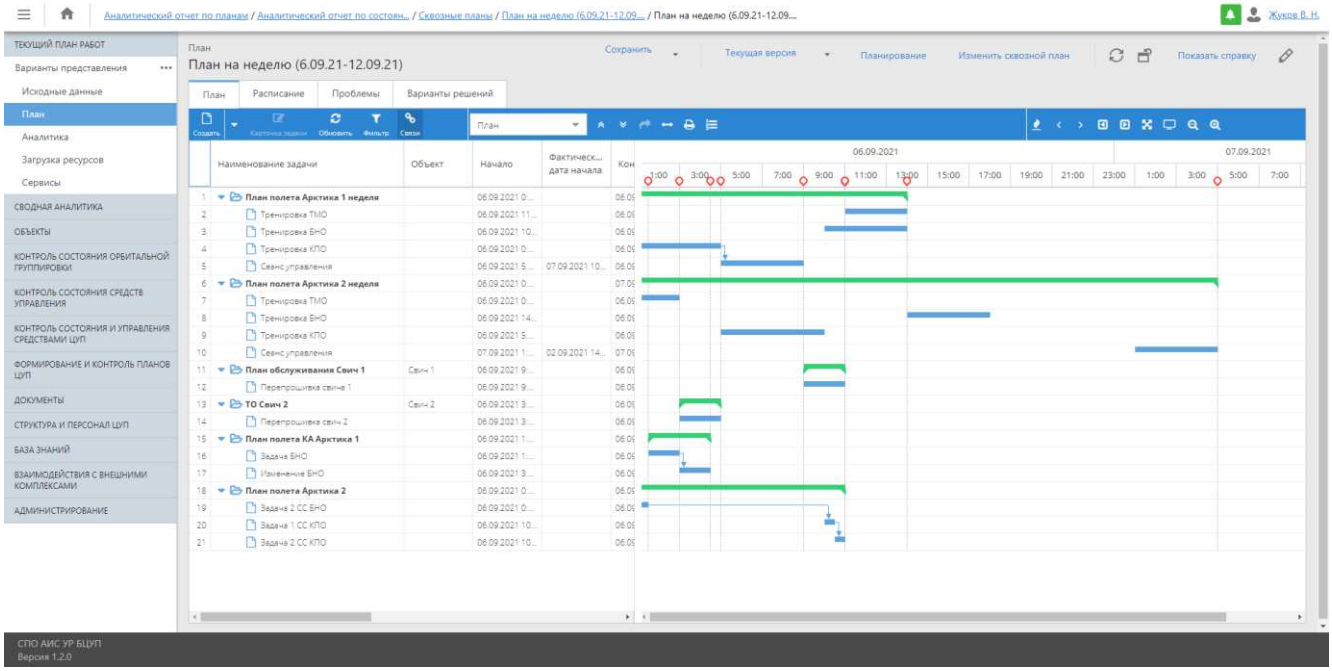


Рисунок 27 – Экран сквозного плана ЦУП

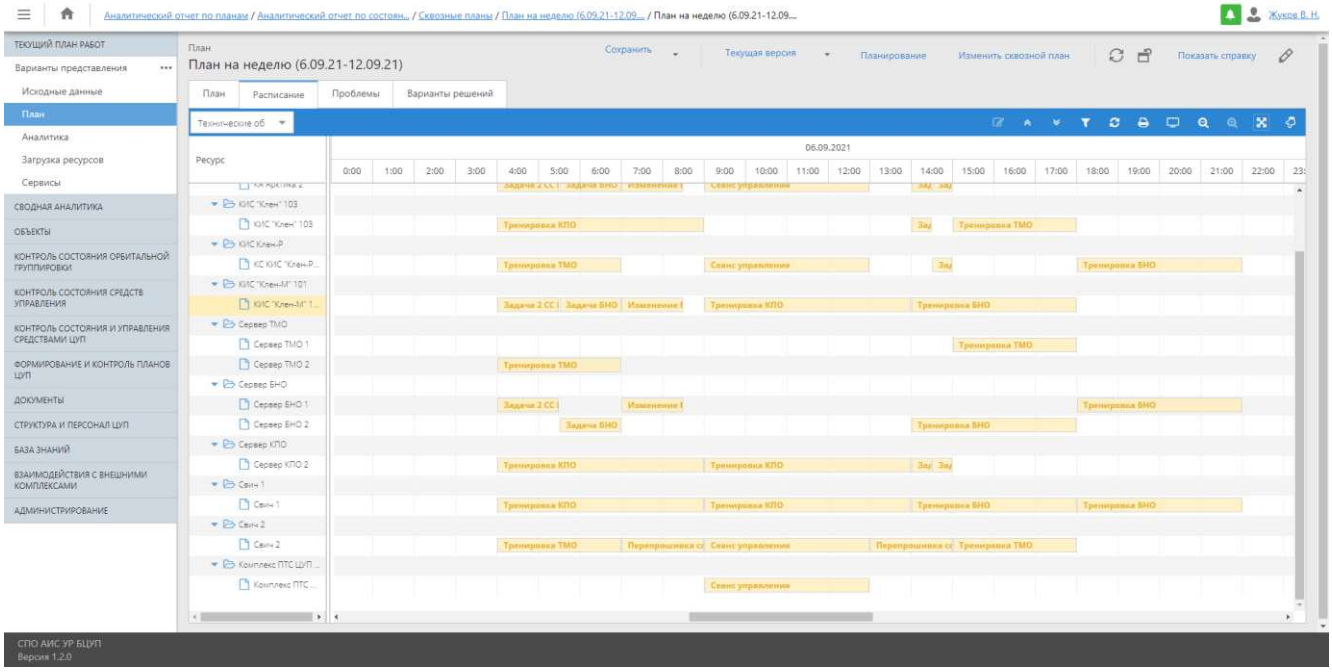


Рисунок 28 – Экран управления расписанием ЦУП

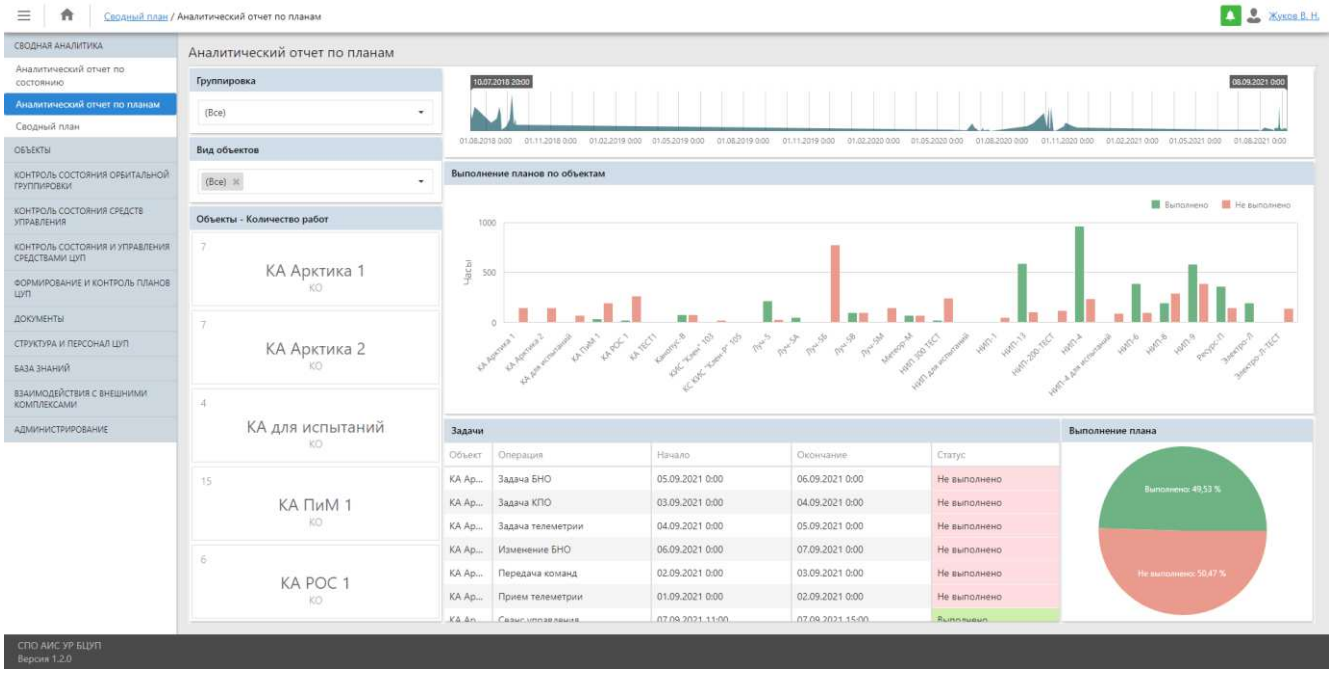


Рисунок 29 – Экран сводного мониторинга выполнения планов

Применение системы позволило впервые решить задачу сопряженного планирования обслуживания и целевого применения инфраструктуры ЦУП. Формирование сводного плана для всего ЦУП на сквозном горизонте занимает 1,5 часа и включает планы по 85 объектам, на оперативном уровне формирование плана занимает 35 минут для 120 человек обслуживающего персонала.

В Приложении Г представлен акт внедрения результатов работы.

5.4 Управления кооперацией электротехнических предприятий

В настоящем разделе рассмотрено решение задачи создания цифровой сетецентрической платформы для управления предприятиями электротехнической отрасли, выполненной по проекту Минпромторга РФ. Данный проект выполнялся в ООО «НПК «Разумные Решения» с 2020 по 2022 годы. Сведения о проведенном исследовании изложено в работе автора [35, 26].

Задачей являлось автоматизация формирования цепочек коопераций предприятий при поставке относительно небольших, но уникальных по конфигурации электроподстанций в интересах крупных проектов: модернизация энергорайонов, освоение новых месторождений полезных ископаемых нефти и газа, модернизации производств и ряд других.

Для решения задачи требуется формировать цепочки кооперации промышленных предприятий в реальном времени, т.е. в момент формирования запроса от крупного заказчика с учетом текущей загрузки, компетенций, доступных ресурсных мощностей и ограничений каждого предприятия.

При этом ручной режим таких переговоров крайне сложный и трудоемкий – каждому предприятию потребуется держать целый штат работников, чтобы знать состояние и планы предприятия, проверять наличие комплектующих на складе или стоимость и срок их заказа на стороне, планировать производственные процессы с учетом особенностей изделий, технологических процессов, станков и компетенций рабочих предприятия, а также отвечать через формирование технико-коммерческих предложений (ТКП) на каждый запрос, которых может приходить до10 в день от разных заказчиков.

Однако, не менее сложная часть этого процесса состоит в том, чтобы, анализируя получаемые предложения от потенциальных исполнителей, понять, какое из предприятий может войти в формируемую цепочку и в какой части производимого изделия. При этом итоговая сеть должна быть построена таким образом, чтобы быть выгодной и заказчику, и исполнителям за счет баланса

распределения объемов заказов, цены и взаимных уступок в счет общей выгоды. Важным стимулом участия в такой кооперации могут быть принципы «солидарной экономики», согласно которым, если цепочка сложится и сводный план будет принят, из образующейся общей прибыли можно будет возместить убытки предприятиям, согласившимся на уменьшение цены или отказ от части своей поставки ради интересов кооперационной цепочки в целом.

Архитектура цифровой экосистемы для решения поставленной задачи строится аналогично одному производственному предприятию, в котором взаимодействуют его цеха. Но теперь для каждого предприятия создается своя АИС, которая выполняет стратегическое планирование его внутренних ресурсов, Заказчику предлагается АИС для стратегического планирования всего комплексного проекта, собираемого из планов отдельных предприятий. Архитектура распределенной цифровой платформы отрасли показана на рисунке 30.

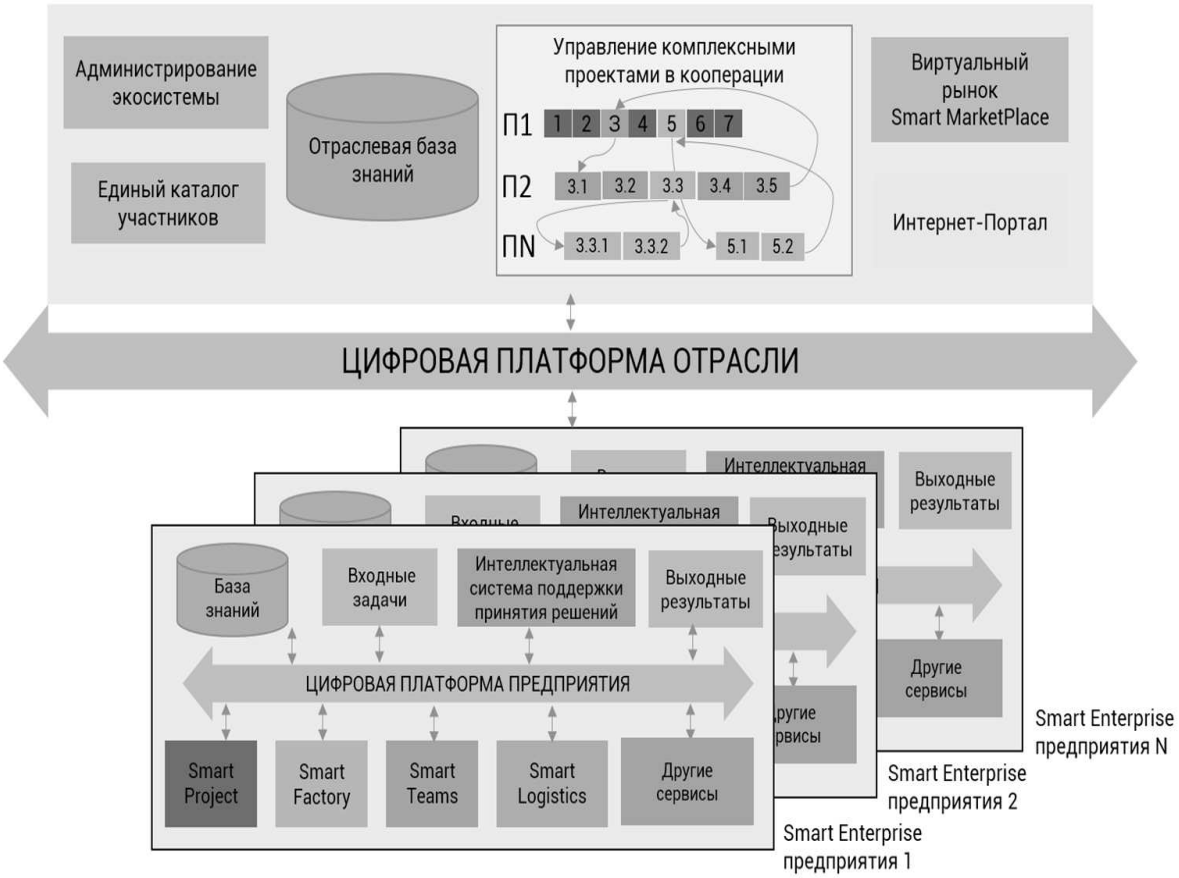


Рисунок 30 – Архитектура цифровой платформы отрасли

В экосистеме взаимодействия заказчика и исполнителей выполняются в формате вертикального взаимодействия, в ходе которого Заказчик задает начальные условия по работам, а исполнители предлагают план их выполнения. Если на этапе исполнения у одного из исполнителей возникает существенное отклонение по срокам, через АИС заказчика выполняется корректировка сводного плана и выдача новых сроков для всех участников кооперационной цепочки. Данный принцип самоподобен, так, если производитель будет выставлять запрос на получение комплектующих или будет заказывать другие работы, он будет выступать заказчиком, а организации – исполнителями.

Взаимодействия участников на этапе переговоров и далее на этапе исполнения производятся уже по горизонтальным протоколам взаимодействия. В рамках таких взаимодействий на этапе переговоров о запросе организации могут договариваться о распределении частей запроса. В рамках этапа исполнения участники договариваются о сдвиге сроков за счет компенсаций или для обмена ресурсами, технологиями и др.

Общая логика работы такой цифровой экосистемы отрасли показана на рисунке 31.

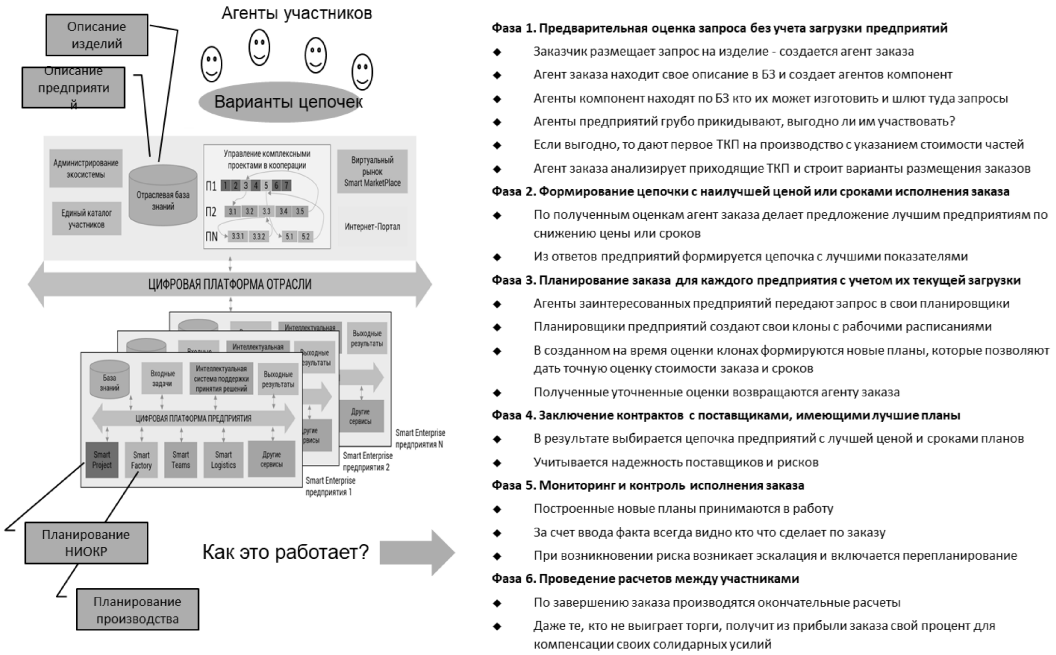


Рисунок 31 – Принцип работы цифровой экосистемы электротехнической отрасли промышленности

На рисунках 32 и 33 показаны основные экраны автономных интеллектуальных систем Заказчика и Исполнителя.

АИС каждого исполнителя предоставляет набор функций для детализации получаемых заданий, формирования планов работ и оценки исполнимости с учетом имеющихся ресурсов, построения расписания работ. На основании сформированных детальных планов формируется ТКП для заказчика.

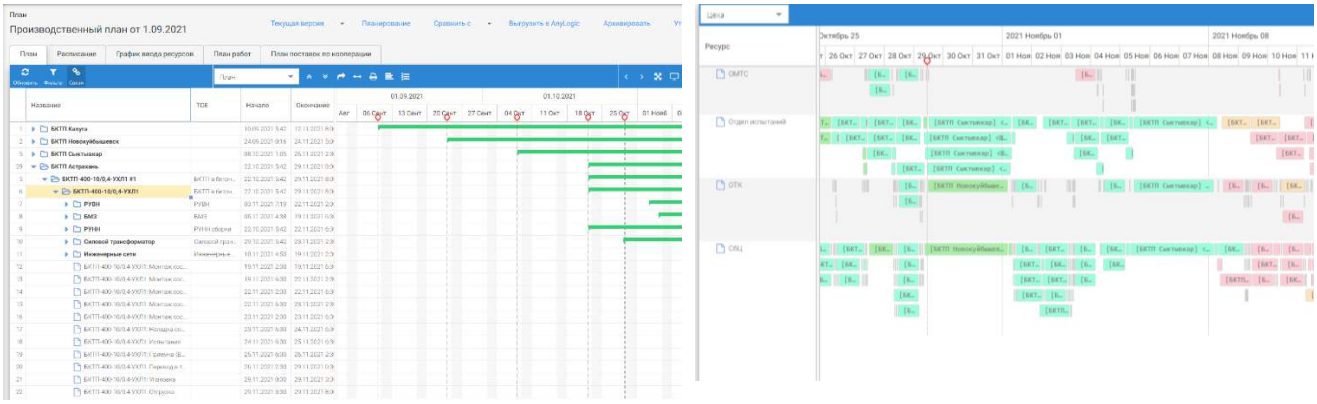


Рисунок 32 – Экраны АИС-Исполнителя для формирования плана-графика и расписания

Заказчик, получая план в своей АИС, может сравнить планы по набору показателей и выбрать лучший, либо передать эту задачу в специализированный сервис цифрового рынка, в котором агенты представителей организации будут в автоматическом режиме проводить процедуру торгов для поиска сбалансированного решения.

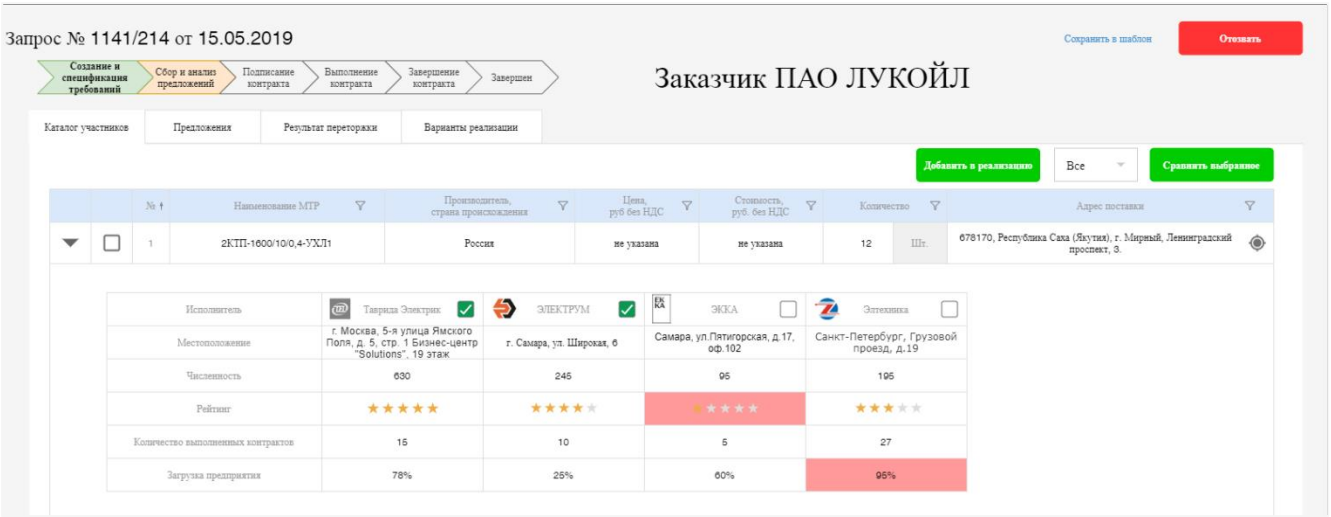


Рисунок 33 – Анализ ответов от АИС-Исполнителей в АИС заказчика

Система была разработана в интересах индустриальных партнеров – предприятий электротехнической отрасли и передана оператору платформы ООО «КОМЛОГ». На этапе отработки была проверена работа такой цифровой экосистемы, включающей 10 предприятий: 3 заказчика и 7 исполнителей с различными профилями загрузки, заданных параметров целевых функций и стоимостью ресурсов.

В Приложении Д представлен акт внедрения результатов работы и свидетельство о регистрации программы.

5.5 Выводы

В рамках пятой главы получены следующие основные результаты:

1) Рассмотрены применения разработанных моделей, методов и средств для решения прикладных задач управления ресурсами:
    a. Управления ГОЗ проектами НИОКР в МАК «ВЫМПЕЛ»;
    b. Управления агрегатными сборками самолетов в АО «ИРКУТ»;
    c. Управления эксплуатацией инфраструктуры в «ЦУП-ЦНИИМАШ;
    d. Управление цепочкой кооперации предприятий электротехнической отрасли, выполненной по проекту Минпромторга РФ.

2) Для каждого из приложений описаны цели и задачи разработки, функциональные возможности и особенности архитектуры разрабатываемых АИС, рассмотрены основные сценарии использования и результаты применения.
3) Результаты внедрения разработанных АИС на производстве показывают принципиально новые возможности по использованию систем распределенного управления ресурсами нового класса для предприятий, не только решающих задачу импортозамещения, но и превосходящих существующие зарубежные ERP системы по своим возможностям:
    a. В задаче управления проектами НИОКР для МАК «Вымпел» результаты применения разработанных методов и средств позволили на 25% сократить трудоемкость планирования проектов.
    b. В задаче управления производством сборки самолетов МС-21 для ПАО «Яковлев» разработанная система позволила в 3 раза сократить трудоемкость построения и согласования планов, а также многократно повысить их обоснованность и достоверность по сравнению с используемой ранее системой ERP LN (BAAN), которая не учитывала специфику процессов и давала погрешность планирования на 1.5 года.
    c. В задаче управления эксплуатацией инфраструктуры «ЦУП-ЦНИИМАШ» применение системы показало сокращение трудоемкости планирования и сопряжения планов на 15%, а также позволил исключить наложение сервисных планов на планы полетов космических аппаратов, что снижает возможные риски.
    d. В задаче управления кооперацией в электротехнической отрасли показана возможность масштабирования разработанных методов и средств АИС на отраслевой уровень, что позволит на 40% сократить транзакционные издержки.
4) Результаты разработок могут быть использованы для других предприятий.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управление ресурсами для крупных производственных предприятий, включающих в себя конструкторские бюро, производственные цеха и работающих по всем стадиям жизненного цикла ВТИ в части управления проектами, производства и эксплуатации изделий, обладает важными особенностями, которые не учитывают существующие системы управления.

Кроме того, в настоящее время многие такие предприятия переживает ряд новых вызовов, связанных с высокой неопределенностью и динамикой изменения спроса и предложений.

В этих условиях становится актуальной и значимой задача перехода от традиционных централизованных, иерархических и последовательных систем с каскадным управлением ресурсами – к распределенным, сетевым, параллельным и асинхронным системам, сочетающим стратегическое укрупненное планирование и оперативное управление подразделениями. Проведенный анализ наиболее популярных автоматизированных систем управления ресурсами класса ERP- и MES-систем показывает их ограничения для сопряженного решения задач стратегического и оперативного уровней, которые не позволяют решать поставленную задачу в части обеспечения процессов синхронизации производственных планов и поиска согласованных вариантов решений в интересах предприятия в целом.

В качестве альтернативы существующему «каскадному» подходу к управлению предприятиями, в котором имеется одна автоматизированная система и строится один глобальный производственный план на все подразделения, который каскадно доводится сверху вниз до подразделений без обратной связи, предлагается «распределенный» подход к управлению предприятиями, в котором создаются АИС стратегического планирования и оперативного управления для каждого подразделения, в каждой из которых строится и контролируется собственный план подразделения, а общий план формируется лишь временно по соответствующему запросу к указанным АИС системам. Предложенный распределенный подход предполагает построение многоуровневой «системы

систем» АИС с постоянной, непрерывной, асинхронной, параллельной работой систем и их p2p взаимодействием для согласования планов.

Для реализации подхода предложена схема построения цифровой экосистемы АИС, реализуемой на основе сетецентрической платформы, поддерживающей вертикальные и горизонтальные взаимодействия АИС. При этом рассмотренные АИС могут играть роль умных цифровых двойников процессов управления предприятиями, начиная снизу от уровня управления участками и цехами – до управления предприятиями и отраслевыми цепочками их кооперации.

Показана возможность реализации цифровых экосистем АИС на основе сочетания классических методов планирования и оптимизации ресурсов для стратегического планирования ресурсов на большой горизонт времени и оперативного управления ресурсами на основе онтологий и мультиагентных технологий для отработки событий в режиме реального времени.

Показаны примеры применения разработанных методов и средств для решения задач распределенного управления ресурсами предприятий проектного и производственного типа.

В рамках диссертационной работы были получены следующие результаты:

1) Проведен системный анализ процессов управления ресурсами для предприятий ВТИ, показавший необходимость решения задачи многоуровневого вертикально-горизонтального сопряжения укрупненных планов предприятия и оперативных планов его подразделений для выполнения заказов в заданные бюджеты и сроки.
2) Разработан метод сопряженного вертикально-горизонтального взаимодействия АИС укрупненного и оперативного уровней предприятия, пригодный для параллельной обработки данных и построения согласованных планов масштаба подразделения предприятия, предприятия в целом и цепочек их кооперации.
3) Разработаны схема построения, функции и архитектура многоуровневой цифровой экосистемы АИС на основе сетецентрической платформы, обеспечивающей сопряжение укрупненного плана работы предприятия и

оперативных планов его подразделений при возникновении событий рассогласований в реальном времени.

4) Создана базовая многоуровневая экосистема АИС, нашедшая применение для управления ресурсами в проектах, производстве и эксплуатации ВТИ.
5) Показано, что применение разработанного метода и программного обеспечения на 15-25% сокращает трудоемкость решения задачи многоуровневого согласованного управления ресурсами предприятий авиационной и космической отрасли для выполнения заказов на разработку, производства и эксплуатацию ВТИ в заданные сроки и бюджеты, повышает в 3-5 раз оперативность принятия решений и существенно снижает риски нарушения контрактов.

7 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ERP – Enterprise Resource Planning, информационные системы для управления ресурсами предприятий

MES – Manufacturing Execution System, информационные системы исполнения производственных планов

АИС – автономная интеллектуальная система

АИС ОУ – автономная интеллектуальная система оперативного управления ресурсами подразделения

АИС СП – автономная интеллектуальная система стратегического планирования ресурсов

ВТИ – сложное высокотехнологичное изделие

ГЛК – Главный конструктор ВТИ

ИСУР – интеллектуальная система управления ресурсами

КА – космический аппарат

КД – конструкторская документация на ВТИ

МКС – международная космическая станция

НАКУ – наземный автоматизированный комплекс управления

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

ОКР - опытно-конструкторская работа

ПГ – план-график

ПГИЭ – план-график исполнения этапа

ПКИ – покупные компоненты изделия

ПО – программное обеспечение

p2p – от англ. Peer-To-Peer – «каждый с каждым» как «равный с равным»

РКМ – расчетно-калькуляционные материалы

СПГ – сетевой план-график

ТД – технологическая документация на ВТИ

ТЗ – техническое задание

ТЭО – технико-экономические обоснование работ НИОКР

ФАС – федеральная антимонопольная служба РФ

ЦКП – центр координации и планирования проектов организации

ЦУП – центр управления полетами

8 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаев, Р. П. Сходимость и устойчивость в задачах согласования характеристик / Р. П. Агаев, П. Ю. Чеботарев // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 30. – №1. – С. 470-505.
2. Аншаков, Г. П. Методы устранения конфликтов между режимами функционирования КА ИПРЗ при составлении программ работы / Г. П. Аншаков, А. В. Соллогуб, Д. Г. Бундов // Исследование Земли из космоса. – 1988. – № 3. – С.107-116.
3. Баринов, И.И. Формирование стратегии развития Комитета по искусственному интеллекту в Научно-образовательном центре «Инженерия будущего» / И.И. Баринов, Н.М. Боргест, С.Ю. Боровик, О.Н. Граничин, С.П. Грачев, Ю.В. Громыко, Р.И. Доронин, С.Н. Зинченко, А.Б. Иванов, В.М. Кизеев, Р.И. Кутлахметов, В.Б. Ларюхин, С.П. Левашкин, А.Н. Мочалкин, М.Г. Пантелеев, С.Б. Попов, Е.М. Севастьянов, П.О. Скобелев, А.Г. Чернявский, В.В. Шишкин, С.И. Шляев // Онтология проектирования. – 2021. – Т.11, №3(41). - С. 260-293.
4. Бурков, В. Н. Принцип открытого управления активными системами / В. Н. Бурков, А. Я. Лернер. – М. : ИПУ РАН, 1971. – 28 с.
5. Бурков, В. Н. Теория активных систем: состояние и перспективы / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков. – М. : СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
6. Бурков, В. Н. Теория активных систем (история развития и современное состояние) / В. Н. Бурков, Д. А. Новиков // Проблемы управления. – 2009. – № 3 S1. – С. 29-35. – EDN KJUOIX.
7. Виттих, В. А. Метод сопряженных взаимодействий для управления распределением ресурсов в реальном масштабе времени / В. А. Виттих, П. О. Скобелев // Автометрия. – 2009. – №2. – С. 78-87.
8. Виттих, В. А. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах / В. А. Виттих, П. О. Скобелев // Автоматика и телемеханика. – 2003. – №1. – С. 177-185.
9. Вольман, С. И. Разработка мультиагентной системы поддержки принятия решений для оптимизации хода рекламных кампаний в сети Интернет / С. И. Вольман, И. А.

Минаков, П. О. Скобелев, А. В. Якушин // Проблемы управления (МКПУ-IV): труды IV международной конференции (Москва, 26-30 января 2009 г.). – М. : ИПУ РАН, 2009. – С. 1628-1638.

10. Гермейер, Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами. – М. : Наука, 1976. – 328 с.
11. Городецкий, В.И. Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современными предприятиями. Часть I. Цифровая платформа и цифровая экосистема / В. И. Городецкий, В. Б. Ларюхин, П. О. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – № 6. – С. 323-332.
12. Городецкий, В. И. Децентрализация, самоорганизация и эмерджентный интеллект – цифровой взрыв умных технологий / В. И. Городецкий. О. Н. Граничин, П. О. Скобелев // 15-я мультиконференция по проблемам управления: материалы общих заседаний (Санкт-Петербург, 04-06 октября 2022 г.). – СПб. : АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. – С. 40-54.
13. Городецкий, В.И, Концептуальная модель цифровой платформы для киберфизического управления современными предприятиями. Часть II. Цифровые сервисы / В. И. Городецкий, В. Б. Ларюхин, П. О. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20. – №7. – С. 387-397.
14. Грачев, С. П. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С. П. Грачев, А. А. Жиляев, В. Б. Ларюхин, Д. Е. Новичков, В. А. Галузин, Е. В. Симонова, И. В. Майоров, П. О. Скобелев // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 11. – С. 30-67. – DOI 10.31857/S0005231021110039. – EDN ZLESZX.
15. Губко, М. В. Теория игр в управлении организационными системами / М. В. Губко, Д. А. Новиков. – М. : Синтег, 2002. – 139 с.
16. Деминг, Э. Менеджмент нового времени: Простые механизмы, ведущие к росту, инновациям и доминированию на рынке / Э. Деминг ; пер. с англ. – М. : Альпина Паблишер. 2019. – 182 с.

17. Жиляев, А. Онтологии как инструмент создания открытых мультиагентных систем управления ресурсами / А. Жиляев // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9. – №2(32). – С.261-281.
18. Каляев, И. А. Принципы организации децентрализованных систем управления коллективов микророботов / И. А. Каляев // Мехатроника. – 2000. – № 6. – С. 16-26.
19. Каляев, И. А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 278 с.
20. Клейменова, Е. М. Мультиагентная технология адаптивного планирования для управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях / Е. М. Клейменова, П. О. Скобелев, В. Б. Ларюхин, И. В. Майоров, Д. С. Косов, Е. В. Симонова, А. В. Царев, А. Л. Феоктистов, Е. В. Полончук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 5. – С. 58-63.
21. Клейменова, Е.М. Разработка и использование онтологии интеллектуальной системы управления проектами НИР и ОКР / Е. М. Клейменова, П. О. Скобелев, В. Б. Ларюхин, Д. С. Косов, Е. В. Симонова // Вестник Самарского государственного технического университета, серия «Технические науки». – 2013. – № 2(38). – С. 18-25.
22. Клейменова, Е. М. Интеллектуальная система «Smart Projects» для оперативного управления ресурсами в проектах НИР и ОКР в реальном времени / Е. М. Клейменова, П. О. Скобелев, В. Б. Ларюхин, И. В. Майоров, Д. С. Косов, Е. В. Симонова, А. В. Царев, А. Л. Феоктистов, Е. В. Полончук // Информационные технологии. – 2013. – №6. – С. 27-36.
23. Лада, А. Н. Гибридная система управления работой мобильных бригад регламентного и сервисного ремонта в реальном времени / А. Н. Лада, Р. Р. Гафаров // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной конференции (Самара, 03-06 сентября 2019 г.). – Самара : ОФОРТ, 2019. – Т. II. – С. 255-259.
24. Лазарев, А. А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А. А. Лазарев, Е. Р. Гафаров. – М. : Изд-во МГУ, 2011. – 222 с.

25. Ларюхин, В. Б. Разработка методов и средств сопряженного взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределенного управления ресурсами предприятия / В. Б. Ларюхин // Онтология проектирования. – 2023. – Том 13. – №2 – С. 254-273. – DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273
26. Ларюхин, В. Б. Цифровая экосистема управления производственной кооперацией предприятий в реальном времени по организации поставок высокотехнологичной продукции / В. Б. Ларюхин, П. О. Скобелев // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: материалы IV всероссийской научно-практической конференции (Москва, 21 апреля 2021 г.). – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – С. 133-137.
27. Модели и механизмы распределения затрат и доходов в рыночной экономике / В. Н. Бурков, И. А. Горгидзе, Д. А. Новиков, Б. С. Юсупов. – М. : ИПУ РАН, 1997. – 60 с.
28. Новиков, Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М. : Физматлит, 2007. – 584 с.
29. Опойцев, В. И. Равновесие и устойчивость в моделях коллективного поведения / В. И. Опойцев. – М. : Наука, 1977. – 248 с.
30. Проскурников, А. В. Задачи и методы сетевого управления / А. В. Проскурников, А. Л. Фрадков // Автоматика и телемеханика. – 2016. – Выпуск 10. – С. 3-39.
31. Скобелев, П. О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений / П. О. Скобелев // Автометрия. – 2002. – №6. – С. 45-61.
32. Скобелев, П. О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем / П. О. Скобелев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – №12. – С. 33-46.
33. Скобелев, П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития / П. О. Скобелев // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии». – 2013. – №1. – С. 1-32.

34. Скобелев, П. О. На пути к автономным системам: опыт применения систем искусственного интеллекта для управления ресурсами предприятий / П. О. Скобелев, И. В. Майоров, О. И. Лахин, В. Б. Ларюхин, Е. В. Симонова // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: труды (Москва, 17-20 июня 2019 г.). – М.: ИПУ РАН, 2019. – С. 1896-1902. – DOI 10.25728/vspu.2019.1896. – EDN XGFOEP.
35. Скобелев, П.О. О проекте цифровой эко-системы для создания виртуального рынка цифровых двойников предприятий электротехнической промышленности / П. О. Скобелев, В. Б. Ларюхин // 13-я Международная конференция «Интеллектуализация обработки информации»: Тезисы докладов (Москва, 08-11 декабря 2020 г.). – М. : Российская академия наук, 2020. – С. 384-385.
36. Скобелев, П. О. Разработка моделей, методов и алгоритмов адаптивного планирования ресурсов производственных предприятий / П. О. Скобелев, В. Б. Ларюхин // Информационная безопасность цифровой экономики : Материалы XVII научно-теоретической конференции VIII Пленума регионального отделения Федерального учебно-методического объединения в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 10.00.00 "Информационная безопасность" по Сибирскому и Дальневосточному федеральным округам (СибРОУМО), Новосибирск, 13–15 октября 2021 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021. – С. 61-72. – EDN KHFPZS.
37. Согласованное управление активными производственными системами / А. А. Ашимов, В. Н. Бурков, Б. А. Джапаров, В. В. Кондратьев; Отв. ред. А. М. Петровский; АН СССР, Ин-т пробл. управления. – М. : Наука, 1986. – 247 с.
38. Сонин, К. И. Основы теории аукционов (Нобелевская премия по экономике 2020 года) / К. И. Сонин // Вопросы экономики. – 2021. – № 1. – С. 5-32. – DOI 10.32609/0042-8736-2021-1-5-32. – EDN UYVMNY.
39. Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма / В. Н. Бурков, В. В. Кондратьев, В. В. Цыганов, А. М. Черкашин. – М. : Наука, 1984. – 271 с.

40. Фрадков, А. Л. Кибернетическая физика. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.
41. Хорошевский, В. Ф. Проектирование систем программного обеспечения под управлением онтологий: модели, методы, реализации В. Ф. Хорошевский // Онтология проектирования. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 429-448.
42. Цыганов, В. В. Адаптивные механизмы в отраслевом управлении / В. В. Цыганов. – М. : Наука, 1991. – 166 с.
43. Agent Mediated ElectronicCommerce II. Towards Next-Generation Agent-Based Electronic Commerce Systems: A. Moukas, C. Sierra, F. Ygge (Eds.). – Springer, 2000. – 239 p.
44. Amelina, N. Approximate Consensus in Stochastic Networks with Application to Load Balancing / N. Amelina, A. Fradkov, Y. Jiang, D. J. Vergados // IEEE Transactions on Information Theory. – 2015. – Vol. 61. – No. 4. – P. 1739-1752.
45. Andreev, M. Adaptive Planning for Supply Chain Networks / M. Andreev, G. Rzevski, A. Ivashchenko, P. Skobelev, P. Shveykin, A. Tsarev // Proceedings of the 4th International Conference on Holonic Approach and Multi Agent Systems (HoloMAS 2007). – LNAI 4659. – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2007. – P. 215-224.
46. Barricelli, B. Casiraghi, E.; Fogli, D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications / B. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 167653-167671.
47. Blekhman, I. I. On General Definitions of Synchronization / I. I. Blekhman, A. L. Fradkov A.L // Selected Topics in Vibrational Mechanics; I. I. Blekhman (ed.). – Singapore : World Scientific. – 2004. – P. 179-188.
48. Boutilier, C. Resource Allocation Using Sequential Auctions / C. Boutilier, M. Goldszmidt, C. Monteleoni, B. Sabata // Agent Mediated Electronic Commerce II; A. Moukas, F. Ygge, C. Sierra (Eds.). – LNCS 1778. – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2000. – P. 131-152.
49. Braquet, M. Greedy Decentralized Auction-based Task Allocation for Multi-Agent Systems / M. Braquet, B. Efstathios // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54. – Is. 20. – P. 675-680.

50. Chigani, A. Architecting Network-Centric Software Systems: A Style-Based Beginning / A. Chigani, D. Jamed, S. Bohner // Proceedings of the 31st IEEE Software Engineering Workshop (SEW '07). – 2007. – P. 290-299.
51. Coe N. M. Global Production Networks: Realizing the Potential / N. M. Coe, P. Dicken, M. Hess // J. Econom. Geograph. – 2008. – Vol. 8. – No. 3. – P. 271-295.
52. Deng. L. Hybrid ant colony optimization for the resource-constrained project scheduling problem / L. Deng, Y. Lin, M. Chen // Journal of Systems Engineering and Electronics. – 2010. – Vol. 21. – Is. 1. – P. 67-71.
53. Distributed systems: concepts and design / G. F. Coulouris, J. Dollimore, T. Kindberg, G. Blair. – Boston : Pearson education, 2012. – 1067 p.
54. Easley, D. Networks, Crowds and Markets. Reasoning about a Highly Connected World / D. Easley, J. Kleinberg. – Cambridge Univ. Press, 2010. – 833 p.
55. Eisenberg, E. Consensus of Subjective Probabilities: The Pari-Mutuel Method / E. Eisenberg, D. Gale D // Ann. Math. Statist. – 1959. – Vol. 30. – P. 165-168.
56. Evolutionary Multiobjective Optimization Theoretical Advances and Applications / A. Abraham., L. C. Jain, R. Goldberg (Eds.). – Springer, 2005. – 302 p.
57. Franceschelli, M. Stability of Open Multi-Agent Systems and Applications to Dynamic Consensus / M. Franceschelli, M. Frasca // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2021. – Vol. 66. – No. 5. – P. 2326-2331.
58. French, J. A. Formal Theory of Social Power / J. A. French // Psych. Rev. – 1956. – Vol. 63. – P. 181-194.
59. Galland, C. M. Modelling Gossip Interactions in Open Multi-Agent Systems / C. M. Galland, S. Marti, J. M. Hendrickx // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2022. – 8 p. – URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.02970 (дата обращения 15.09.2023).
60. Galuzin, V. Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time / V. Galuzin, A. Galitskaya, S. Grachev, V. Laruchkin, D. Novichkov, P. Skobelev, A. Zhilyaev // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – No. 10. – Article number 1662.

61. Garlaschelli, D. Structure and Evolution of the World Trade Network / Garlaschelli, M. Loffredo // Physica. A: Statistical Mechanics and Its Applications. – 2005. – Vol. 355. – Is. 1. – P. 138-144.
62. Garlaschelli, D. Effects of Network Topology on Wealth Distributions / D. Garlaschelli, M. Loffredo // J. Phys. A: Mathematical and Theoretical. – 2008. – Vol. 41. – No. 22. – P. 224018.
63. Gartner Top 10 Strategic Technology Treends for 2019. – URL: https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/ (дата обращения 22.09.2023).
64. Glaschenko, A. Multi-Agent Real Time Scheduling System for Taxi Companies / A. Glaschenko, A. Ivaschenko, G. Rzevski, P. Skobelev // Proceedings of the 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009). – 2009. – Vol. 2. – P. 1320-1326.
65. Gorodetsky, V. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multi-Agent Systems for Adaptive Resource Management / V. Gorodetsky, S. Kozevnikov, D. Novichkov, P. Skobelev // Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2019): V. Marik [et al.] (Eds.). – LNAI 11710. – Switzerland : Springer. – 2019. – P. 52-64.
66. Gorodetsky, V. Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0. / V. Gorodetsky, V. Larukchin, P. Skobelev // Proceedings of the 13th International Symposium on Intelligent Distributed Computing (IDC 2019): I. Kotenko [et al.] (Eds.). – SCI 868. – Switzerland : Springer. – 2020. – P. 35-40.
67. Grachev, S. P. Methods and Tools for Developing Intelligent Systems for Solving Complex Real-Time Adaptive Resource Management Problems / S. P. Grachev, A. A. Zhilyaev, V. B. Laryukhin, D. E. Novichkov, V. A. Galuzin, E. V. Simonova, I. V. Maiyorov, P. O. Skobelev // Automation and Remote Control. – 2021. – Vol. 82. – P. 1857-1885.
68. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems / M. Grieves, J. Vickers // Transdisciplinary Perspectives on Complex

Systems: New Findings and Approaches: F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alvesm (Eds.). – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2017. – P. 85-113.

69. Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis / J. Y.-T. Leung (Ed.). – Chapman & Hal, 2004. – 1212 p.
70. Himoff, J. Magenta Technology: Multi-Agent Systems for industrial Logistics / J. Himoff, P. Skobelev, M. Wooldridge // Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Agents and Multi agent Systems (AAMAS 05). – 2005. – P. 60-66.
71. Ivanskiy, Y. Optimal Step-Size of a Local Voting Protocol for Differentiated Consensuses Achievement in a Stochastic Network with Cost Constraints / Y. Ivanskiy, N. Amelina, O. Granichin, O. Granichina, Y. Jiang // Proceedings of the 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA). – 2015. – P 1367-1372.
72. Ivanyuk, V. Network-Centric Methods Management / V. Ivanyuk, N. Abdikeyev, F. Patshenko, N. Grineva // Management Science. – 2017. – Vol. 7. – No. 1. – P. 26-34.
73. Jaberi, M. Resource Constrained Project Scheduling Using Mean Field Annealing Neural Networks / M. Jaberi // International Journal of Multidisciplinary Science and Engineering. – 2011. – Vol. 2. – No 7. – P. 6-12.
74. Järvenpää, E. The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources / E. Järvenpää, N. Siltala, O. Hylli, M. Lanz // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2019. – Vol. 30. – P. 959-978.
75. Jiao, J. X. An Agent-Based Framework for Collaborative Negotiation in the Global Manufacturing Supply Chain Network / J. X. Jiao, X. You, A. Kumar // Robot. Comput. Integrat. Manufactur. – 2006. – Vol. 22. – No. 3. – P. 239-255.
76. Kozhevnikov, S. Smart Enterprise: Multi-Agent Solution for Holonic Enterprise Resource Management / S. Kozhevnikov, V. Larukhin, P. Skobelev // Proceedings of the 12th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science (ICIS 2013). – 2013. – P. 111-116.
77. Lada, A. A Solution to the Subtask of Initial Distribution of Transport Resources in a Special Optimization FTL Transportation Problem in Real-time Using the Hungarian Algorithm / A. Lada, P. Skobelev // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – No. 12. – P. 1-8.

78. Laryukhin, V. The Multi-Agent Approach for Developing a Cyber-Physical System for Managing Precise Farms with Digital Twins of Plants / V. Laryukhin, P. Skobelev, O. Lakhin, S. Grachev, V. Yalovenko, O. Yalovenko // Cybernetics and Physics. – 2019. – Vol. 8. – No. 4. – P. 257-261.
79. Liu, Y. An iterative combinatorial auction mechanism for multi-agent parallel machine scheduling / Y. Liu, S. Shudong, X. V. Wang, L. Wang // International Journal of Production Research. – 2021. – P. 361-389. – URL: https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1950938 (дата обращения 10.08.2023).
80. Lorenzen, L.-E. Integrated Process Planning and Production Control / L.-E. Lorenzen, P.-O. Woelk, B. Denkena, T. Scholz, I. J. Timm, O. Herzog // Multiagent Engineering: Theory and Applications in Enterprises: S. Kirn, O. Herzog, P. Lockemann, O. Spaniol (Eds.). – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2006. – P. 91-114.
81. Mayorov, I. Towards thermodynamics of real timescheduling / I. Mayorov, P. Skobelev // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2015. –Vol. 10. – Is. 3. – P. 213-223.
82. Mesbahi, M. Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks / M. Mesbahi, M. Egerstedt. – Princeton Univ. Press, 2010. – 424 p.
83. Minhas, S. Ontology Based Environmental Knowledge Management – A System to Support Decisions in Manufacturing Planning / S. Minhas // Proceedings of the 6th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development. – 2014. – P. 397-404.
84. Modi, P. J. ADOPT: Asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees / P. J. Modi, W. Shen, M. Tambe, M. Yokoo M // Artificial Intelligence Journal. –2005. – Vol. 161. – No. 1-2. – P. 149-180.
85. Moyne, J. R. The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data / J. R. Moyne, D. M.Tilbury // Proc. IEEE. – 2007. – Vol. 95. – No. 1. – P. 29-47.
86. Pearce, J. Solving multiagent networks using distributed constraint optimization / J. Pearce, M. Tambe, R. Maheswaran // AI Magazine. – 2008. – Vol. 29. – No. 3. – P. 47-62.

87. Petcu, A. A class of Algorithms for Distributed Constraint Optimization / A. Petcu // Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. – IOS Press, 2009. – Vol. 194. – No. 1. – 304 p.
88. Pinedo, M. Scheduling Theory, Algorithms, and Systems / M. Pinedo. – Springer, 2008. – 676 p.
89. Proskurnikov, A. V. A tutorial on modeling and analysis of dynamic social networks. Part II / A. V. Proskurnikov, R. Tempo // Annual Reviews in Control. – 2018. – Vol. 45. – P. 166-190.
90. Ransikarbum, K. A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization / K. Ransikarbum, R. Pitakaso, N. Kim // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10. – Article number 5159.
91. Ren, W. Distributed Consensus in Multi-Vehicle Cooperative Control: Theory and Applications / W. Ren, R. Beard. – London: Springer, 2008. – 319 p.
92. Ren, W. Formation Keeping and Attitude Alignment for Multiple Spacecraft Through Local Interactions / W. Ren // J. Guid. Control Dynam. – 2007. – Vol. 30. –No. 2. – P. 633-638.
93. Robu, V. Han Noot, Han La Poutré, Willem-Jan van Schijndel. A multi-agent platform for auction-based allocation of loads in transportation logistics / V. Robu, H. Noot, H. La Poutré, W.-J. van Schijndel // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38. – P. 3483-3491.
94. Rzevski, G. MagentaToolkit: A Set of Multi-Agent Tools for Developing Adaptive Real-Time Applications / G. Rzevski, P. Skobelev, V. Andreev // Proceedings of the 4th International Conference on Holonic Approach and Multi Agent Systems (HoloMAS 2007). – LNAI 4659. – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2007. – P. 303-313.
95. Rzevski, G. Intelligent adaptive schedulers for railways / G. Rzevski, P. Skobelev // International Journal of Transport Development and Integration. – 2017. – Vol. 1. – Is. 3. – P. 414-420.
96. Rzevski, G. Complex Adaptive Logistics for The International Space Station / G. Rzevski, V. Soloviev, P. Skobelev, O. Lakhin // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2016. – Vol. 11. – Is. 3. – P. 459-472.

97. Sandholm, T. An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost / T. Sandholm // Proceedings of the 11th National Conference on Artificial Intelligent (AAAI-93). – 1993. – P. 256-262.

98. Schneeweiss, C. Distributed decision making / C. Schneeweiss. – Springer, 2012. – 543 p.

99. Shen, Z. Digital Twin: What It Is, Why Do It, Related Challenges and Research Opportunities for Operations Research / Z. Shen, L. Wang, T. Deng. – 2021. – p. 53. – URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3777695 (дата обращения 21.09.2023).

100. Shoham, Y. Multi-agent systems: Alghoritmic, Game Theoretic and Logical Foundations / Y. Shoham, K. Leyton-Brown. – Cambridge University Press, 2009. – 532 p.

101. Shpilevoy, V. Multi-agent system «Smart Factory» for real-time workshop management in aircraft jet engines production / V. Shpilevoy, A. Shishov, P. Skobelev, E. Kolbova, D. Kazanskaia, Ya. Shepilov, A. Tsarev // Proceedings of the 11th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'13). – 2013. Vol. 2. – P. 204-209.

102. Skobelev, P. Towards Autonomous AI Systems for Resource Management: Applications in Industry and Lessons Learned / P. Skobelev // Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018). – LNAI 10978. – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2018. – P. 12-25.

103. Skobelev, P. Smart Farming – Open Multi-Agent Platform and Eco-System of Smart Services for Precise Farming / P. Skobelev, V. Laryukhin, I. Mayorov, E. Simonova, O. Yalovenko // Proceedings of the 17th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS 2019). – LNAI 11523. – P. 212-224.

104. Skobelev, P. Vertical and horizontal negotiations of multi-agent planning services in a multi-service platform for crop managing / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova, V. Laryukhin, O. Yalovenko // Proceedings of the XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP 2019). – 2019. – P. 78-83.

105. Skobelev, P. O. A Solution to the Subtask of Initial Distribution of Transport Resources in a Special Optimization FTL Transportation Problem in Real-time Using the Hungarian Algorithm / P. O. Skobelev, A.N. Lada // Indian Journal of Science and Technology. – 2016. – Vol. 9. – No. 12. – P. 1-8.

106. Skobelev, P. Smart Projects: Multi-Agent Solution for Aerospace Applications / P. Skobelev, S. Kozhevnikov, I. Mayorov, D. Poludov, E. Simonova // International Journal of Design & Nature and Ecodynamics. – 2017. – Vol. 12. – Is. 4. – P. 492-504.

107. Skobelev, P. Towards Autonomous AI Systems for Resource Management: Applications in Industry and Lessons Learned / P. Skobelev // Proceedings of the 16th International Conference on Practical Applications of Agents and Multiagent Systems (PAAMS 2018). – LNAI 10978. – Berlin-Heidelberg : Springer. – 2018. – P. 12-25.

108. Skobelev, P. Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management / P. Skobelev, A. Zhilyaev, V. Larukhin, S. Grachev, E. Simonova // Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2020). – 2020. – Vol. 1. – P. 127-135.

109. Skobelev, P. O. On the way from INDUSTRY 4.0 to INDUSTRY 5.0: from digital manufacturing to digital society / P. O. Skobelev, S. Yu. Borovik // International Scientific Journal INDUSTRY 4.0. – Scientific Technical Union of Mechanical Engineering, Bulgaria. – 2017. – Year II. – Is. 6. – P. 307-311.

110. Smith, R. G. A Framework for Problem Solving in a Distributed Processing Environment / R. G. Smith // Standford University Computer Science Department Report STANCS-78-700, 1978. – 31 p.

111. Smith, R. G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver / R. G. Smith // IEEE Transactions on Computer. – 1980. – Vol. C-29. – No. 12. – P. 1104-1113.

112. Van Brussel, H. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA / H, Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bongaerts, P. Peeters // Computers in Industry. – 1998. – Vol. 37. – Is. 3. – P. 255-274.

113. Vos, S. Meta-heuristics: The State of the Art / S. Vos // Local Search for Planning and Scheduling: A. Nareyek (Ed.). – Germany: Springer-Verlag, 2001. – P. 1-23.

114. Zhang, H. A Genetic Algorithm for Solving RCPSP / H. Zhang, H. Xu, W. Peng // Proceedings of the 2008 International Symposium on Computer Science and Computational Technology (ISCSCT '08). – 2008. – Vol. 2. – P. 246-249.

115. Zhilyaev, A. Ontology-based open multi-agent systems for adaptive resource management / P. Skobelev, A. Zhilyaev, V. Larukhin, S. Grachev, E. Simonova // Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. – 2020. – P. 127-135.

116. Zhilyaev, A.A. Application of Multi-agent Technology in the Scheduling System of Swarm of Earth Remote Sensing Satellites / P.O. Skobelev, E. V. Simonova, A.A. Zhilyaev, V.S. Travin // Procedia Computer Science. – 2017. – Vol. 103. – P. 396-402.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ «МАК ВЫМПЕЛ»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПК «Сетецентрические
платформы»
_____А.Н. Седов
«_08_» _02_ 2024 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:

Председатель

Седов А.Н. – генеральный директор ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

Члены комиссии:

Новичков Д.Е. – заместитель генерального директора по разработкам ООО «НПК «Сетецентрические платформы»;

Панов А.О. – аналитик ООО «НПК «Сетецентрические платформы»

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Сетецентрические платформы» системы управления проектами НИОКР в интересах ПАО «МАК «Вымпел» были использованы следующие результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»:

1) методы вертикально-горизонтального сопряжения стратегического и оперативных планов подразделений предприятий;
2) программные компоненты формирования и корректировки планов в автономной интеллектуальной системы управления ресурсами проектной организации (АИС-Проекты);
3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия АИС-Проекты.

Использование результатов Ларюхина В.Б. позволило разработать многоуровневую интеллектуальную систему управления ресурсами предприятия для реализации проектов гособоронзаказа, которая прошла апробацию на предприятии заказчика.

Председатель комиссии: Седов А. Н.

Члены комиссии: Новичков Д. Е.

Панов А. О.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
ПАО «МАК «Вымпел» по научно-
техническому развитию, д.т.н.
О. Ю. Аксенов
«20» 02 2024 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:

Председатель

Литвинов Константин Дмитриевич – генеральный конструктор ПАО «МАК «Вымпел»;

Члены комиссии:

Залога Сергей Иванович – заместитель генерального конструктора по общесистемным НИОКР – начальник НТЦ МК, руководитель проектов;

Жидиков Дмитрий Александрович – директор по программам развития и качеству, руководитель проекта внедрения

составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий» успешно апробированы в ПАО «МАК «Вымпел» (далее – Общество) в ходе внедрения интеллектуальной системы управления ресурсами при реализации проектов Общества.

В ходе тестовой эксплуатации апробированы и внедрены:

1) методы вертикально-горизонтального сопряжения стратегического и оперативных планов подразделений предприятий;

2) программные компоненты формирования и корректировки планов в автономной интеллектуальной системы управления ресурсами проектной организации (АИС-Проекты);

3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия АИС-Проекты.

Основной задачей управления проектами НИОКР для Общества являлось сквозное укрупненное планирование 25 проектов НИОКР (в разрезе этапов) для порядка 250 работников основного персонала и до 150 работников обеспечивающих подразделений Общества на временном интервале в 2 года. По итогам внесения в базу данных сетевых план-графиков исполнения этапов проектов НИОКР, системой формировались и отслеживалось исполнение оперативных планов 5 подразделений на интервале в 1 месяц.

Результаты применения разработанных методов и средств позволили до 25% сократить трудоемкость планирования проектов, которые до этого велись в программах MS Excel и MS Project. Созданная система позволила оценить загрузку подразделений и загруженность работников как в разрезе проекта, так и за подразделение, и за Общество в целом, а также получить информационное обеспечение управленческих совещаний с визуализацией проблем, что позволило более чем в 5 раз повысить оперативность принятия решений при обнаружении предпосылок к срыву сроков выполнения ключевых (веховых) мероприятий проектов и, как следствие, повышение качества их реализации.

Председатель комиссии: Литвинов К. Д.

Члены комиссии: Залога С. И.

Жидиков Д. А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ ПАО «РКК «ЭНЕРГИЯ»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПК «Разумные Решения»
_____О.И. Лахин
«05» апреля 2023 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича
«Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:
Председатель
Лахин О.И. – генеральный директор ООО «НПК «Разумные Решения»;
Члены комиссии:
Полюдов Д.П. – ведущий разработчик ООО «НПК «Разумные Решения»;

Потапенко И.М. – аналитик ООО «НПК «Разумные Решения»

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Разумные Решения» экспериментального образца интеллектуальной системы поддержки принятия управленческих решений (ИСППР) в интересах индустриального партнера «Ракетно-Космическая Корпорация «Энергия» им. С.П. Королева», выполняемых по заказу МИОНОБРНАУКИ РФ согласно контракта 14.578.21.0137 «Разработка моделей, методов и алгоритмов построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) по управлению ресурсами в проектах разработки, производства и эксплуатации сложных изделий ракетно-космической техники (РКТ)», были использованы следующие результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»:

1) метод вертикально-горизонтального сопряжения планов автономных интеллектуальных систем стратегического планирования и оперативного управления;
2) программные компоненты автономной интеллектуальной системы управления ресурсами проектной организации (АИС-Проекты);
3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия в АИС-Проекты.

Использование результатов Ларюхина В.Б. позволило реализовать проект в заданные сроки и создать макет распределенной системы планирования инженеров конструкторского бюро РКК «Энергия» в 3х уровневой модели управления.

Председатель комиссии: Лахин О. И.

Члены комиссии: Полюдов Д. П.
Потапенко И. М.

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ ПАО «ЯКОВЛЕВ»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПК «Разумные Решения»
_____О.И. Лахин
«12» апреля 2023 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:
Председатель
Лахин О.И. – генеральный директор ООО «НПК «Разумные Решения»;
Члены комиссии:
Полюдов Д.П. – ведущий разработчик ООО «НПК «Разумные Решения»;

Потапенко И.М. – аналитик ООО «НПК «Разумные Решения»

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Разумные Решения» системы адаптивного планирования и формирования производственного расписания для линии агрегатной и окончательной сборки самолета МС-21, выполняемых по заказу ПАО «Научно-производственная корпорация «ИРКУТ» согласно договору 347-2000-01-2016 от 07.09.2016, были использованы следующие результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»:

1) метод вертикально-горизонтального сопряжения для автономных интеллектуальных систем построения стратегических и оперативных планов подразделений предприятий;
2) программные компоненты автономной интеллектуальной системы управления ресурсами проектной организации (АИС-Производство);
3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия АИС-Производство.

Использование результатов Ларюхина В.Б. позволило реализовать промышленную версию системы, обеспечивающую сопряженное планирование более 2000 тыс. рабочих при сборке самолетов МС-21.

Председатель комиссии: Лахин О. И.

Члены комиссии: Полюдов Д. П.

Потапенко И.М.

УТВЕРЖДАЮ

Начальник управления ИТ
Иркутского Авиационного Завода –
филиала ПАО «Яковлев»

_____ А. Ключерёв

«_9_»_____ 2021 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича
«Разработка методов и средств сопряженного взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределенного управления ресурсами предприятия»

Комиссия в составе:
Председатель

Плюта А. Н.	Начальник отдела

Члены комиссии:

Олюнина А. В.	Заместитель начальника отдела - начальник бюро
Лебедева Е. С.	Инженер-программист

составили настоящий акт о том, что следующие результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий» успешно апробированы на предприятии в ходе внедрения системы адаптивного планирования и формирования производственного расписания для линии агрегатной и окончательной сборки самолета МС-21 (САПФИР):

1) метод вертикально-горизонтального взаимодействия автономных интеллектуальных систем для построения среднесрочных и оперативных планов подразделений предприятий;
2) программные компоненты автономной интеллектуальной системы управления ресурсами предприятия (АИС-Производство);
3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия автономных интеллектуальных систем.

Для управления расписанием сборки самолетов МС-21 для ПАО «Яковлев» задача укрупненного планирования расписания линии сборки решалась на интервале в 5 лет для расчета программы производства самолетов МС-21 с ростом числа изделий с 2-х - до 36-и в год. На основании рассчитанной производственной программы производился расчет сквозного производственного расписания для линии сборки самолетов пяти сборочных цехов, которое далее передавалось на оперативный уровень для формирования

производственных расписаний участков цехов. В цехах модуль оперативного управления обеспечивает управление производственным расписанием на месяц с детализацией до уровня рабочих мест для обеспечения исполнения среднесрочных планов в срок. Модуль укрупненного планирования формирует долгосрочный и среднесрочный планы работ всей линии сборки с учетом сроков отгрузки конечных изделий и разрешает ресурсные конфликты по станциям линии сборки. Оперативные модули управления работают одновременно для каждого цеха, формируя детальные планы с учетом текущих фактических данных, ограничений по ресурсам и срокам . Локальная обработка событий в модуле оперативного управления позволяет перепланировать производственные расписания сразу же после их возникновения.

Разработанная система позволила сократить трудоемкость построения и согласования планов, а также повысить их обоснованность и достоверность по сравнению с используемой ранее системой ERP LN (BAAN), которая не учитывала специфику процессов и доступность ресурсов в режиме реального времени, что приводило к возникновению погрешности и неточности планов.

Председатель комиссии:

Начальник отдела		Плюта А. Н.
Зам. начальника отдела - начальник бюро		Олюнина А. В.
Инженер-программист		Лебедева Е. С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В АО «ЦУП ЦНИИМАШ»

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПК «Разумные Решения»
_____ О.И. Лахин
«07» апреля 2023 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича
«Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:
Председатель
Лахин О.И. – генеральный директор ООО «НПК «Разумные Решения»;
Члены комиссии:
Полюдов Д.П. – ведущий разработчик ООО «НПК «Разумные Решения»;

Потапенко И.М. – аналитик ООО «НПК «Разумные Решения»

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Разумные Решения» системы управления проектами НИОКР, в интересах АО ЦУП ЦНИИИМАШ были использованы следующие результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»:

1) метод вертикально-горизонтального сопряжения планов автономных интеллектуальных систем управления ресурсами для стратегического планирования и оперативного управления подразделениями;
2) программные компоненты автономной интеллектуальной системы управления ресурсами проектной организации (АИС-Эксплуатация);
3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия АИС-Эксплуатация.

Использование результатов Ларюхина В.Б. позволило систему сопряженного планирования целевых задач и обслуживания инфраструктуры базового центра управления полетами.

Председатель комиссии: Лахин О.И.

Члены комиссии: Полюдов Д.П.

Потапенко И.М.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника ЦУП
АО «ЦНИИмаш» по научно-
испытательной работе, к.т.н.

_____ А.Ю. Кутоманов

«_____»_____2024 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:

Донсков Алексей Витальевич – начальник отделения ЦУП АО «ЦНИИмаш»,
Иванов Андрей Александрович – начальник отделения ЦУП АО «ЦНИИмаш»;
Котеля Владислав Владимирович – начальник отделения ЦУП АО «ЦНИИмаш»;

составили настоящий акт о том, что, при разработке СПО, задействованного при управлении полетами пилотируемых космических комплексов по программе РС МКС и автоматических космических аппаратов (ВКГС «Арктика», МКСР «Луч» и др.) были использованы методы и предложения, изложенные в диссертационной работе Ларюхина Владимира Борисовича «Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий».

Особую важность при решении задач управления космическими аппаратами представляют следующие результаты диссертационной работы:

1) метод вертикально-горизонтального сопряжения стратегических и оперативных планов подразделений предприятий, формируемых автономными интеллектуальными системами управления ресурсами;
2) программные компоненты базовой автономной интеллектуальной системы управления ресурсами эксплуатирующей организации;
3) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия.

Они позволяют решать задачи формирования планов обслуживания инфраструктуры, на основе которых выполняются работы поддержания их в технической и эксплуатационной готовности. Указанные методы дают сокращение трудоемкости планирования и сопряжения планов на уровне 15%, а также позволяют исключить наложение планов обслуживания инфраструктуры на планы полетов космических аппаратов, что существенно повышает готовность наземного контура управления и исключает вероятность ошибки планировщиков при составлении плана задействования средств управления космическими аппаратами.

Члены комиссии: _____ Донсков А. В.

_____ Иванов А.А.

_____ Котеля В. В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛАРЮХИНА В. Б. В ИНТЕРЕСАХ МИНПРОМТОРГ РФ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «НПК «Разумные Решения»

_____О.И. Лахин

«18» апреля 2023 г.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Ларюхина Владимир Борисовича
«Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»

Комиссия в составе:
Председатель
Лахин О.И. – генеральный директор ООО «НПК «Разумные Решения»;
Члены комиссии:
Полюдов Д.Е. – ведущий разработчик ООО «НПК «Разумные Решения»;

Потапенко И.М. – аналитик ООО «НПК «Разумные Решения»

составили настоящий акт о том, что при разработке в ООО «НПК «Разумные Решения», выполняемых по заказу МИНПРОМТОРГ РОФ согласно контракту №020-11-2019-1084 «Отраслевая многофункциональная сетецентрическая платформа для управления ресурсами предприятий электротехнической промышленности на базе мультиагентных систем «Smart Enterprise» в концепции Industry 5.0», были использованы следующие результаты диссертационной работы Ларюхина Владимира Борисовича Разработка методов и средств многоуровневого взаимодействия интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий по созданию высокотехнологичных изделий»:

1) метод вертикально-горизонтального сопряжения для автономных интеллектуальных систем построения стратегических и оперативных планов подразделений предприятий;
2) программные компоненты автономной интеллектуальной системы управления ресурсами проектной организации (АИС-Проекты);
3) программные компоненты автономной интеллектуальной системы управления ресурсами производственной организации (АИС-Производство);
4) прототип сетецентрической платформы, обеспечивающей вертикальные и горизонтальные сопряженные взаимодействия АИС-Производство и АИС-Проекты.

Использование результатов Ларюхина В.Б. позволило создать прототип отраслевой сетецентрической платформы, с помощью которой предприятия электротехнической отрасли посредством своих АИС формируют цепочки коопераций и решают задачу планирования и реализации комплексных проектов.

Председатель комиссии: Лахин О. И.

Члены комиссии: Полюдов Д. Е.

Потапенко И. М.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

1. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2021612808 Рос. Федерация. «Отраслевая многофункциональная сетецентрическая цифровая платформа для управления ресурсами предприятий электротехнической промышленности», Ларюхин В.Б., Лахин О.И., Каргин М.А., Костенюк А.Ю., Унщиков И.М., Травин В.С. Правообладатель ООО «НПК «Разумные Решения». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.02.2021.
2. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2021612592 Рос. Федерация. «Интеллектуальная система управления ресурсами в цехах производства изделий», Ларюхин В.Б., Лахин О.И., Каргин М.А., Костенюк А.Ю., Унщиков И.М. Правообладатель ООО «НПК «Разумные Решения». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.02.2021.
3. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № RU 2022616328 Рос. Федерация. Специализированное программное обеспечение для планирования научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на предприятиях государственного оборонного заказа, Скобелев П.О., Ларюхин В.Б., Пантелей Е., Новичков Д.Е., Мочалкин А.Н. Правообладатель: ООО «НПК «Сетецентрические платформы» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.04.2022.
4. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № RU 2021666188 года, Рос. Федерация. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению ресурсами в комплексных проектах, Скобелев П.О., Ларюхин В.Б. Правообладатель: НАО «Группа компаний «Генезис знаний» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.10.2021.
5. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № RU 2021667107 года, Рос. Федерация. Сетецентрическая платформа распределенных интеллектуальных автономных систем, Скобелев П.О., Ларюхин В.Б. Правообладатель: НАО «Группа компаний «Генезис знаний» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2021.