

*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

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2024

Работа выполнена на кафедре «Электронные системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Научный руководитель: **Скобелев Петр Олегович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Электронная системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Официальные оппоненты: **Швецов Анатолий Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и вычислительная техника» ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда

**Леонидов Андрей Владимирович,**  
доктор физико-математических наук, г.н.с. отделения теоретической физики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН),** г. Москва

Защита состоится 27 июня 2024 г., в 12 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ФГБОУ ВО «СамГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02; тел.: +7(846)337-04-43; e-mail: d24237702@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» и на сайте диссертационного совета 24.2.377.02 <https://d24237702.samgtu.ru/>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.377.02,  
к.ф.-м.н., доцент



Саушкин М.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Задача управления ресурсами в последнее время стала особенно актуальной для крупных предприятий по разработке, производству и эксплуатации сложных высокотехнологичных изделий (ВТИ), таких, как самолеты или космические аппараты, которые встречают ряд вызовов в связи с необходимостью построения новых цепочек кооперации и поиском вариантов импортозамещения.

Процесс управления ресурсами крупных предприятий по производству ВТИ требует организации многоуровневой модели управления, в которой на каждом уровне решается задача управления ресурсами с формированием как глобальных, так и локальных планов деятельности и синхронизации планов различных уровней как между собой, так и с планами подрядчиков. Рассогласование таких планов приводит к снижению эффективности отдельных подразделений и предприятия в целом и влечет за собой возникновение таких негативных последствий, как задержки сдачи готовой продукции, дефицит ресурсов и перерасход бюджетов.

Для решения рассматриваемой задачи управления предлагается использовать сетевой подход, который активно развивается в современной теории управления. Этот подход отвечает тенденции по интеллектуализации объектов управления, элементы которых приобретают все большую автономность в принятии решений, например, при управлении группировками дронов. Предметом исследований при этом становятся задачи коллективной деятельности автономных интеллектуальных систем (АИС) с развитием методов и средств их взаимодействий для выработки и принятия согласованных решений по формированию планов и их адаптивной синхронизации при возникновении отклонений для достижения цели.

Для создания АИС адаптивного управления ресурсами в последнее время все чаще применяются мультиагентные технологии, которые позволили создать ряд промышленных приложений.

Однако, предлагаемые модели и методы использовались для создания АИС отдельных подразделений и задачи их масштабирования на крупные предприятия пока не рассматривались в научной литературе. Решение задачи согласованного принятия решений в сети АИС позволит многократно расширить масштабы применения АИС для управления ресурсами, 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 необходимо решить следующие задачи:

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 аукцино-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 сетцентрической 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 сетцентрической 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 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 сетевая 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 Symposium on 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, д.т.н. П.О. Скобелев, 2022 г.), на научном семинаре кафедры «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета (руководитель, профессор В.П. Радченко, 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, рекомендованном 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 «Сетевые 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 [1] представлены задача, разработанные методы и средства, результаты разработок и исследований; в [2] показана значимость работ в создании цифровых экосистем АИС; в [3,4] – разработан состав сервисов сетевцентрической платформы; в [5] разработан онтологически настраиваемый мультиагентный подход для управления ресурсами; в [6] разработаны методы и средства создания интеллектуальных систем управления ресурсами в проектах НИОКР; в [7] предложена схема построения многоуровневой цифровой экосистемы АИС предприятий; в [8] разработаны способы создания сетевцентрической платформы АИС для управления ресурсами предприятий; в [9] предложены протоколы вертикально-горизонтальных взаимодействий АИС для согласования планов подразделений предприятий; в [10] 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 167 страниц основной части, содержит 33 рисунка, 7 таблиц и 6 приложений объемом 14 страниц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы выносимые на защиту научные положения, приведены сведения об апробации и внедрениях работы и публикациях.

**В первой главе** рассмотрена задача управления ресурсами для крупных предприятий и показаны 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,

связанные с неполным учетом структуры ВТИ и действующей нормативной базы ГОЗ/ГК, многоуровневым каскадным характером согласований планов.

Предложен распределенный подход к многоуровневому управлению ресурсами предприятий, в котором выделены основные два уровня:

- укрупненного сквозного планирования ресурсов предприятия на основе сетевых планов-графиков заказов на большой горизонт времени (1–3 года);
- оперативного управления подразделениями для выполнения согласованных укрупненных планов в сроки и бюджеты на горизонте до одного месяца.

При этом показано, что цели, предпочтения и ограничения формулируются не только на верхнем уровне предприятия в целом, но и на уровне каждого подразделения, что и приводит к необходимости перехода к построению многоуровневых систем управления ресурсами с непрерывной синхронизацией долгосрочных и оперативных планов по событиям в реальном времени.

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 Р.П. Агаева, Н.О. Амелиной, В.Н. Буркова, В.А. Виттиха, Ю.Б. Гермейера, О.Н. Граничина, В.И. Городецкого, Б.А. Джапарова, И.А. Каляева, В.В. Кондратьева, А.А. Лахарева, Д.А. Новикова, А.В. Проскурникова, К.И. Сони́на, П.О. Скобелева, А.Л. Фрадкова, I. I. Blekman, E. Eisenberg, J. French, C. Galland, J. Jiao, K. Leyton-Brown, W. Ren, T. Sandholm, Y. Shoham, R. Smith, H. Van Brussel и других ученых модели, методы и средства для решения задач управления в сложных системах. Обоснован вывод, что для решения задачи управления ресурсами предприятия требуется применение 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 рыночные модели участников и аукцино-подобные переговоры между ними.

В этой связи в работе формулируется новая задача многоуровневого построения планов предприятия, когда укрупненный план центра предприятия должен превращаться в «заказы» для проведения аукцино-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.

**Во второй главе** разработаны основные принципы многоуровневого сетевого подхода к созданию распределенной АИС, дается формализованная постановка задачи и предлагается метод синхронизации укрупненных долгосрочных планов работы предприятий и оперативных планов их подразделений или подрядчиков.

Для формализации постановки задачи вводятся множества, определяющие исходные данные:



- Множество заказов предприятия  $P(t) = \{p_k\}$ ,  $k = \overline{1, K}$ , 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 работ  $k$ -го заказа.
- Множество подразделений исполнителей  $Dep(t) = \{d_j\}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , где  $J$  – количество подразделений, участвующих в реализации производственной программы предприятия.
- Множество трудовых ресурсов подразделения  $EmpR^j(t) = \{empR_m^j\}$ ,  $m = \overline{1, M}$ , где  $M$  – количество трудовых ресурсов  $j$ -го исполнителя.
- Множество технических ресурсов подразделения  $TechR^j(t) = \{techR_q^j\}$ ,  $q = \overline{1, Q}$ , где  $Q$  – количество технических ресурсов  $j$ -го исполнителя.
- Множество характеристик трудовых и технических ресурсов  $C(t) = \{c_g\}$ ,  $g = \overline{1, G}$ , где  $G$  – количество характеристик ресурсов.

Вводятся понятия планов предприятия: укрупненного плана предприятия  $Plan_{y\Pi}$  и множество оперативных планов подразделений исполнителей  $Plan_{Oy} = \{plan_{Oy}^j\}$ , где  $plan_{Oy}^j$  – оперативный план  $j$ -го подразделения. Укрупненный и оперативные планы зависят от начальных состояний  $S(t)$  и  $S(t)^j$ , определенных в начальный момент времени  $t = t^*$ .

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

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

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 т.д.

Обозначим эти критерии: для укрупненного плана  $KPI_{y\Pi} = \{F_1, F_2, \dots, F_x\}$ , для оперативных планов подразделений  $KPI_{Oy}^j = \{F_1^j, F_2^j, \dots, F_y^j\}$ .

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

$$Plan_{y\Pi}(t) = \{S(t), P(t), W(t), D(t), EmpR(t), TechR(t), KPI_{y\Pi}(t)\} \quad (3)$$

Оперативный план управления  $j$ -ым подразделением  $Plan_{Oy}^j$  задается набором:

$$Plan_{Oy}^j(t) = \{S(t)^j, P(t)^j, W(t)^j, D(t)^j, EmpR^j(t), TechR^j(t), KPI_{Oy}^j(t)\} \quad (4)$$

Предполагается, что подразделения предприятия могут получать заказы от центра предприятия, а также часть заказов может приходиться с рынка. На каждом уровне у каждого подразделения определено 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

$$F_{y\Pi}(t) = \sum_{x=1}^X \omega_x KPI_{y\Pi_x}(t), \quad (5)$$

где  $KPI_{y\Pi_x}(t)$  – показатель по критерию  $x = \overline{1, X}$ ,  $\omega_x$  – 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:

$$F_{Oy}(t)^j = \sum_{y=1}^Y \varphi_{jy} KPI_{Oy}^j(t), \quad (6)$$

где  $KPI_{Oy}^j$  – показатель по критерию  $y = \overline{1, Y}$ , для  $j$ -го подразделения.  $\varphi_{jy}$  – весовой коэффициент значимости критерия такой, что  $0 \leq \varphi_{jy} \leq 1$  и  $\sum_y \varphi_{jy} = 1$ .

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  $D(t)$  степени расхождения между укрупненным планом центра и оперативными планами подразделений:

$$D(t, KPI_{yП}, KPI_{Oy}^1 \cup KPI_{Oy}^2 \cup .. \cup KPI_{Oy}^J). \quad (7)$$

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

$$D(t) \rightarrow \min \quad (8)$$

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

$$\begin{cases} F_{yП}(t) \rightarrow \max, \\ F_{Oy}^1(t) \rightarrow \max, \\ \dots \\ F_{Oy}^J(t) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (9)$$

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 незапланированные события *Event*, влияющие на планы (например, недоступность ресурса, задержка поставки, новый заказ и др.). В АИС по таким событиям запускается метод перестроения планов для выявления расхождения, и попыткой сразу же вернуться к согласованным параметрам (по срокам, бюджетам). Если это невозможно, то АИС потребует решить проблему по горизонтали путем построения плана нагона или перестроить вышестоящие планы по вертикали. В этой связи такой метод должен обеспечивать горизонтальные и вертикальные взаимодействия АИС для проведения их сопряжения.

Для принятия решений при формировании и сопряжении планов предлагается использовать модель виртуального рынка, в рамках которой проводить аукционы-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.

Приведем дополнительные множества и соотношения для критериев целевых функций и ограничений. Множество временных интервалов  $T = \{t_h\}$ ,  $h = \overline{1, H}$ , где  $H$  – количество интервалов, определяющее горизонт планирования. Каждый интервал  $t_h$  определен границами:  $startt_h$  и  $finisht_h$ ,  $finisht_h > startt_h$ . Для каждого заказа  $p_k$  определен следующий набор параметров:  $revenueP_k$  – максимальная сумма затрат на ресурсы,  $minStartP_k$ ,  $maxFinishP_k$  – директивные сроки начала и завершения заказа;  $startP_k$ ,  $finishP_k$  – расчетные сроки начала и завершения заказа. Для  $w_i^k$  заданы:  $amountW_i^k$  – объем работы (трудоемкость);  $startW_i^k$ ,  $finishW_i^k$  – начало и завершение работы, определяемое в ходе решения задачи;  $minEmpCountW_i^k$ ,  $maxEmpCountW_i^k$  – минимальное и максимальное количество трудовых ресурсов, которые могут быть привлечены для выполнения работы. Матрица требуемых компетенций трудовых ресурсов  $REC^k = \{rC_{i,g}^k\}$ , где  $i = \overline{1, I}$ ,  $g = \overline{1, G}$  – требуемый уровень качества  $g$ ,  $rC_{i,g}^k \in R$ . Между работами заданы отношения следования  $WR = \{wr_{x,y}^k\}$ ,  $x = \overline{1, I}$ ,  $y = \overline{1, I}$ ,  $x \neq y$ . Каждый элемент  $wr_{x,y}^k = [1 \div 4]$ , где 1: «Окончание-Начало», 2: «Окончание-Окончание», 3: «Начало-Окончание», 4: «Начало-Начало».

Заданы параметры трудовых ресурсов:  $rateEmp_m^j$  – стоимость за единицу времени использования;  $idleRateEmp_m^j$  – стоимость за единицу времени простоя ресурса. Календарь доступности  $EmpCal_m^j = \{empCal_{m,h}^j\}$ , где  $m = \overline{1, M}$ ,  $h = \overline{1, H}$   $empCal_{m,h}^j \in R$ ,  $empCal_{m,h}^j > 0$ , задающий доступное количество ресурса. Производительность ресурса  $PEmp^j = \{pEmp_{m,z}^j\}$ , где  $m = \overline{1, M}$ ,  $z = \overline{1, Z}$ .  $pEmp_{m,z}^j \in R$ ,  $pEmp_{m,z}^j > 0$ , характеризующая скорость выполнения работ. Квалификация ресурса  $CEmp_m^j = \{cEmp_{m,g}^j\}$ , где  $m = \overline{1, M}$ ,  $g = \overline{1, G}$ .  $cEmp_{m,g}^j \in R$ ,  $cEmp_{m,g}^j > 0$ , характеризующая способность ресурса выполнять работы.

Заданы параметры технических ресурсов:  $rateTech_m^j$  – стоимость за единицу времени использования ресурса. Календарь доступности  $TechCal_q^j = \{techCal_{q,h}^j\}$ , где  $q = \overline{1, Q}$ ,  $h = \overline{1, H}$ .  $techCal_{q,h}^j \in R$ ,  $techCal_{q,h}^j > 0$ , задающий доступное количество ресурса. Технические характеристики ресурса  $CTech_m^j = \{cTech_{q,g}^j\}$ , где  $q = \overline{1, Q}$ ,  $g = \overline{1, G}$ ,  $compTech_{q,g}^j \in R$ ,  $compTech_{q,g}^j > 0$ , определяющие способность ресурса выполнять работы.

Для формирования расчета плана (расписания) требуется определить, в какие моменты  $t_h$  в каком объеме  $v$  задействованы трудовые ресурсы  $empR^j$  и вовлечены технические ресурсы  $techR^j$  исполнителя  $d_j$  для реализации каждой  $w_i^k$ . Для этого необходимо решить задачу календарно-сетевое планирования с ограничением по

ресурсам и определить совместно с задачей назначения ресурса  $empR^j$  и  $techR^j$  на выполнение работ с учетом их характеристик.

Введем функцию, определяющую, что  $w_i^k$  назначена на  $empR^j$ :

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

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

Приведем соотношения для определения показателей планов:

$$F_{dates}(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \beta_1 \times F_{finish}P_k + \beta_2 \times F_{start}P_k \quad (10)$$

где  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – весовые коэффициенты соблюдения сроков начала выполнения работ и завершения соответственно, при этом  $\beta_1 + \beta_2 = 1$ ;

$$F_{utilization}(t) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M EmpUtilization_m^j, \quad (11)$$

$$F_{quality}(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{\sum_i^I QualityW_i^k \times amountW_i^k}{\sum_i^I amountW_i^k}, \quad (12)$$

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

Формулы расчета показателей, входящие в соотношения, приведены в диссертационной работе. Соотношения для критериев оперативного уровня имеют аналогичную формализацию, но ограничены по числу заказов и ресурсов, которые рассматриваются в конкретном плане.

Формируемые планы должны удовлетворять ограничениям:

1. Весь объем работ по заказу должен быть запланирован:

$$amountW_i^k - \sum_h^H \sum_j^J \sum_m^M empV_{h,i^k,m^j} = 0, \forall W_i^k. \quad (14)$$

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

$$minEmpCountW_i^k \leq empCountW_i^k \leq maxEmpCountW_i^k. \quad (15)$$

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

$$minDurationW_i^k \leq durationW_i^k \leq maxDurationW_i^k. \quad (16)$$

4. Ограничение на качества тр. ресурса:

$$rComp_{i,g}^k - compEmp_{m,g}^j \geq 0, \quad (17)$$

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

5. Ограничение на качества тех. ресурса:

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

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

6. Ограничение по доступности трудовых ресурсов и технических ресурсов:

$$\begin{aligned} empCal_{m,h}^j - \sum_j^J \sum_m^M empV_{h,i^k,m^j} &\geq 0, \\ techCal_{q,h}^j - \sum_j^J \sum_m^M techV_{h,i^k,q^j} &\geq 0. \end{aligned} \quad (19)$$

7. Ограничение на экономическую целесообразность планов:

$$\sum_k^K ProfitP^k - \sum_j^J EmpIdleCost^j > 0. \quad (20)$$

8. Ограничение на порядок выполнения работ:

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

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 функции планов оперативного управления (5) каждого участвующего подразделения (6), в качестве главного критерия минимизируя расхождения между указанными планами (7) с учетом ограничений (14)-(21).

Для решения задачи предлагается модификация модели и метода работы ПВ-сети, позволяющая создать многоуровневую площадку взаимодействия отдельных автономных интеллектуальных систем (АИС) на базе сетевых платформ. В этих целях в работе проведена модификация базовых классов агентов ПВ-сети, моделей и методов их функционирования, а также протоколов взаимодействия для поддержки многоуровневого сопряженного вертикального и горизонтального р2р взаимодействия экземпляров АИС в реальном времени.

Для оптимизации планов по основным показателям (10)-(13) предлагается в базе знаний задавать множество рекомендаций возможных решений и действий, которые могут быть применены при формировании плана для улучшения заданного показателя, в том числе с возможностью ухудшения по другим. Такие рекомендации формулируются экспертами на основании их опыта и могут быть контекстно применены при формировании расписаний на основе анализа текущего состояния подразделений. К числу таких рекомендаций относятся: ввод дополнительной смены (сократит срок за счет стоимости), выбор другого процесса реализации (сократит срок за счет снижения качества) и им подобные.

Для решения поставленной задачи разработан метод многоуровневых сопряженных взаимодействий АИС для управления ресурсами предприятия, который включает следующие шаги.

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  $KPI_{y\Pi}$  и производится настройка целевой функции  $F_{y\Pi}(t)$  заданием экспертами весов критериев  $\omega_x$ .
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  $Plan_{y\Pi}$ .
5. На основании  $Plan_{y\Pi}$  для каждого подразделения (исполнителя) формируются задания (исходные данные) для построения детальных планов  $Plan_{y\Pi} \rightarrow \{P(t)^1, \dots, P(t)^j\}$ , которые передаются в виде заказов нижестоящим АИС ОУ ( $w_i^{k_{y\Pi}}(t) \rightarrow P_k^{Oy}(t)$ ).
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  $KPI_{Oy}$  и производится настройка целевой функции  $F_{Oy}(t)^j$  путем задания экспертами уровня подразделения весов  $\varphi_{jy}$ .
8. На основании онтологической модели подразделения определяются множества  $EmpR^j(t), TechR^j(t)$  и их характеристики:  $EmpCal_m^j, PEmp^j, SEmp_m^j, TechCal_q^j, CTech_m^j$ .
9. В каждом АИС ОУ решается задача оперативного планирования задач в едином пуле доступных сотрудников и оборудования с учетом их ограничений, в результате формируется  $Plan_{Oy}^j(t)$  и рассчитываются значения показателей  $KPI_{Oy}^j$ .
10. Определяется значение степени рассогласования  $D$  между оперативным планом  $Plan_{Oy}^j$  и укрупненным планом  $Plan_{y\Pi}$  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  $Plan_{Oy}^j$ .
12. Производится расчет показателей  $KPI_{Oy}^{jiter}$  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 решать задачу как 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  $Plan_{ОУ}^j$  и, при необходимости,  $Plan_{СП}$ .

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

Протоколы сопряженных взаимодействий АИС определяют правила согласованного принятия решений АИС при обработке возникающих событий.

Разработанные протоколы вертикальных взаимодействий, направленные на формирование и уточнение планов, включают: запрос предложений (В1), выбор лучшего предложения (В2), запуск плана в работу (В3), инициацию пересмотра согласованного плана снизу (В4), инициацию пересмотра согласованного плана сверху (В5). Протоколы горизонтальных взаимодействий, направленные на синхронизацию планов АИС-ОУ при появлении событий, включают: согласование срока передачи результатов (Г1), информирование о задержке (Г2), эскалацию проблемы (Г3), информирование о нагоне (Г4). Протоколы являются расширением аукционно-подобных протоколов Contract-Net, предложенных в работах Т. Sandholm<sup>1</sup>, развитых для решения задачи многоуровневого управления ресурсами.

На основании разработанных протоколов реализуются сценарии взаимодействия АИС-СП и АИС-ОП. Сценарий взаимодействия АИС-СП и АИС-ОП для формирования плана представлен на рисунке 1. В диссертационной работе представлены 3 разработанных сценария и логика работы АИС для поддержки данных протоколов.

Разработанные протоколы могут быть инициированы в АИС-СП и АИС-ОУ в ответ на возникающие события, запросы пользователя или других АИС. Были сформулированы 4 класса типовых событий: запрос на формирование сводного плана, появление/изменение заказов и ресурсов, фиксация проблем выполнения и появление фактических данных об исполнении.

---

<sup>1</sup> 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.

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.

Предложенная схема построения состоит в организации многоуровневой цифровой экосистемы АИС, состоящей из АИС центра предприятия, формирующей укрупненный план его работы в целом на большой горизонт времени, и АИС подразделений для оперативного управления планами на ближайшем горизонте. Предлагается сетцентрическая платформа для поддержки асинхронной и параллельной работы АИС центра и подразделений и их р2р взаимодействия для формирования, согласования и контроля исполнения планов (от англ. Peer-to-Peer – «каждый с каждым» как «равный с равным»).

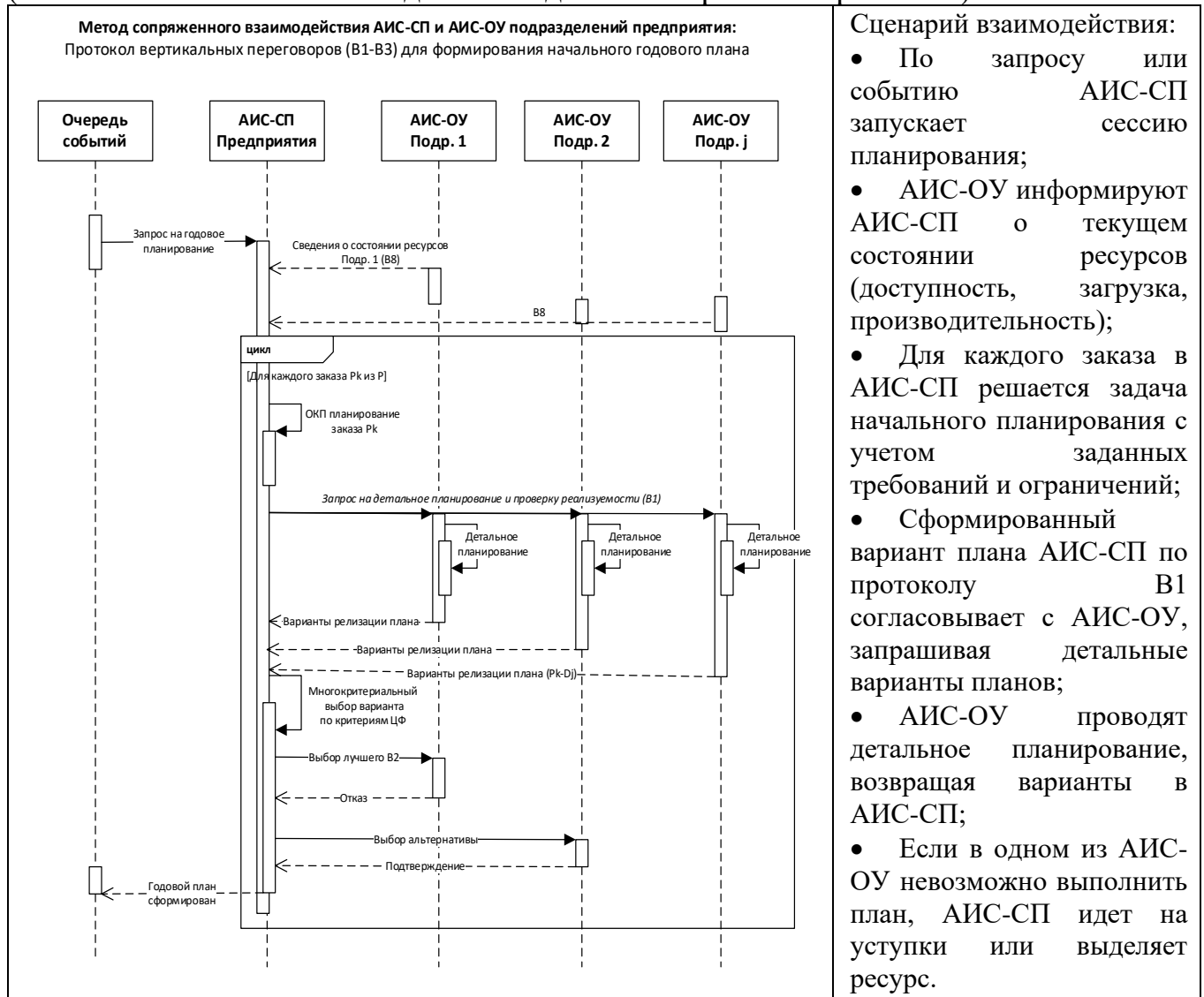


Рисунок 1 - Сценарии взаимодействия АИС для формирования начального плана, его согласования и контроля исполнения в подразделениях

Определены функции и разработана архитектура многоуровневой цифровой экосистемы АИС, развивающей принципы холонического подхода, используемой для управления проектами, производства и эксплуатации ВТИ. В качестве основных функций АИС выделены формирование и корректировка плана предприятия, прогнозирование возможных проблем и выработка корректирующих мер, моделирование различных ситуаций, а также мониторинг и контроль использования ресурсов. В архитектуре АИС выделены база знаний предприятия,



АИС-СП и АИС-ОУ для стратегического планирования и оперативного управления соответственно, сетцентрическая платформа и различные системные сервисы (рисунок 2). В диссертационной работе приводится архитектура отдельной АИС.

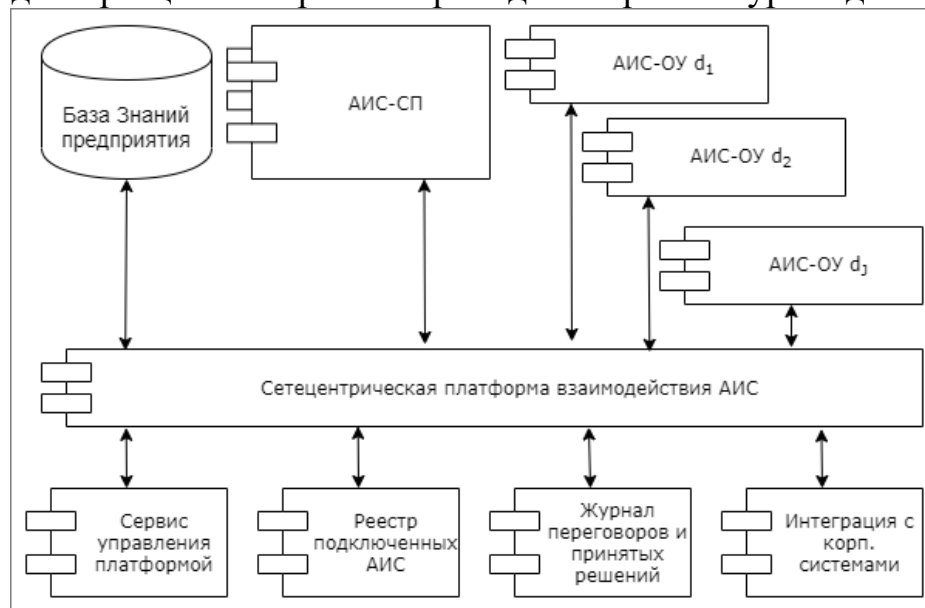


Рисунок 2 – Архитектура многоуровневой цифровой экосистемы АИС

Предлагаемая схема построения позволяет перейти к созданию многоуровневых цифровых экосистем АИС, масштабируемым от уровня одного подразделения предприятия – к предприятию в целом с учетом всех его производственных и обеспечивающих подразделений, и далее, на более высокий уровень отраслевых цепочек кооперации предприятий.

**В четвертой главе** проведено экспериментальное исследование разработанных методов и средств для оценки выигрыша от параллельного решения задачи. 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. Кроме того, выигрыш образуется за счет локальной обработки непредвиденных событий, которые парируются сразу в источнике их зарождения. Ограничения предлагаемых методов и средств связаны с работой на пределе пропускной способности ресурсов предприятия, когда нет возможности для реакции на события и попытки перестраивать план не дают результатов.

**В пятой главе** показаны применения разработанных методов и средств для решения прикладных задач управления ресурсами.

В задаче управления проектами НИОКР для МАК «Вымпел» в АИС УП первоначально решалась задача сквозного укрупненного планирования 25 проектов НИОКР на 500 сотрудников предприятия на интервале в 2 года, а далее в АИС ОУ формировались оперативные планы 15 подразделений на интервале в 1 месяц. Результаты применения разработанных методов и средств позволили на 25% сократить трудоемкость планирования проектов. АИС позволила ввести краткое совещание с визуализацией проблем, которое более чем в 5 раз повышает оперативность в принятии решений при возникновении непредвиденных событий.

В задаче управления производством сборки самолетов МС-21 для ПАО «Яковлев» решалась задача сквозного укрупненного планирования в АИС УП и оперативного управления ресурсами 5 цехов в АИС-ОУ. Созданные АИС ОУ обеспечивают оперативное планирование работ на месяц вперед для исполнения планов в срок. АИС-СП формирует долгосрочный и среднесрочный план работы всей линии сборки с учетом сроков комплектации, разрешает ресурсные конфликты за стапели сборки. Сформированный межцеховой план передается в АИС-ОУ каждого цеха и корректируется по мере его исполнения. Локальное взаимодействие АИС-ОУ позволяет сразу уточнять и пересогласовывать сроки. 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 на 1.5 года.

В задаче управления эксплуатацией инфраструктуры «ЦУП-ЦНИИМАШ» в АИС-УП решалась задача укрупнённого формирования годового плана обслуживания инфраструктуры, а далее в АИС-ОУ формировались оперативные планы подразделений. Опыт применения системы показал сокращение трудоемкости планирования и сопряжения планов на 15%, а также позволил исключить наложение сервисных планов на планы полетов космических аппаратов, что существенно снижает возможные риски.

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.

**В заключении** диссертации формулируются основные результаты работы:

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 сетцентрической платформы, обеспечивающей сопряжение укрупненного плана работы предприятия и оперативных планов его подразделений при возникновении событий рассогласований в реальном времени.
4. Разработано оригинальное программное обеспечение АИС и создана базовая многоуровневая цифровая экосистема АИС, нашедшая применение для управления ресурсами в проектах, производстве и эксплуатации ВТИ и цепочках кооперации.
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.

### ПУБЛИКАЦИИ В ИЗДАНИЯХ ИЗ ПЕРЕЧНЯ ВАК

1. **Ларюхин, В.Б.** Методы и средства сопряжённого взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределённого управления ресурсами предприятия / В.Б. Ларюхин // *Онтология проектирования*. 2023. Т. 13, № 2(48). С. 254-273. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273. EDN: KMEZIP.
2. **Ларюхин, В.Б.** Формирование стратегии развития Комитета по искусственному интеллекту в Научно-образовательном центре "Инженерия будущего" / И.И. Баринов, Н.М. Боргест, С.Ю. Боровик [и др.] // *Онтология проектирования*. 2021. Т. 11, № 3(41). С. 260-293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293. EDN: VVZCQP.
3. **Ларюхин, В.Б.** Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием. Часть 1. Цифровая платформа и цифровая экосистема / В.И. Городецкий, В.Б. Ларюхин, П.О. Скобелев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2019. Т. 20, № 6. С. 323-332. DOI: 10.17587/mau.20.323-332. EDN: FNFLIN. (Scopus)
4. **Ларюхин, В.Б.** Концептуальная модель цифровой платформы для кибер-физического управления современным предприятием. Часть 2. Цифровые сервисы / В.И. Городецкий, В.Б. Ларюхин, П.О. Скобелев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2019. Т. 20, № 7. С. 387-397. DOI: 10.17587/mau.20.387-397. EDN: AOTFAO. (Scopus)
5. **Ларюхин, В.Б.** Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С.П. Грачев, А.А. Жилияев, В.Б. Ларюхин [и др.] // *Автоматика и телемеханика*. 2021. № 11. С. 30-67. DOI: 10.31857/S0005231021110039. EDN: ZLESZX; перевод: **Laryukhin, V.B.** 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 [et al.] // *Automation and Remote Control*. 2021. Vol. 82, No. 11. P. 1857-1885. DOI: 10.1134/S0005117921110035. EDN: LZAFSU. (WoS, Scopus)
6. **Ларюхин, В.Б.** Мультиагентная технология адаптивного планирования и управления проектами НИР и ОКР в аэрокосмических приложениях / Е.М. Клейменова, П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин [и др.] // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 5. С. 58-63. EDN: QALAPH.

### В ДРУГИХ ИЗДАНИЯХ

7. **Larukhin, 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, S. Grachev, V. Larukhin [et al.] // *Mathematics*. 2022. Vol. 10, No. 10. DOI: 10.3390/math10101662. EDN: YKEBYK. (WoS, Scopus)
8. **Larukhin, V.** Conceptual Model of Digital Platform for Enterprises of Industry 5.0. / V. Gorodetsky, V. Larukhin, P. Skobelev // *Intelligent Distributed Computing XIII. IDC 2019. Studies in Computational Intelligence*. Vol 868. Cham: Springer, 2020. pp. 35-40. DOI: 10.1007/978-3-030-32258-8\_4
9. **Larukhin, V.** Vertical and Horizontal Negotiations of Multi-Agent Planning Services in a Multi-Service Platform for Crop Managing / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova [et al.] // *Proceedings – 2019 21st International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems", CSCMP 2019*. Samara, 2019. pp. 78-83. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976576. EDN: VGYQFW. (Scopus)

10. *Larukhin, V.* Smart enterprise: Multi-agent solution for holonic enterprise resource management / S. Kozhevnikov, V. Larukhin, P. Skobelev // 2013 IEEE/ACIS 12th International Conference on Computer and Information Science, ICIS 2013 – Proceedings. Niigata, 2013. pp. 111-116. DOI: 10.1109/ICIS.2013.6607826. EDN: QPASSS.

### СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

11. *Ларюхин, В.Б.* Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2021612808 Рос. Федерация. «Отраслевая многофункциональная сетевая цифровая платформа для управления ресурсами предприятий электротехнической промышленности» / В.Б. Ларюхин, О.И. Лахин, М.А. Каргин [и др.] Правообладатель ООО «НПК «Разумные Решения» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.02.2021.

12. *Ларюхин, В.Б.* Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2021612592 Рос. Федерация. «Интеллектуальная система управления ресурсами в цехах производства изделий» / В.Б. Ларюхин, О.И. Лахин, М.А. Каргин [и др.] Правообладатель ООО «НПК «Разумные Решения» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.02.2021.

13. *Ларюхин, В.Б.* 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 / П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин, Е. Пантелей [и др.] Правообладатель: ООО «НПК «Сетевые платформы» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.04.2022.

14. *Ларюхин, В.Б.* Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № RU 2021666188 года, Рос. Федерация. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению ресурсами в комплексных проектах / П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин. Правообладатель: НАО «Группа компаний «Генезис знаний» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.10.2021.

15. *Ларюхин, В.Б.* Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № RU 2021667107 года, Рос. Федерация. Сетевая платформа распределенных интеллектуальных автономных систем / П.О. Скобелев, В.Б. Ларюхин. Правообладатель: НАО «Группа компаний «Генезис знаний» (RU). Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.08.2021.

Заказ № \_\_\_\_\_. Формат 60×84 1/16 Уч. изд. л. 1.25. Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02  
на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»  
(протокол № 4 от 25 апреля 2024 г.)