

ФГАОУ ВПО УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА

На правах рукописи

ЗРАЕНКО Алексей Сергеевич

**СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ И ФОРМИРОВАНИЯ
КОАЛИЦИЙ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ ДИВИЗИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КРУПНЫХ ЗАКАЗОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук
доцент К.А. Аксенов

Самара – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные обозначения и сокращения.....	4
Введение	5
Глава 1. Системный анализ области мультиагентных моделей и процессов	13
1.1 Мультиагентные процессы преобразования ресурсов.....	13
1.1.1 Понятия бизнес–процессов и процессов принятия решений	13
1.1.2 Вопросы согласованного группового принятия решений	14
1.1.3 Рассмотрение мультиагентного процесса преобразования ресурсов с точки зрения организационно – технической системы.....	15
1.2 Обзор состояния проблемной области мультиагентных моделей.....	17
1.2.1 Мультиагентное моделирование	17
1.2.2 Типы архитектур агентов	18
1.2.3 Стандарты взаимодействия агентов	23
1.2.4 Коалиции агентов	28
1.2.5 Планирование выполнения работ	30
1.3 Обзор и сравнительный анализ систем распределения ресурсов и формирования коалиций.....	31
1.3.1 Примеры эффективного внедрения систем	31
1.3.2 Сравнительный анализ существующих систем.....	34
1.3.3 Критерии оценки эффективности работы систем	43
1.4 Постановка практической задачи	44
1.5 Постановка задачи по разработке системы распределения ресурсов и формирования коалиций.....	48
Выводы по главе 1.....	49
Глава 2. Разработка и системный анализ коалиционной модели.....	51
2.1 Требования к модели.....	51
2.2 Сравнительный анализ существующих моделей	52
2.3 Разработка коалиционной модели	62
2.4 Анализ существующих методов и решение задачи разрешения конфликтов	69
2.4.1 Метод разрешения конфликтов по стратегиям взаимодействий агентов	69
2.4.2 Методы проведения аукционов между агентами.....	72
2.5 Анализ существующих методов и решение задачи планирования	76
2.5.1 Требования к методу составления плана выполнения работ.....	76
2.5.2 Анализ методов теории составления расписаний	76
2.5.3 Общее описание задачи планирования.....	80
2.5.4 Составление плана выполнения работ по методу случайного поиска	81
2.5.5 Составление плана выполнения работ по методу Джонсона	88
2.5.6 Составление плана выполнения работ с учетом ограничения по времени	92
2.5.7 Сравнение алгоритма с учетом ограничения по времени с аналогами	99
2.6 Методика проектирования системы распределения ресурсов и формирования коалиций.....	101
2.6.1 Алгоритм жизненного цикла коалиции.....	101
2.6.2 Алгоритмы проведения аукционов.....	104
Выводы	108
Глава 3. Разработка системы распределения ресурсов и формирования коалиций	109

3.1 Структура системы.....	109
3.2 Функции системы.....	110
3.3 Принципы построения системы.....	111
3.3.1 Разработка языка взаимодействия агентов.....	111
3.3.2 Программная реализация языка взаимодействия агентов	113
3.3.3 Описание принципов интеграции.....	114
3.4 Технология работы в системе	116
Выводы по главе 3.....	119
Глава 4. Экспериментальные исследования	121
4.1 Описание и схема работы теплового пункта.....	121
4.2 Системный анализ модели промышленного предприятия	127
4.3 Расчет плана выполнения заказов	131
4.4 Разработка мультиагентной модели	133
4.5 Сравнительный анализ стратегий взаимодействия агентов	140
4.6 Расчет эффективности внедренной системы.....	141
4.7 Оценка роста функциональных операций разработанной системы.....	142
Выводы	145
Заключение.....	146
Список использованных источников	148
Приложение 1. Определение критериев сравнения.....	169
Приложение 2. Результаты сравнения моделей.....	171
Приложение 3. Результаты сравнения систем	173
Приложение 4. Акты внедрения	175
Приложение 5. Решение задачи составления плана выполнения работ по алгоритму Джонсона.....	178
Приложение 6. Решение задачи составления плана выполнения работ с учетом ограничения по времени	190
Приложение 7. Решение задачи составления плана выполнения работ по алгоритму Ю.А. Зака.....	250

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БД	база данных
БЗ	база знаний
БТП	блочный тепловой пункт
ДС	дискретно–событийное (моделирование)
ИМ	имитационное моделирование
ТП	индивидуальный тепловой пункт
ЛПР	лицо, принимающее решения
МАС	мультиагентная система
ММ	мультиагентное моделирование
МППР	мультиагентный процесс преобразования ресурсов
ОМАС	открытая мультиагентная система
ПВ	потребности и возможности
ПО	предметная область
ППР	процесс преобразования ресурсов
СД	системная динамика
СИМ	система имитационного моделирования
СМ	ситуационная модель
СММ	система мультиагентного моделирования
СППР	система поддержки принятия решений
СУБД	система управления базами данных
ТП	тепловой пункт
ТСР	теория составления расписания
ЦТП	центральный тепловой пункт
ЭС	экспертная система
ЯВУ	язык высокого уровня

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Данная работа посвящена решению задачи повышения эффективности использования ресурсов при выполнении крупных заказов на промышленных предприятиях, организованных по дивизиональной структуре управления и состоящих из нескольких производственных подразделений.

Указанная задача актуальна в связи с постоянным ростом импорта и конкуренции в отечественном промышленном производстве. Для повышения доли на рынке предприятиям необходимо не только иметь высокое качество и конкурентную стоимость товаров и услуг, но и хорошо выстроенные процессы планирования и распределения собственных ресурсов и средств.

В настоящее время большое число предприятий организовано на основе дивизиональной структуры управления. Данная структура подразумевает наличие автономных и равноправных производственных подразделений. Под автономностью подразделений понимается возможность выполнения ими заказов без привлечения каких-либо других ресурсов предприятия. Ключевыми фигурами в таких организациях являются руководители-менеджеры, возглавляющие производственные подразделения. Каждый из руководителей уполномочен принимать все производственно-финансовые решения для реализации целей, поставленных директором предприятия (повышение прибыли, повышение доли на рынке и т. д.). Одно из основных преимуществ дивизиональной структуры связано с расширением границ самостоятельности подразделений, благодаря чему они начинают более эффективно искать и выполнять заказы.

Для управления такими предприятиями, как в стратегическом, так и в тактическом плане все шире применяется мультиагентное моделирование всех процессов, протекающих как на предприятии, так и во внешней среде. В системном анализе разработка мультиагентных моделей является эффективным методом нахождения оптимального (либо приемлемого) решения задач,

возникающих в сложных системах. Существенный вклад в развитие мультиагентных систем внесли: Борщев А.В., Виттих В.А., Городецкий В.И., Карпов Ю.Г., Кобелев Н.Б., Попов Э.В., Поспелов Д.А., Скобелев П.О., Смирнов С.В., Советов Б.Я., Стефанюк В.Л., Соколов Б.В., Хорошевский В.Ф., Швецов А.В., Яковлев С.А., Conway J.H., Epstein J. M., Jennings N.R., McCarthy J., Nilsson N., Norvig P., Russell S. J. и др.

Под крупным заказом в рамках настоящей работы будем понимать заказ, полученный агентом-руководителем подразделения предприятия, требующий использование ресурсов и средств, превосходящих по объему имеющиеся ресурсы и средства данного подразделения. Коллективное использование ресурсов и средств, принадлежащих различным агентам, возможно при организации сообщества – коалиции. Существенный вклад в развитие теории коалиций внесли M.J. Wooldridge, M.B. Губко, J. Vidal, Y. Shoham, K. Leyton-Brown и др.

Для моделирования поступления заказов и распределения ресурсов с целью дальнейшего планирования выполнения работ могут быть использованы различные системы. В существующих системах, близких по функциональности: AnyLogic 6, BPsim2, MagentA, RepastJ, Simplex3, Tecnomatix Plant Simulation, не представлены встроенные механизмы формирования коалиций агентов и формирования оптимальных планов выполнения работ (или заказов).

Таким образом, актуальной научной задачей является исследование существующих математических моделей процессов формирования коалиций и создание коалиционной модели промышленного предприятия, обеспечивающей возможность лицам, принимающим решения (руководителям подразделений), самостоятельно производить ее настройки и с их помощью решать задачи распределения и повышения эффективности использования ресурсов и средств предприятия.

Целью диссертационной работы является разработка модели и информационной системы распределения ресурсов и формирования коалиций на промышленных предприятиях, построенных по дивизиональной структуре

управления, при выполнении крупных заказов.

Для реализации данной цели в работе поставлены следующие задачи:

1) провести системный анализ методов и средств планирования использования ресурсов на предприятиях с дивизиональной структурой управления;

2) выполнить сравнение существующих мультиагентных моделей и определить требования для Коалиционной модели;

3) разработать Коалиционную модель, позволяющую осуществлять планирование ресурсов для выполнения заказов на промышленных предприятиях с ограничением их выполнения по времени;

4) определить типы и характеристики производственных процессов, для которых существуют методы получения оптимальных планов, и при необходимости осуществить их доработку.

5) разработать алгоритмическое обеспечение и систему распределения ресурсов и формирования коалиций на базе Коалиционной модели;

6) провести испытания эффективности разработанной модели и системы в предметной области производства тепловых пунктов (ТП):

а. разработать онтологию предметной области производства ТП;

б. апробировать разработанную систему при совместном выполнении крупных заказов отдельными подразделениями предприятия по производству ТП.

Объектом исследования являются процессы производства и распределения ресурсов на промышленных предприятиях с дивизиональной структурой управления. Каждое подразделение предприятия состоит из руководителя и исполнителей (ресурсов), а также имеет в своем распоряжении средства для выполнения заказов – различные станки и устройства.

Предметом исследования являются процессы формирования сообществ (коалиций) руководителей производственных подразделений предприятия и процессы планирования использования ресурсов и средств данными руководителями при совместном выполнении крупных заказов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач используются методы искусственного интеллекта, методы системного анализа, методы имитационного и мультиагентного моделирования, методы теории составления расписаний, методы использования онтологий предметной области.

Научная новизна работы.

1. Разработана Коалиционная модель, отличающаяся от существующих:

- механизмами формирования коалиций, расширенными за счет встроенных алгоритмов совместного выполнения работ агентами;
- возможностью составления оптимальных планов выполнения работ с учетом ограничений по времени;
- расширенными механизмами взаимодействия агентов на основе стандарта FIPA,

что в сумме позволяет повысить количество выполняемых заказов в единицу времени в условиях ограниченности ресурсов.

2. Разработаны алгоритмы взаимодействий агентов, отличающиеся от существующих:

- ориентацией на проблемную область коалиций и задачу разрешения конфликтов между агентами при ограниченности ресурсов и средств;
- ориентацией на использование совместно с алгоритмом составления оптимальных планов выполнения работ с ограничениями по времени;

что в сумме позволяет повысить эффективность взаимодействия агентов и мультиагентной системы в целом.

3. Дополнен алгоритм составления планов выполнения работ по теореме Джонсона ограничениями по времени выполнения работ, что, в отличие от известных аналогов, обеспечивает оптимальность полученного плана.

4. Разработана система распределения ресурсов и формирования коалиций, отличающаяся от известных аналогов встроенным механизмом составления оптимальных планов выполнения работ с учетом их ограничения по времени и встроенным механизмом формирования коалиций.

Достоверность полученных результатов подтверждается данными,

полученными в ходе запусков мультиагентного моделирования в процессе внедрения разработанной Коалиционной модели на предприятии «Альтернативные энергосистемы».

Практическое значение работы. Разработанная модель и система позволяют:

- получать эффективные решения при совместном выполнении крупных заказов отдельными подразделениями промышленного предприятия;
- решать для подразделений промышленных предприятий задачи составления оптимального плана выполнения работ с учетом ограничений по времени;
- использовать встроенные и разрабатывать новые алгоритмы взаимодействий агентов в моделях;
- проводить имитационные эксперименты с визуализацией диаграммы последовательности взаимодействий агентов на языке UML, что позволяет следить за каждым шагом процесса моделирования.

Основные научные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Коалиционная модель, включающая:
 - встроенные механизмы формирования коалиций;
 - язык взаимодействия агентов на основе стандарта FIPA, разработанный для предметной области коалиций.
2. Метод взаимодействия агентов в модели, позволяющий:
 - использование агентом стратегий взаимодействия при формировании коалиций;
 - разрешение конфликтов на общих ресурсах и средствах агентов на основе алгоритмов проведения аукционов.
3. Технология составления планов выполнения работ агентами в модели на основе теоремы Джонсона, позволяющая составление оптимальных планов выполнения работ с учетом ограничений по времени.

Реализация результатов работы. Разработанная Коалиционная модель и система jSIM внедрены на ФГУП «Уральский региональный информационно-

аналитический центр «Уралгеоинформ» для моделирования поступления заказов на разработку геоинформационных систем (акт внедрения от 12 марта 2008 г.), в ООО АН «КИМ» для определения направления развития компании (акт внедрения от 4 июня 2008 г.), в ООО «Альтернативные энергосистемы» для моделирования производства ТП (акт внедрения от 19 марта 2013 г.).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором на Международной научно-практической конференции СВЯЗЬ-ПРОМ (г. Екатеринбург, 2006, 2007, 2008, 2010), X Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием (г. Обнинск, 2006), II Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2006), VI Международной научно-технической конференции «Научное программное обеспечение в образовании и научных исследованиях» (г. Санкт-Петербург, 2008), IX Международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2008» (г. Санкт-Петербург, 2008), Всероссийской научно-технической конференции «Наука – Производство – Технологии – Экология» (г. Киров, 2007), X Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Информационные технологии и электроника» (г. Екатеринбург, 2005), IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (г. Санкт-Петербург, 2009).

Личный вклад автора. Основные научные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

- модель процессов формирования коалиций при совместном выполнении сложных заказов агентами–руководителями подразделений [1,2,3,4,5,6];
- алгоритм составления оптимальных планов выполнения работ по теореме Джонсона с ограничениями по времени выполнения работ [7];
- язык взаимодействия между агентами, разработанный для предметной

области коалиций на основе стандарта взаимодействия агентов FIPA [8,9,10,11];

– система распределения ресурсов и формирования коалиций jSIM [12,13,14,15].

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 работы в печатных изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Объем основной части работы составляет 168 страниц машинописного текста. Работа содержит 49 рисунков и 23 таблицы. Список литературы включает 204 наименования.

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулирована цель работы, выделена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен системный анализ области мультиагентных систем и процессов. Изучена структура мультиагентных процессов. Проведен обзор состояния проблемной области мультиагентных моделей, проведен обзор и сравнительный анализ систем распределения ресурсов и формирования коалиций, рассмотрены примеры эффективного внедрения систем. Разработаны критерии оценки эффективности работы системы. Произведена постановка практической задачи. Произведена постановка задачи по разработке системы распределения ресурсов и формирования коалиций.

Во второй главе определены основные требования и разработана Коалиционная модель на основе интеграции аппаратов системного анализа, имитационного моделирования, мультиагентных систем, теории аукционов и теории составления расписаний. Проведен анализ адекватности модели путем ее сравнения с аналогами. Проведен анализ существующих методов и решена задача разрешения конфликтов между агентами. Проведен анализ существующих методов и решена задача планирования. Разработано алгоритмическое обеспечение для Коалиционной модели.

В третьей главе описана структура и функции разработанной системы jSIM. Рассмотрены основные принципы построения системы. Проведен обзор и

сравнительный анализ стандартов взаимодействия агентов. Приведено описание технологии работы в системе. Для использования системы в распределенном режиме выбран стандарт FIPA благодаря следующим преимуществам: наибольшая надежность, возможность описания онтологий; соответствие проблемной области коалиций; простота программной реализации.

В четвертой главе рассмотрены примеры моделей в системе jSIM. Система апробирована на примере задачи по производству тепловых пунктов на промышленном предприятии «Альтернативные энергосистемы». Проведен расчет планов выполнения работ агентами по трем различным алгоритмам. Проведен сравнительный анализ эффективности стратегий взаимодействия агентов. Исследована динамика использования ресурсов в зависимости от стратегии взаимодействия агентов. Проведена оценка эффективности внедрения системы jSIM.

В приложении 1 определены критерии сравнения систем распределения ресурсов и формирования коалиций. **В приложении 2** приведен сравнительный анализ программных систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций, и разработанной системы jSIM. **В приложении 3** приведен сравнительный анализ существующих математических моделей, позволяющих описывать мультиагентные процессы, и Коалиционной модели. **Приложение 4** содержит копии документов, подтверждающих внедрение программной системы jSIM. **Приложение 5** содержит решение задачи составления плана выполнения работ по алгоритму Джонсона. **Приложение 6** содержит решение задачи составления плана выполнения работ с учетом ограничения по времени. **Приложение 7** содержит решение задачи составления плана выполнения работ по алгоритму Ю.А. Зака.

ГЛАВА 1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОБЛАСТИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ

1.1 Мультиагентные процессы преобразования ресурсов

1.1.1 Понятия бизнес–процессов и процессов принятия решений

Понятие бизнес–процесса возникло вместе с современным промышленным способом производства. Под **бизнес–процессом** понимается последовательность взаимосвязанных активностей или задач, которые приводят к созданию определенного продукта или услуги для потребителей [12]. Правильно построенные бизнес–процессы должны создавать ценность для потребителей, повышать рентабельность организации и исключать любые необязательные или лишние активности. На основе ряда исследований [16] можно утверждать справедливость для бизнес–процессов правила Парето [17], показывающего, что 80% затраченного времени приходится на ожидание завершения тех или иных этапов и лишь 20% – непосредственно на выполнение предусмотренных в них задач. Следовательно, необходимо оптимизировать бизнес–процессы в целом. Оптимальным бизнес–процессом является процесс, обеспечивающий достижение целевых показателей предприятия в условиях имеющихся ограничений [16].

Бизнес–процессы в контексте работы типового предприятия можно разделить на три уровня [12]: управленческие, производственные и поддерживающие. Поддерживающие процессы необходимы для обеспечения работы предприятия, к ним обычно относится работа бухгалтерии, административно–хозяйственная часть, отдел кадров, обслуживание техники и т. п. Производственные процессы представляют собой процессы основной деятельности (производство, контроль качества и т. п.). Само понятие бизнес–процессов часто сужается до этого уровня, в связи с чем далее в работе будем понимать именно этот уровень под бизнес–процессами предприятия. Управленческие процессы стоят над всеми уровнями, их основной компонентой являются процессы принятия решений.

Под **процессом принятия решений** будем понимать процесс

рационального или иррационального выбора альтернатив, имеющий целью достижение осознаваемого результата [12]. Основными элементами процесса принятия решений являются проблемы, цели, альтернативы и решения – как выбор альтернативы [18–20].

В управлении предприятием принятие решений осуществляется руководителями различных уровней. В этой связи выделяют два уровня решений: индивидуальный и групповой [21–23]. Наиболее интересным является исследование группового принятия решений, в связи с чем необходимо проведение углубленного исследования вопросов согласованного группового принятия решений.

1.1.2 Вопросы согласованного группового принятия решений

Исследованием проблемной области согласованного группового принятия решений посвящены работы А.Г. Костинской [24], А.В. Петровского [25] и др. Под **групповым принятием решения** будем понимать осуществляемый группой выбор из ряда альтернатив (согласование) в условиях взаимного обмена информацией при решении общей для всех членов группы задачи [26]. Экспериментальное изучение процесса группового принятия решения было начато К. Левиным [27], пришедшему к выводу о том, что групповые решения не могут сводиться к сумме индивидуальных, а являются специфическим продуктом группового взаимодействия. В итоге в различных ситуациях качество группового решения может быть как выше качества индивидуального, так и ниже [28,29]. Это связано с уровнем группового и индивидуального развития.

При принятии групповых решений неизбежно возникают конфликтные ситуации [1]. В связи с этим необходимо более подробное исследование конфликтов и методов их разрешений. В рамках данной работы все возможные конфликтные ситуации будем разделять на два типа: связанные с принятием решений в условиях ограничения ресурсов и связанные с принятием решений в условиях ограничения средств [30]. При этом для обоих типов конфликтов в одинаковой степени возможно применение методов разрешения, подробно

описанных далее в работе.

1.1.3 Рассмотрение мультиагентного процесса преобразования ресурсов с точки зрения организационно – технической системы

Под **процессом преобразования ресурсов (ППР)** будем понимать совокупность действий (операций), потребляющих ресурсы, и приводящих к значащему результату (продукту процесса) [31]. В качестве дискретного ППР рассматривается процесс, в котором изменения состояний происходят только в дискретные моменты времени, а также «дискретные копии» непрерывного процесса, полученные дискретизацией переменных по времени [32]. Элемент (компонент) такого процесса преобразования ресурсов или весь процесс можно представить в виде структуры, включающей: вход (ресурсы), средства (необходимые для преобразования), условие запуска, преобразование, выход (результаты) [32].

В контексте данной работы **агент** представляет собой модель лица, принимающего решения, (ЛПР), которая обладает активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, может взаимодействовать с окружением и другими агентами, способна действовать в интересах достижения установленных целей, а также может изменяться (эволюционировать) [33]. Группа взаимосвязанных агентов образует многоагентную или **мультиагентную систему (МАС)**, в которой несколько агентов могут общаться (взаимодействовать) друг с другом, передавать друг другу различную информацию [34]. Идея мультиагентных систем появилась в конце 1950–х годов в научной школе М.Л. Цетлина, которая занималась исследованиями коллективного поведения автоматов [35]. Главные отличия агентной программы от обычной экспертной системы связаны с наличием механизма формирования целей и модуля коммутации, который обеспечивает взаимодействие с другими агентами [36]. Общая теория МАС еще не построена, это сравнительно новая и еще недостаточно изученная область знаний.

В качестве модели **мультиагентного процесса преобразования ресурсов**

(МППР) [2,3,7–9] будем рассматривать модель ППР, управляемую агентом (или МАС). Агент, входящий в МАС, может управлять преобразованием в МППР, условиями его запуска, или определять стратегии распределения ресурсов и средств, в зависимости от специфики конкретного процесса. Общая схема элемента (компонента) МППР представлена на рисунке 1.1.

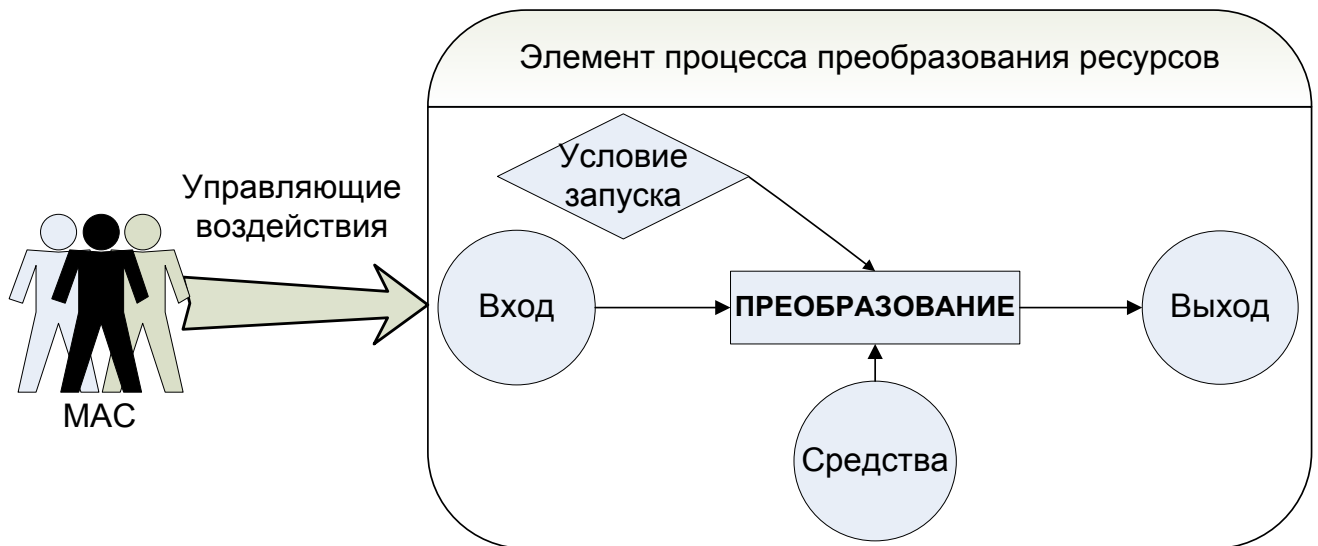


Рисунок 1.1 – Элемент модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов

Процесс преобразования ресурсов является конкретизацией общего вида организационно–технических процессов, где отдельно выделены «вход», «выход», «преобразование», «условие запуска», «ресурсы» и «средства». При помощи моделей МППР можно описывать большинство реально существующих процессов. К задачам проблемной области МППР относятся: проектирование новых и совершенствование существующих МППР, организация и управление МППР агентами, прогноз состояния ресурсов и средств, оценка временных и стоимостных характеристик процесса, оценка динамики использования ресурсов и средств [32], выработка стратегий распределения ресурсов и средств.

Для дальнейшего исследования МППР в интересах поставленных задач исследования необходимо рассмотрение общего понятия бизнес–процессов, их основных типов и видов, а также характерных особенностей.

1.2 Обзор состояния проблемной области мультиагентных моделей

1.2.1 Мультиагентное моделирование

Мультиагентное (агентное) моделирование является относительно новым направлением, но широко используемым в решении практических задач. Существенный вклад в развитие данного направления внесли: Борщев А.В. [37–39], Вавилов А.А. [40], Виттих В.А. [41–44,63], Гольдштейн С.Л. [45], Городецкий В.И. [46–48], Емельянов С.В. [49], Карпов Ю.Г. [33], Клыков Ю.И. [50], Кобелев Н.Б. [51], Попов Э.В. [52], Пospelов Д.А. [53,54], Прицкер А. [55], Советов Б.Я. [56], Скобелев П.О. [57–62], Смирнов С. В. [63–65], Стефанюк В.Л. [66], Соколов Б.В. [67, 68, 69], Хорошевский В.Ф. [70], Швецов А.Н. [71, 72], Шеер А.В. [73, 74], Яковлев С.А. [56, 72], Conway J.H. [75], Epstein J. M. [76], Jennings N.R. [77–79], McCarthy J. [80], Minsky M. [81], Newell A. [82], Nilsson N. [83], Norvig P. [84], Russell S. J. [84], Simon H. A. [85], Wooldridge M.J. [77,86,87].

Под **мультиагентным моделированием (ММ)** понимается вид имитационного моделирования, используемый для исследования систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами, а наоборот, эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности агентов системы [37]. Существует ряд инструментальных средств для построения мультиагентных моделей (Swarm, RePastJ, BPsim2, AnyLogic [88], Tecnomatics Plant Simulation), которые являются универсальными и могут использоваться также для создания моделей в других направлениях ИМ.

В контексте МППР, использование ММ позволяет учитывать интересы всех участников МППР в процессе взаимодействия, например при возникновении конфликтов на общих ресурсах и средствах [89].

Для изучения коллективного поведения агентов и координации их поведения в МАС используются различные модели [88]:

1. **модели коллективного поведения автоматов** исследованы в [35] и ряде более поздних работ, основаны на самоорганизации и распределенности,

используются в задачах с большим количеством простых взаимодействий;

2. **модели планирования коллективного поведения** применяются как для централизованного, так и для распределенного планирования;

3. **модели на основе логического вывода** решают задачи путем согласования результатов логического вывода в базах знаний отдельных агентов в процессе моделирования, что приводит к высокой сложности моделей и вычислительным трудностям;

4. **модели на основе конкуренции** используют механизм проведения аукционов [90], подробно рассмотренный далее в работе.

Применение ММ особенно эффективно для моделирования систем, содержащих большое количество активных объектов [91–97].

1.2.2 Типы архитектур агентов

Типы архитектур агентов подробно исследованы и описаны в [98–106]. Наиболее интересной является следующая классификация архитектур [107]: делиберативная (deliberative), реактивная (reactive) и гибридная (hybrid).

1. **Делиберативную архитектуру** принято определять как архитектуру агентов, содержащих точную символическую модель мира и принимающих решения на основе логического вывода [108]. База знаний делиберативного агента [109] содержит знания об объектах МППР, об окружающей среде и других агентах, об их стратегиях и т. д. Делиберативный агент планирует собственные действия на различные промежутки времени, ведет историю своих действий и их последствий – положительных (или ожидаемых) и отрицательных. Базовая архитектура делиберативного агента, согласно [77], изображена на рисунке 1.2.

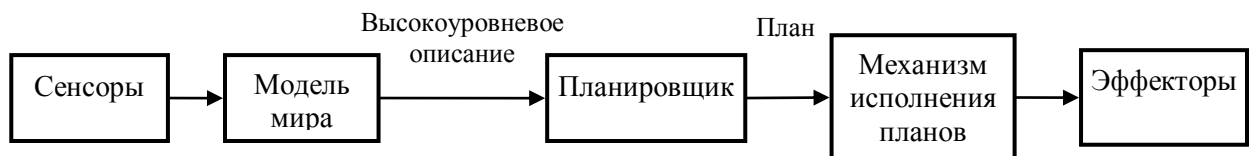


Рисунок 1.2 – Архитектура делиберативного агента

В данной архитектуре модель мира является внутренним описанием внешней для агента среды, также может включать описание самого агента.

Планировщик использует это описание для создания плана достижения цели агентом следующим способом: задавая атомарные действия (операторы), которые агент способен выполнить, их предусловия и их результаты в мире (постусловие), начальную и целевую ситуации – он ищет в пространстве последовательность операторов, пока не находит такую, которая преобразует начальное состояние в целевое состояние. Готовый план представляет собой список действий, который передается исполнителю планов. Далее механизм исполнения планов будет выполнять действия в рамках плана, вызывая различные процедуры низкого уровня эффекторов [110].

2. Реактивная архитектура. Реактивные агенты не имеют какой-либо символической внутренней модели мира; содержат в своей базе знаний правила типа «ситуация–действие», выбирая из них наиболее подходящие действия для конкретной ситуации. Таким образом, реактивная архитектура позволяет наилучшим образом использовать множество образцов поведения для реакции агента на определенные стимулы для конкретной предметной области. Базовая архитектура реактивного агента [111], изображена на рисунке 1.3.

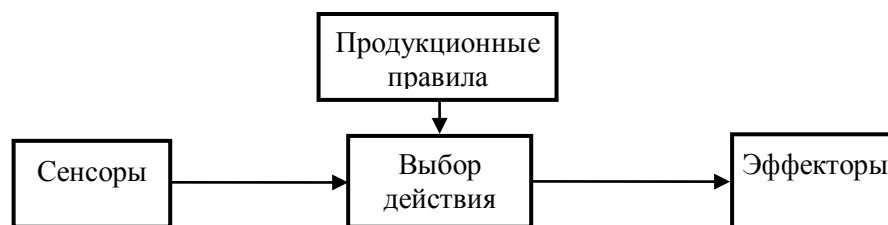


Рисунок 1.3 – Архитектура реактивного агента

В данной архитектуре выбор действия агентом полностью определяется заданными продукционными правилами.

3. Гибридная архитектура агентов комбинирует в себе подходы, используемые в делиберативных и реактивных архитектурах (см. табл. 1.1, 1.2). В теории возможно построение многоуровневых гибридных архитектур агентов. Однако в данной работе остановимся на двухуровневой. На первом уровне работает реактивная архитектура, на втором – делиберативная, оперирующая более абстрагированной информацией. Данная архитектура рассматривается учеными [112,113] как наиболее перспективная на сегодняшний день.

В таблице 1.1 различные типы архитектур агентов представлены с учетом модели преобразования ресурсов.

Таблица 1.1. Типы архитектур агентов в МАС.

Наименование элемента архитектуры	Обозначение	Архитектура делиберативного агента	Архитектура реактивного агента	Архитектура гибридного агента
Имя агента	Name	Имеет	Имеет	Имеет
Цель агента	G	Задана в виде функции полезности или графа причинно–следственных связей	Задана в виде функции полезности или графа причинно–следственных связей	Задана в виде функции полезности или графа причинно–следственных связей
База знаний агента, содержит:	KB			
–множество допустимых стратегий агента	M_{str}	Множество M_{str} определяет все возможные стратегии поведения агента	Множество M_{str} содержит набор правил типа «ситуация – действие»	Множество M_{str} определяет все возможные стратегии поведения агента, а также правила типа «ситуация –действие»
– стратегия агента	STR	Выбирается агентом для достижения его цели	Задана вместе с целью	Выбирается агентом для достижения его цели
– модель МППР, которым агент управляет	PR_A	Имеет полную информацию о процессе преобразования ресурсов	Может иметь полную или частичную информацию о процессе преобразования ресурсов	Имеет полную информацию о процессе преобразования ресурсов
– модели других агентов и других МППР	PR	Может иметь полную или частичную информацию о других агентах и процессах	Не имеет моделей	Может иметь или не иметь полную или частичную информацию о других агентах и процессах преобразования ресурсов
– критерии	KR	Имеет критерии оценки выбранного действия в соответствии с целью	Может иметь или не иметь критерии оценки выбранного действия	Может иметь или не иметь критерии оценки выбранного действия
– виды взаимодействия агента	COM	Имеет один или несколько наборов правил взаимодействия с	Может иметь или не иметь правила взаимодействия с другими агентами	Имеет один или несколько наборов правил взаимодействия с другими агентами при

Наименование элемента архитектуры	Обозначение	Архитектура делиберативного агента	Архитектура реактивного агента	Архитектура гибридного агента
		другими агентами при коллективной работе		коллективной работе
–история поведения агента и состояний МППР	HIS	Имеет возможность запоминать и извлекать из памяти свои действия и действия других агентов, а также результаты этих действий (состояния процесса преобразования ресурсов)	Не имеет памяти и способности к обучению	Может иметь или не иметь возможность запоминать и извлекать из памяти свои действия и действия других агентов, а также результаты этих действий (состояния процесса преобразования ресурсов)
Модуль коммуникации агента, содержит:				
–набор входящих сообщений	MES_IN	Имеет возможность принимать сообщения от других агентов	Может иметь или не иметь возможность принимать сообщения от других агентов	Имеет возможность принимать сообщения от других агентов
–набор исходящих сообщений	MES_OUT	Имеет возможность отсылать сообщения другим агентам	Может иметь или не иметь возможность отсылать сообщения другим агентам	Имеет возможность отсылать сообщения другим агентам
Общая база знаний МАС, содержит:	GKB			
–полный реестр всех агентов		Имеет возможность обращаться	Обычно не имеет возможности обращаться	Может иметь или не иметь возможность обращаться
–глобальная цель МАС (может существовать или нет)		Имеет возможность обращаться	Обычно не имеет возможности обращаться	Может иметь или не иметь возможность обращаться
–модель среды, в которой находится МППР (может существовать или нет)		Имеет возможность обращаться	Обычно не имеет возможности обращаться	Может иметь или не иметь возможность обращаться

В таблице 1.2. приведены результаты сравнительного анализа различных архитектур с учетом моделей МППР.

Таблица 1.2. Сравнение типов архитектур агентов в МАС

Тип архитектуры агента	Достоинства архитектуры	Недостатки архитектуры
Делиберативный агент	– Логическая полнота. – Имеет возможность задания целей, в т.ч. иерархии целей. – Имеет возможность описания стратегий – правил выбора действия агентом. – Имеет полную информацию о ППР. – Имеет полную информацию о других агентах и других ППР. – Имеет критерии оценки выбранного действия в соответствии с целью. – Имеет способность к обучению. – Имеет возможность взаимодействовать с другими агентами. – Имеет возможность запоминать и извлекать из памяти.	– Имеет очень большой объем базы знаний. – За счет большого объема базы знаний имеет меньшую скорость работы. – Имеет высокую сложность описания.
Реактивный агент	– Имеет возможность задания целей, в т.ч. иерархии целей. – Имеет возможность описания реакций, т.е. правил типа «ситуация–действие». – За счет меньшего объема базы знаний имеет большую скорость работы. – Более прост в описании, чем другие типы агентов. – Может иметь возможность взаимодействовать с другими агентами.	– Не имеет памяти и способности к обучению. Обычно не имеет полной информации о ППР. – Не имеет моделей других агентов и других ППР. – Обычно не имеет возможности взаимодействовать с другими агентами.
Гибридный агент	– В зависимости от требований к МАС может иметь или не иметь возможность запоминать и извлекать из памяти. – Имеет возможность задания целей, в т.ч. иерархии целей. – Имеет возможность описания стратегий – правил выбора действия агентом, а также реакций агента, т.е. правил типа «ситуация–действие». – Имеет полную информацию о ППР. – В зависимости от требований к МАС может иметь или не иметь полную информацию о других агентах и других ППР, а также критерии оценки выбранного действия в соответствии с целью. – Имеет способность к обучению. – Имеет возможность взаимодействовать с другими агентами.	В зависимости от требований к МАС может иметь часть недостатков реактивного агента или делиберативного

На основе сравнения типов архитектур агентов в МАС, можно сделать вывод, что для предметной области МППР целесообразно строить агенты гибридной архитектуры, включающей делиберативную (содержащую символьную модель мира для принятия глобальных решений) и реактивную (для реагирования на происходящие события в системе). В связи с этим, далее в работе под понятием агента будем понимать агента гибридной архитектуры.

1.2.3 Стандарты взаимодействия агентов

Стандарты взаимодействия используются в распределенных системах для организации общения агентов. Для взаимодействия агентов в МАС используются универсальные языки программирования (Java); языки, «ориентированные на знания», такие как языки представления знаний (KIF); языки взаимодействия агентов (FIPA, KQML, AgentSpeak, April); языки спецификаций агентов; специализированные языки программирования агентов (TeleScript); языки описания сценариев (Tcl/Tk); языки логического программирования (Oz) [34]. Также широко используются LISP-подобные языки, являющиеся близкими к естественному языку.

Для разработки языка общения между агентами возможно использование двух различных подходов. Первый подход – процедурный, то есть коммуникации базируются на исполнении инструкций. Такой язык может быть спроектирован и запрограммирован на Java или таком средстве разработки как Tcl. Второй подход – декларативный, то есть коммуникации происходят на базе описаний. Этот подход получил большее распространение для создания языков общения агентов [114]. Наиболее популярными стандартами, определяющими язык общения агентов, являются: FIPA – Foundation for Intelligent Physical Agents [115] и KQML – Knowledge Query and Manipulation Language [116].

Стандарт FIPA. Разработан комитетом FIPA [115]. Он включает язык FIPA ACL (Agent Communication Language) [117], с помощью которого агенты могут передавать сообщения определенного формата посредством различных сервисов передачи данных, и LISP-подобный язык описания содержимого сообщения FIPA

SL (Semantic Language). Внутренняя архитектура стандарта FIPA состоит из следующих сервисов, объединенных в общий реестр:

- сервис передачи сообщений;
- сервис регистрации агентов в «мире» (т.е. в MAC);
- сервис описания языка общения агентов;
- реестр всех сервисов.

Данная архитектура может взаимодействовать с внешними системами для управления и реализации текущих задач агентов. На рисунке 1.4 представлен механизм передачи сообщений между агентами в стандарте FIPA.

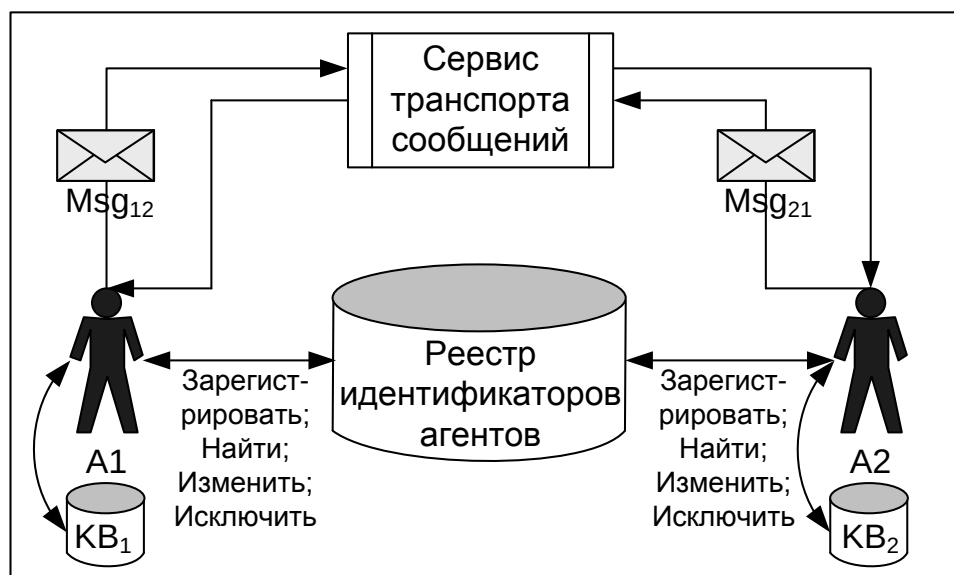


Рисунок 1.4 – Механизм передачи сообщений между агентами в стандарте FIPA

Для передачи сообщения, агент должен найти адресата в специальном реестре «живых» агентов, т.е. агентов, проявляющих какую-либо активность, в котором любой агент системы может зарегистрироваться, исключиться, найти другого агента или изменить сведения о себе, хранящиеся в данном реестре. Реестр, в свою очередь, состоит из набора экземпляров – записей данных об агентах.

Стандарт KQML. Разработан комитетом ARPA (Advanced Research Projects Agency) [116]. Он включает язык KQML – «внешний» язык, который определяет множество допустимых коммуникативных действий (performatives) и LISP-подобный язык описания содержимого сообщения – KIF (Knowledge Interchange

Format). Стандарт состоит из трех уровней: коммуникативный уровень (описывает такие параметры как отправитель, получатель, различные идентификаторы сообщения), уровень сообщения (описывает запросы, управляющие действия, а так же протокол для интерпретации сообщения), уровень содержания (содержит информацию, сопровождающую запросы уровня сообщения).

Стандарт характеризуется следующими основными особенностями:

1. агенты связаны односторонними каналами связи, по которым передаются фиксированные сообщения;
2. каналы связи могут иметь ненулевую задержку передачи сообщения;
3. при получении сообщения агент определяет, от кого и по какому входному каналу это сообщение поступило;
4. агент может отправить сообщение только по определенному каналу;
5. сообщения для конкретного адресата поступают в порядке очереди отправки;
6. доставка сообщений абсолютно надежна.

Механизм передачи сообщений между агентами в стандарте KQML представлен на рисунке 1.5.

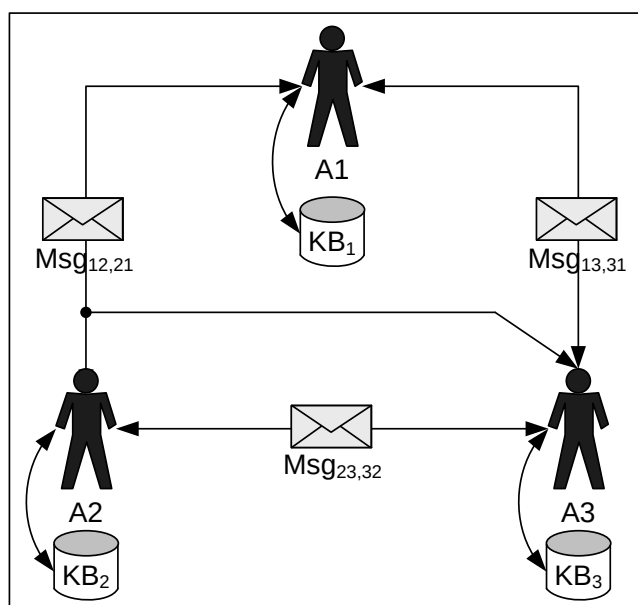


Рисунок 1.5 – Механизм передачи сообщений в стандарте KQML

Стандарт поддерживает как синхронную, так и асинхронную передачу

сообщений. Агенты могут общаться напрямую с другими агентами (указывая символьное имя), рассылать широковещательные сообщения или «просить» об этом других агентов – участников общения. Далее приведены примеры прикладных систем, реализованных с использованием KQML.

1. Программный комплекс Next-Link [118], разработанный в Стенфордском университете, направлен на изучение принципов координации, позволяющих созданным агентам выполнять распределенное проектирование и дизайн систем.

2. Программный комплекс Logic Centered Design [119], разработанный в центре искусственного интеллекта Локхида (Lockheed AI Center), позиционируемый как интеллектуальная информационная система для проектирования и дизайна систем.

3. Web-сервер презентаций Concur [120], разработанный в Стенфордском университете Грегори Олсеном (Gregory R. Olsen), использующий агентный подход для вычислений при распределенном проектировании систем.

4. Программный комплекс для распределенного получения данных о глобальных температурах и влажностях [121], разработанный Дианой Вейс (Diane Weiss) из MITRE.

Концептуальное сравнение стандартов представлено в таблице 1.3.

Таблица 1.3. Концептуальное сравнение стандартов взаимодействия агентов.

Параметры сравнения	FIPA	KQML
Модель	Должны существовать следующие основные объекты: реестр агентов, реестр сервисов, механизм передачи сообщений, язык общения агентов.	Процесс общения состоит из передачи между агентами атомарных объектов, таких как сообщения, написанных на LISP-подобном языке.
Сущность	В структуре системы есть управляющие объекты: – реестр сервисов – позволяет реализовывать системы с набором сервисов у агентов; – реестр агентов – дает возможность поиска агентов.	Стандарт делит общение агентов на три уровня: содержания, сообщения и передачи: – содержание может быть любым, что не отражается на структуре; – структура сообщения всегда фиксирована; – уровень передачи кодирует набор свойств сообщений, определяющий параметры передачи на нижнем уровне,

Параметры сравнения	FIPA	KQML
		такие как получатель, отправитель и уникальный номер передачи.
Семантика	В теле сообщений имеется возможность передавать описание онтологий [122,123], что позволяет агентам общаться вне зависимости от собственного набора онтологий и семантических знаний [73].	В языке имеются лишь дескрипторы, которые могут сообщать о возможном смысле тела сообщения.
Синтаксис	Используется LISP-подобный язык FIPA SL	Используется LISP-подобный язык
Реализация	Существует множество проектов, в которых реализован данный стандарт, вследствие его возможностей для работы масштабируемой MAC, распределенной по локальной сети или в сети Интернет. Наиболее известные: JADE [124], Trillian, Jeus, Lear. В системах отсутствует возможность сжатия тела сообщения при передаче.	Существует две широко известные реализации: Lockheed KQML API и UNISYS KQML API, каждая из которых предполагает передачу сообщений вне зависимости от его содержания. В данных реализациях используются агенты, собирающие информацию о других агентах в своем домене и основанные на принципе запрос – ответ. В системах имеется возможность сжатия тела сообщения при передаче.
Общение агентов	Для передачи сообщения агент должен найти запись об адресате в реестре, и только потом имеет возможность послать его через сервис транспорта сообщений. Таким образом, в стандарте реализована централизованная структура.	Агенты могут общаться напрямую с другими агентами (указывая символьное имя), рассылать широковещательные сообщения или просить об этом других участников общения, используя соответствующую форму сообщений. Поддерживается как синхронная, так и асинхронная передача. Таким образом, в стандарте реализована сетевая структура.
Окружающая среда	В качестве транспортного механизма могут быть использованы следующие протоколы: Enterprise message systems, Java Messaging System, CORBA IIOP, Remote method invocation, SMTP, XML over HTTP, Wireless Access Protocol, Microsoft Named Pipes.	В качестве транспортного механизма может быть использован любой стандартный протокол (HTTP, SMTP, TCP/IP и др.). Отсутствуют ограничения на контент, передаваемый в теле сообщений.
Надежность	Механизм передачи сообщений может иметь функции электронной подписи и шифрования тела сообщения (SKIP, IPSEC and CORBA Common Secure Interoperability Services). Предусмотрены механизмы аутентификации и авторизации, позволяющие обеспечить надежную	На уровне общения агентов механизмы защиты от атак отсутствуют. На уровне транспорта сообщений возможна реализация защиты с помощью шифрования сообщения (или только его тела). На уровне языка возможно обеспечение наибольшей надежности передачи сообщений с помощью использования

Параметры сравнения	FIPA	KQML
	передачу сообщений и защиту от сетевых атак на МАС. При передаче сообщений имеются механизмы защиты от ошибок.	ответных сообщений типа «echo», «sorry» и т. п. При передаче сообщений имеются механизмы защиты от ошибок.

Вывод: В результате проведенного сравнительного анализа данных стандартов взаимодействия агентов выбран стандарт FIPA благодаря следующим основным преимуществам:

- 1) стандарт имеет наибольшую надежность;
- 2) стандарт позволяет передавать описание онтологий [122, 123];
- 3) стандарт наиболее полно соответствует проблемной области МППР;
- 4) благодаря централизованной архитектуре, стандарт является универсальным и легко реализуемым в программных системах.

1.2.4 Коалиции агентов

В МАС отдельные агенты могут объединяться в сообщества – коалиции [87,125–133]. Коалиции сейчас являются большой теоретической темой в мультиагентных системах. Большой вклад в развитие теории коалиций внесли M.J. Wooldridge [87], M.B. Губко [125–128], J. Vidal [131], Y. Shoham [132], K. Leyton–Brown [132], K. Binmore [133]. В рамках настоящей работы механизм создания коалиции применяется агентом в первую очередь для использования ресурсов и средств другого агента по согласованному с ним плану (в определенные временные промежутки).

Под **активными объектами** в МАС будем понимать агентов и коалиций. Будем считать, что при управлении МППР, каждый активный объект имеет ряд **целей**, каждая из которых имеет свой **приоритет**. Под **доминирующей** (основной) целью будем понимать цель активного объекта с наибольшим приоритетом в данный момент времени [2]. Тогда под **коалицией** будем понимать структуру, являющуюся временным объединением некоторого числа агентов в сообщество, основанное на сонаправленности их доминирующих целей [2]. Вступление агента в такое сообщество связано с необходимостью достижения

его доминирующей цели и поиском союзников в этом направлении. В рамках МАС каждый агент в конкретный момент времени может состоять только в одной коалиции. При объединении в коалицию ресурсы и средства агентов становятся общими. Модели формирования коалиций и распределения задач между партнерами по коалиции, а также модели планирования выполнения работ позволяют описывать и исследовать процессы взаимодействия агентов в МАС [134].

Применение аппарата коалиций в моделях промышленных предприятий, организованных по матричной структуре управления и состоящих из нескольких производственных подразделений, наиболее эффективно, когда на отдельное подразделение предприятия поступает большой заказ, **превосходящий** по объему ресурсы и средства данного подразделения. В этом случае известные методы и модели (рассмотренные в п. 2.3.2 данной работы) **не дают гарантии**, что произойдет выполнение всех заказов в срок. Коалиция обеспечивает возможность агентам–руководителям подразделений договориться и составить совместный план действий по использованию общих ресурсов и средств для выполнения крупного заказа в установленные сроки.

Приведем практический пример, в котором применение аппарата коалиций дает значительный эффект. Руководитель подразделения (дивизиона) предприятия договорился о заказе по изготовлению партии из 50 сложных изделий – вводится в эксплуатацию новый жилой район в городе. После изготовления изделий заказчик предоставляет железнодорожный состав для вывоза готовой продукции. В связи с тем, что изделия сложные и объемные – сдать работы необходимо одновременно (возможности хранения изделий на предприятии нет). Для выполнения всего заказа ни у одного подразделения нет достаточных производственных мощностей. Рассмотрим решение задачи с помощью коалиций. Директор предприятия ставит всем руководителям подразделений доминирующую цель – выполнить данный заказ в требуемый срок без привлечения субподрядчиков. Все руководители подразделений объединяются в коалицию (их цели сонаправлены). Далее они составляют план

выполнения работ с учетом имеющихся у подразделений заказов: перераспределяют ресурсы и средства таким образом, чтобы иметь возможность в срок выполнить весь заказ, согласовывают дату запуска изделий в производство и запускают работы. До завершения работ по данному заказу конкретного подразделения, оно может выйти из коалиции **только** в случае изменения доминирующей цели агентом–директором (в этом случае план выполнения работ остальными подразделениями пересчитывается). В итоге предприятие выполняет работы и сдает 50 изделий в требуемый срок.

Аналогичные примеры можно привести и в других областях. Например, в областях химического и биологического производства. В частности, при химических реакциях нет возможности отложить определенные реагенты «на склад» без потери их свойств, т.е. последовательное выполнение исполнителем заказа маленькими партиями невозможно. Если необходимо выполнить объем работ по заказам, необходимо всем исполнителям «договориться» о синхронном выполнении заказа. Только при синхронном выполнении заказа полученная большая партия быстроразлагающихся материалов (реагентов) поступит заказчику в срок для дальнейшей обработки. Это можно обеспечить путем создания коалиции.

Таким образом, применение механизмов формирования и взаимодействия коалиций расширяет возможности мультиагентного моделирования и их использование при разработке программных систем является целесообразным. Для практического использования мультиагентного моделирования агентов и коалиций необходимо исследование задач составления планов выполнения работ.

1.2.5 Планирование выполнения работ

К числу актуальных задач в мультиагентных моделях относятся задачи составления планов выполнения работ агентами и коалициями. Под **планом выполнения работ** будем понимать перечень намеченных к выполнению работ или мероприятий с определенными: последовательностью, объемами и сроками выполнения [135]. Поскольку все факторы, влияющие на планы выполнения работ,

учесть практически невозможно, а интересы агентов часто различны, задача составления планов является многокритериальной, с нечетким множеством факторов. Решение таких задач, как правило, осуществляется с использованием **теории составления расписаний (ТСР)** в два этапа [136]: получение плана путем использования определенного метода составления на основе исходных условий выполнения работ и формализуемых ограничений, и его последующая доработка с целью максимального учета неформализуемых ограничений. Наибольший вклад в развитие ТСР внесли: Р. Акоф, Р. Беллман, Г. Данциг, Г. Кун, Т. Саати [137], Р. Чермен, А. Кофман, Р. Форд, С. Джонсон и др. [138–142].

В процессе составления плана выполнения работ необходимо определить условия выполнения работ и формализуемые (четкие), а также неформализуемые (нечеткие) ограничения [141]. При учете только формализуемых ограничений, задачу составления плана выполнения работ можно решать как задачу целочисленного программирования. Однако, при реальных объемах поступающих заказов, данная задача не может быть решена за реальное время. Вследствие этого для задач данного типа будем считать необходимым использование методов ТСР по поиску приближенных решений [143–147].

В рамках настоящей работы существует необходимость «оснащения» агента алгоритмом составления планов выполнения работ для использования в рамках математической модели МППР.

1.3 Обзор и сравнительный анализ систем распределения ресурсов и формирования коалиций

1.3.1 Примеры эффективного внедрения систем

Для последующего проведения сравнительного анализа систем, близких к функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций, и постановки задачи по разработке, необходимо исследование примеров эффективного внедрения. Сложные системы на базе агентов уже нашли широкое применение в промышленности. Так, например, IBM использует систему для производства полупроводниковых микросхем, датская судостроительная

компания – для заварки отверстий в кораблях, а в Японии система на базе агентов выполняет функции интерфейса оператора сверхскоростного поезда [148, 148]. Рассмотрим более подробно примеры конкретных разработок и эффективных внедрений систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций.

1. В Санкт–Петербурге, в рамках цикла научно–исследовательских работ, проводимых Фондом поддержки промышленности и Институтом промышленного субконтрактинга по заказу Комитета экономического развития, промышленной политики и торговли Администрации города Санкт–Петербурга, в 2003–2005 г.г. была разработана информационная система субконтрактинга (ИСС) [150]. Система содержит сведения о производственных возможностях промышленных предприятий в базе данных (БД), которая обновляется в соответствии с изменениями производственных возможностей и текущей загрузки предприятий. Помимо БД, составными частями ИСС являются система планирования заказов, а также система мультиагентного моделирования и оптимизации.

2. Система управления финансовыми потоками внедрена на предприятии ОАО «Самарский жиркомбинат» [151]. В системе используются следующие типы агентов: агенты управления проектами; агенты идентификации и аутентификации, ответственные за определение источников информации и подтверждении ее подлинности; агенты принятия решений для управления финансовыми потоками; агенты обучения; мета–агенты, управляющие процессами согласования между всеми агентами системы и обеспечивающие координацию поведения агентов и их кооперацию при решении задач управления финансовыми ресурсами; агенты восприятия, предназначенные для анализа обрабатываемых в системе сообщений; агенты защиты и другие.

3. Han, Douglas и Stephanopoulos (1995) разработали систему промышленного проектирования [152]. Данная система внедрена на ряде предприятий в США. Процесс проектирования разбивается на отдельные задачи, каждую из которых решает отдельный агент. Агенты–руководители, а также человек–оператор осуществляют координацию деятельности этих агентов–

исполнителей для решения задач проектирования.

4. Система логистических процессов, протекающих в сложных организационно–технологических объектах внедрена для автоматизации подвода груза к транспортным узлам на полигоне Северо–Кавказской Ж.Д., при оптимизации подвода грузов в работе ОАО «Ростовский порт», при оптимизации распределения задач между локомотивами на предприятии ООО «Комбайновый завод «Ростсельмаш»» [153]. В системе используются мультиагентные модели функционирования транспортных узлов, что позволило оценить процесс взаимодействия различных видов транспорта при изменяющихся параметрах входных потоков. Алгоритм мультиагентного моделирования разработан с учетом предпочтений экспертов по автоматизации подвода грузов к транспортному узлу [153].

5. Одним из региональных проектов ФЦП «Электронная Россия 2002–2010 гг.» стал проект «Разработка первой очереди системы управления регионом с применением мультиагентных технологий». Этот проект был подготовлен Правительством Самарской области и в 2002 году представлен на общероссийском конкурсе, проводимом Министерством экономического развития и торговли Российской Федерации. В результате проведенного конкурса проект занял первое место, и Самарская область была определена пилотным регионом по реализации проекта [154].

Заказчиками проекта выступили Министерство экономического развития и торговли Российской Федерации и Правительство Самарской области. Тендер на разработку выиграла в октябре 2003 г. научно–производственная компания «Генезис знаний» (г. Самара), специализирующаяся на внедрении программных продуктов с применением мультиагентных технологий. Цель создания системы – повышение качества и эффективности управления в регионе для реализации потребностей и возможностей граждан и обеспечения устойчивого социально–экономического развития региона.

В результате проведенного внедрения поставленная цель была достигнута на основе разработки и применения новых социальных, управленческих

и информационных технологий: индивидуального подхода к решению проблем каждого человека в условиях ограниченных ресурсов; нового подхода к управлению, заключающегося в замене принципа воздействия власти на население принципом взаимодействия; использования мультиагентных технологий; перехода от систем, основанных на данных, к системам, базирующимся на знаниях.

6. Система конструирования прикладного программного обеспечения «Univ–Controls» [155], позволяющая эффективно разрабатывать и сопровождать функционально–полные информационные Интернет/Интранет системы учетно–финансового профиля, реализована на основе программных агентов, обладающих высокой степенью автономности и адаптивным поведением. Созданная с помощью данной конструкторской среды система «АРМ Автотранспорт и механизмы» внедрена на предприятии ОАО «Сибмост».

7. Система организационного управления, решающая задачи организации работ по рассмотрению обращений граждан [156] внедрена в Правительстве Вологодской области в отделе по организации приема писем и граждан.

В итоге можно сказать, что когда человек сталкивается с проблемой, которую не в состоянии решить самостоятельно, он или находит себе помощника, или создает инструмент, необходимый для работы. На роль персональных помощников как нельзя лучше подходят системы, примеров эффективных внедрений которых становится с каждым днем все больше. Для дальнейшей постановки задачи по разработке системы необходимо проведение сравнительного анализа существующих систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций.

1.3.2 Сравнительный анализ существующих систем

В результате анализа систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций, были выделены системы: AnyLogic 6, BPsim2, MagentA, RepastJ, Simplex3, Tecnomatix Plant Simulation. Рассмотрим данные системы подробнее.

1) Система **AnyLogic 6** [33,37–39,88]. Система является российским продуктом, разработчик – компания «XJ Technologies», г. Санкт – Петербург. Она предназначена для разработки и исследования практически всех видов имитационных моделей и является достаточно универсальной. AnyLogic 6 основан на объектно–ориентированной концепции. Другой базовой концепцией является представление модели как набора взаимодействующих параллельно функционирующих активностей. Активный объект в AnyLogic 6 – это объект со своим собственным функционированием, взаимодействующий с окружающей средой и другими активными объектами. Он также может включать в себя любое количество экземпляров других активных объектов.

Графическая среда моделирования в системе поддерживает проектирование, разработку, документирование модели, выполнение компьютерных экспериментов и оптимизацию параметров относительно определенного критерия.

Достоинства системы:

- наличие встроенных библиотек активных объектов, позволяющих создание агентов и мультиагентных моделей,
- синхронное и асинхронное планирование событий в моделях,
- развитая визуализация и анимация построения моделей и проведения экспериментов, возможность 3D – визуализации моделей,
- возможность работы системы с внешними программными комплексами,
- широкие возможности кодирования, связанные с использованием встроенного языка высокого уровня Java.

Недостатки системы:

- отсутствие встроенного механизма составления планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени,
- необходимость описания специфики агентов в коде на языке Java, что является достаточно трудоемким процессом для ряда пользователей,
- отсутствие языка обмена сообщениями между агентами, разработанного для МППР на основе стандарта взаимодействия агентов,

- отсутствие встроенного механизма формирования коалиций.

2) **Система BPsim2** [30, 31, 157, 158, 159–165]. Система разработана в РИ–РТФ УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург) к.т.н., доц. К.А. Аксеновым. В основе системы лежит проблемная ориентация, позволяющая существенно снизить требования, предъявляемые к уровню знаний конечных пользователей в области программирования. Данное направление является одним из наиболее перспективных в развитии средств имитационного моделирования. BPsim.MAS полностью соответствует проблемной области МППР. Система превосходит по функциональности ряд зарубежных аналогов и позволяет адекватно описывать и моделировать экономические, производственные и технические процессы в рамках концепции МППР.

Встроенный математический аппарат используется для описания функций составных частей МППР: условия запуска, входа, выхода, механизма осуществления преобразования. В качестве операндов используются множества: ресурсов, средств, заявок, параметров.

Для описания структуры МППР используются оператор декомпозиции (детализирует сложный МППР на композицию более простых) и оператор сопряжения элементов подмодели (в графическом виде задает причинно–следственные связи между элементами подмодели). В выражениях над операндами в системе используются арифметические и логические операции, операции генерации случайных значений переменных захватываемого / формируемого ресурса и длительности преобразования. Система позволяет описывать произвольный МППР, а также решать различные задачи анализа как для дискретных МППР, так и для непрерывных МППР. Данная система внедрена на ряде предприятий г. Екатеринбурга [157] и используется для решения задач организации и управления производства (в машиностроении и строительстве), а также в сферах торговли и образования.

Достоинства системы:

- явная ориентация на проблемную область МППР, включающая серьезную проработку описания ресурсов, средств, преобразователей, условий

запуска,

- встроенные средства описания целей агентов,
- возможность интеграции с БД разработанной модели благодаря использованию в системе СУБД MS SQL Server.

Недостатки системы:

- отсутствие встроенных реализаций методов взаимодействия агентов,
- отсутствие встроенного языка обмена сообщениями между агентами, разработанного для МППР на основе стандарта взаимодействия агентов,
- отсутствие встроенного механизма формирования коалиций,
- отсутствие встроенного механизма составления планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени,
- отсутствие возможности формирования UML–диаграмм последовательности действий при проведении моделирования,
- отсутствие возможности работы системы с внешними программными комплексами.

3) Система **MagentA Unified Interface** [57–62,150,153,154]. Система разработана компанией «MagentA Corporation Ltd» (г. Самара), под руководством П.О. Скобелева. В качестве методической основы для создания МАС в MagentA используется модель сети потребностей и возможностей (ПВ–сеть) [62]. Эта модель базируется на холистическом подходе, в рамках которого объект (например, предприятие) декомпозируется до уровня сети отдельных автономных «физических сущностей» (станки, транспортные средства, детали, материалы и т.д.), каждой из которых соответствуют собственные агенты потребностей и возможностей. Эти агенты функционируют автономно и взаимодействуют следующим образом: агенты возможностей ищут себе наиболее выгодное применение, а агенты потребностей стремятся максимально выгодно удовлетворить свои требования.

Основой системы является ядро MagentA Multi-Agent Engine [62], в котором реализованы универсальные базовые механизмы функционирования агентов: виртуальная параллельная машина, подсистема переговоров агентов и

ряд других подсистем. Логическая архитектура ядра содержит виртуальные и абстрактные миры предприятия, а также исполняющую систему Run Time, систему диалога и библиотеки расширений (см. рисунок 1.6). Для работы модели в системе необходимо создание **онтологии приложения** и **онтологии предметной области** [42].

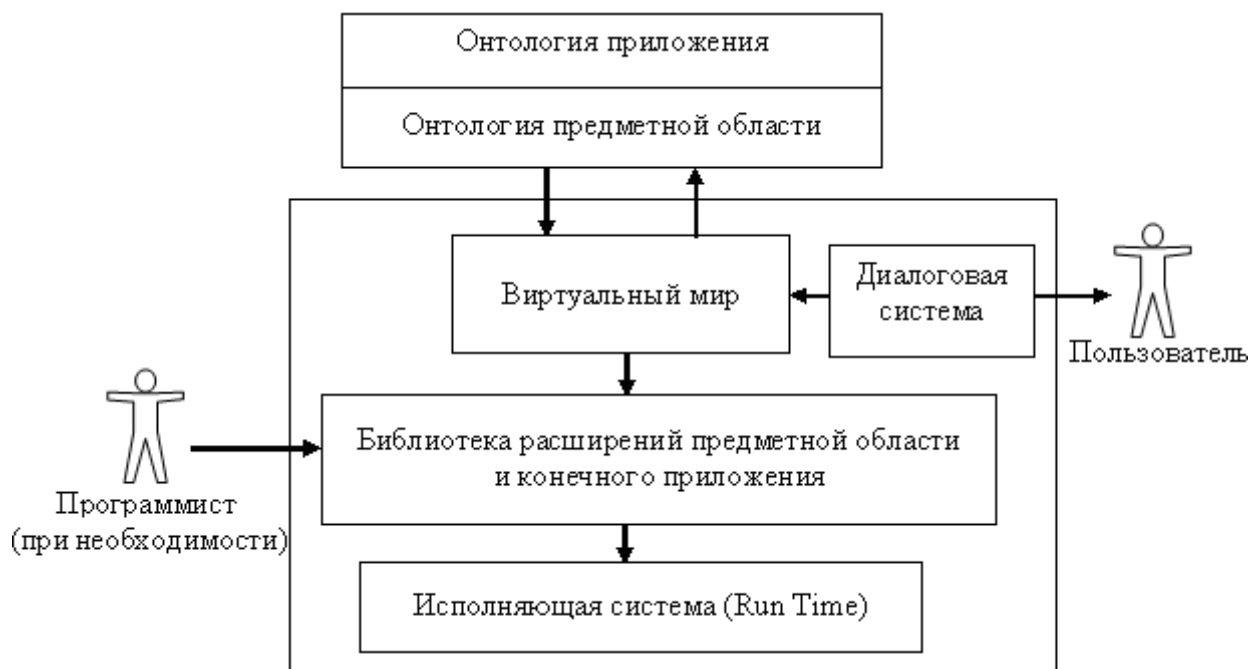


Рисунок 1.6 – Архитектура MagentA Multi-Agent Engine

Достоинства системы:

- возможность запуска модели в распределенном режиме в сети, обеспечивающей поддержку распределенного взаимодействия агентов;
- непрерывность процесса принятия и пересмотра решений агентами в модели позволяет адекватно реагировать на все возникающие события и изменения;
- механизм обмена сообщениями между агентами, соответствующий стандарту взаимодействия агентов KQML;
- простота реализации модели позволяет унифицировать агентов потребностей и возможностей;
- открытость для пользователя позволяет пополнять и изменять базу знаний и функциональные возможности «на ходу», без останова или перезапуска системы;

- все элементы интеллектуальных программных сетей являются автономными и самостоятельными, однако они способны за счет своих интеллектуальных возможностей динамически «договариваться» между собой в ходе своего функционирования в сети, устанавливая новые связи, что обеспечивает их способность к самоорганизации;

- возможность работы с онтологиями предметной области.

Недостатки системы:

- отсутствие возможности коалиционного объединения агентов для совместного выполнения заказов;

- отсутствие встроенного механизма составления планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени;

- отсутствие возможности формирования UML–диаграмм последовательности действий при проведении моделирования.

4) **Система RepastJ** [166]. Система RepastJ разработана в Аргонской Национальной Лаборатории США (штат Иллинойс). Основным назначением системы являются социальные исследования.

Достоинства системы:

- открытая система – возможность описания модели в любом текстовом редакторе или IDE (Java),

- система бесплатно распространяется по лицензии GNU LGPL,

- возможности описания агентов и создания мультиагентных моделей,

- развитые возможности 3D–визуализации для проведения эксперимента.

Недостатки системы:

- отсутствие встроенных библиотек сценариев взаимодействий агентов,

- отсутствие встроенного механизма составления планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени,

- отсутствие механизма взаимодействия агентов, основанного на одном из стандартов.

5) **Система Simplex3** [167]. Система Simplex3 разработана в университетах Нюрнберг–Эрланген и Пассау (Германия) под руководством профессора

Б. Шмидта. Система включает среду моделирования, язык описания моделей Model Deskription Language (MDL) и язык описания эксперимента Experiment Description Language (EDL).

Достоинства системы:

- наличие встроенного развитого языка описания моделей,
- возможность описания агентов и ППР,
- возможность построения графиков по результатам проведения экспериментов.

Недостатки системы:

- отсутствие встроенных библиотек сценариев взаимодействий агентов,
- отсутствие встроенного механизма составления планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени,
- отсутствие механизма взаимодействия агентов, основанного на одном из стандартов.

6). **Система Tecnomatix Plant Simulation** [168]. Система Tecnomatix Plant Simulation (TPS) разработана компанией Siemens. TPS позволяет моделировать и воспроизводить производственные системы и их технологические процессы и оптимизировать: материалопотоки, использование ресурсов и логистику на всех уровнях планирования производства. Система включает большой набор аналитических инструментов (анализ узких мест, статистические данные и графики).

Достоинства системы:

- возможность описания ППР,
- возможность моделирования альтернативных стратегий управления ППР,
- возможность проведения анализа «что, если»,
- ориентация на оптимизацию моделей по определенным критериям (например, стоимости),
- развитые возможности визуализации экспериментов (3D–модели),
- наличие инструментов анализа «узких мест» модели,

- возможность использования диаграмм Ганта и Сэнки.

Недостатки системы:

- отсутствие встроенных библиотек агентов,
- отсутствие встроенных библиотек сценариев взаимодействий агентов;
- отсутствие встроенного механизма составления планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени,
- отсутствие механизма взаимодействия агентов, основанного на одном из стандартов.

Подведем итоги сравнительного анализа систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций, и приведем их в таблице 1.4. Строки таблицы, выделенные цветом, определяют «нишу» системы, планируемой к разработке.

Таблица 1.4. Сравнительный анализ систем.

№	Параметр	AnyLogic	BPsim2	MagentA	RepastJ	Simplex3	TPS
1	Наличие средств проектирования концептуальной модели предметной области (онтологии)	-	+	+	-	+	+
2	Возможности при описании ППР						
2.1	Описание ресурсов, средств, преобразователей, условий запуска	+	+	+	+	+	+
2.2	Иерархическая модель процесса	+	+	+	+	+	+
3	Возможности при построении МАС						
3.1	Возможность описания агентов	+	+	+	+	+	+
3.2	Возможность описания коалиций	+	+	+	+	+	+
3.3	Возможность определения целей агента	+	+	+	+	+	+
3.4	Возможность формирования базы знаний агента						
3.4.1	- реляционного типа	+	+	+	+	+	+
3.4.2	- инфологического типа (на ограниченном естественном языке)	-	+	-	-	-	-
3.4.3	- сетевого типа (в виде онтологии)	-	-	+	-	-	-
3.5	Наличие языка обмена сообщениями между агентами						
3.5.1	- не соответствующего стандарту взаимодействия агентов	-	+	-	-	-	-
3.5.2	- соответствующего стандарту взаимодействия агентов	-	-	+	-	-	-
3.5.3	- разработанного для предметной области МППР на основе стандарта	-	-	-	-	-	-

№	Параметр	AnyLogic	BPsim2	MagentA	RepastJ	Simplex3	TPS
	взаимодействия агентов						
3.6	Наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени	-	-	-	-	-	-
3.7	Наличие встроенного механизма разрешения конфликтов						
3.7.1	- на основе использования стратегий взаимодействий	+	-	+	-	-	-
3.7.2	- на основе организации аукционов	-	-	-	-	-	-
3.8	Оптимизация на основе генетических алгоритмов	-	-	-	-	-	+
4	Возможности среды моделирования						
4.1	Импорт/экспорт из баз знаний агентов	+/-	+/+	+/-	+/-	+/-	+/-
4.2	Наличие встроенного механизма формирования коалиций в MAC	-	-	-	-	-	-
4.3	Возможность формирования UML-диаграммы последовательности действий при проведении моделирования	-	-	-	-	-	-
4.4	Возможность использования языка высокого уровня (ЯВУ)	+	-	-	+	+	-
4.5	Работа системы с внешними программными комплексами	+	-	-	+	-	-
4.6	Возможность изменения параметров модели во время эксперимента	+	+	+	+	+	+
4.7	Возможность 3D – визуализации моделей	+	-	-	+	-	+
4.8	Наличие встроенных библиотек различных видов агентов	+	-	-	+	-	-
5	Стоимость системы в тыс. у.е.	5	3	1,3	0	3	10

Вывод: Как следует из сравнительного анализа, понятийный аппарат рассмотренных систем близок к проблемной области мультиагентных систем, однако системы не имеют ряд возможностей, выделенных в таблице 1.4. В связи с этим необходима разработка новой системы.

На основании проведенного анализа можно определить основные особенности (нишу) новой системы, в дальнейшем называемой jSIM:

- наличие встроенного механизма формирования коалиций в MAC;
- наличие встроенного языка обмена сообщениями между агентами, разработанного для предметной области МППР на основе стандарта

взаимодействия агентов;

- наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени;
- наличие встроенного механизма разрешения конфликтов на основе организации аукционов;
- наличие возможности формирования UML–диаграммы последовательности действий при проведении моделирования.

Анализ показал, что система BPsim2 явно ориентирована на проблемную область МППР, включая серьезную проработку описания целей агентов и анализа динамики их достижения. Поэтому, в качестве основы для разработки новой системы jSIM, выбрана система BPsim2.

1.3.3 Критерии оценки эффективности работы систем

Под эффективностью системы будем понимать степень соизмерения результатов с затратами; систему показателей, характеризующую уровень использования системы [169]. В качестве основного свойства, определяющего эффективность системы, выберем **совокупность выполняемых функциональных операций**.

Одной из важнейших характеристик системы является набор функциональных операций (НФО) [169], который этой системой предоставляется. Т.к. набор таких операций достаточно большой, то целесообразно весь НФО разбить на отдельные классы. Тогда операции, входящие в каждый отдельный класс, образуют подкласс данного класса операций. Для количественной оценки эффективности НФО будем использовать критерий, определяемый следующим образом [169]:

$$Q_{нфо} = \prod_{i=1}^G \eta_i^{1-p_i}, \quad (1.1)$$

где: G – число перечисленных классов функциональных операций; p_i – показатель важности i -го класса, удовлетворяющий условию $0 < p_i < 1$ и определяемый как отношение весомости i -го класса на максимальную весомость среди всех классов;

η_i – оценка i -го класса функциональных операций, определяется по следующей формуле [169]:

$$\eta_i = \sum_{j=1}^{S^{(i)}} b_j^{(i)} \cdot q_j^{(i)}, \quad (1.2)$$

где: $S^{(i)}$ – число подклассов i -го класса; $q_j^{(i)}$ – весомость j -го подкласса i -го класса, принимающая различное значение для конкретной предметной области согласно формуле [169]:

$$\sum_{j=1}^{S^{(i)}} q_j^{(i)} = 1, \text{ и } 0 < q_j^{(i)} \leq 1, \quad (1.3)$$

где: $b_j^{(i)}$ – балльность j -го подкласса i -го класса, определяемая по балльной числовой шкале в интервале $[\beta_i, 1]$.

В формуле (1.3) β_i определяется по следующему правилу: если i -й класс для исследуемой предметной области является необходимым, то β_i принимает значение 0. Если он не является необходимым для исследуемой предметной области, то для определения β_i будем исходить из следующих предпосылок: если i -й класс не выполняется, то это приводит к ухудшению функционирования системы в целом, например, на α_i %. Тогда β_i определяется как коэффициент важности i -го класса по следующей формуле [169]:

$$\beta_i = (1 - \alpha_i / 100). \quad (1.4)$$

Данные критерии далее будем использовать при оценке эффективности применения системы jSIM на промышленных предприятиях.

1.4 Постановка практической задачи

В рамках настоящей работы поставлена практическая задача: разработка системы и модели оперативного распределения ресурсов и формирования коалиций и ее применение на промышленных предприятиях дивизиональной структуры управления при выполнении крупных заказов по производству тепловых пунктов (ТП). Система и модель планируются к использованию на

предприятия в режиме реального времени для оценки целесообразности взятия в работу новых заказов.

Разработку модели будем вести с ориентацией на использование на предприятиях с дивизиональной структурой управления продуктового типа. Данные структуры появилась впервые в 20–е годы XX века, и в настоящее время более 75% крупных фирм на западе строятся по дивизиональной модели управления. Эта структура применяется, когда предприятие нацелено на расширение ассортимента производимой продукции (например, на производство индивидуальных ТП, центральных ТП и блочных ТП). Данная структура используется большинством крупнейших производителей потребительских товаров. При этом в производственном звене выделяются автономные части (подразделения), связанные технологически с определенными товарами. Подразделения управляются руководителями, полностью ответственными за производство товаров и получение прибыли. У высшего руководства фирмы остается небольшое количество централизованных функциональных служб, обеспечивающих принятие решений на высшем уровне. Одно из основных преимуществ дивизиональной структуры связано с расширением границ самостоятельности подразделений, в связи с чем они начинают более эффективно искать и выполнять заказы, и в итоге повышать прибыль всего предприятия. Также данная структура удобна при территориальном распределении производственных подразделений – для развития региональных продаж предприятия. Схема дивизиональной структурой управления продуктового типа представлена на рисунке 1.7.

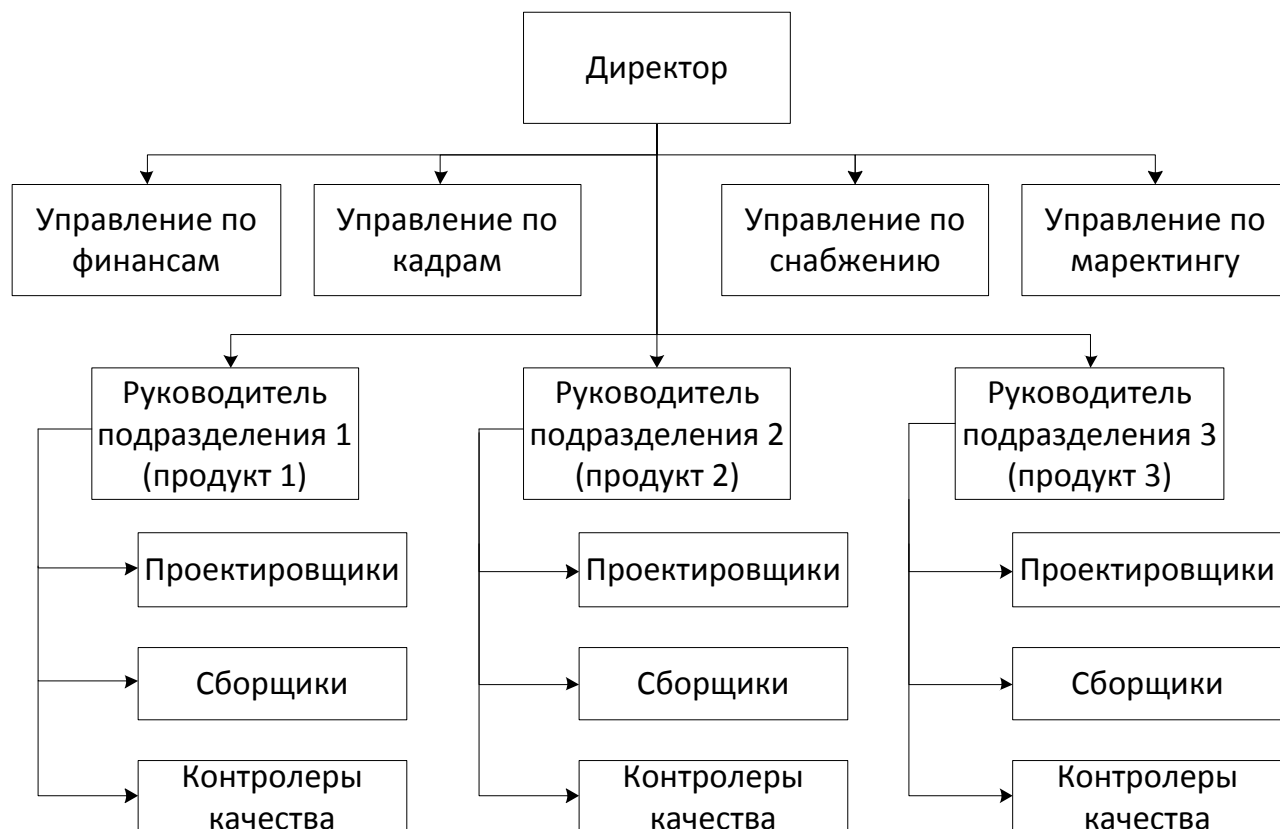


Рисунок 1.7 – Схема дивизиональной структурой управления продуктового типа

Для решения практической задачи, в рамках настоящей работы, считаем, что продукт 1 – индивидуальный ТП, продукт 2 – центральный ТП, продукт 3 – блочный ТП. При этом для производства всех продуктов требуется различное количество однотипных ресурсов (проектировщики, сборщики и контролеры качества) и средств (графические станции, станки по металлу). Опишем процесс решения данной задачи.

1. Руководители подразделений производят поиск заказов (функция продаж) и управляют их выполнением (функция управления производством), также ведут локальную бухгалтерию. Для каждого заказчика они производят расчет необходимой ему конфигурации ТП. При нахождении заказа руководитель подразделения должен оценить загруженность своих ресурсов и средств, и принять решение – готов ли он взять новый заказ (с определенным объемом работ и сроком выполнения).

Для этого руководители подразделений проводят имитацию перераспределения ресурсов и средств с целью составления нового плана

выполнения работ с учетом ограничений выполнения всех заказов по времени. В связи с тем, что на предприятии функционирует производство конвейерного типа из двух машин (средств), возможно составление оптимального плана (согласно теореме Джонсона). Для составления плана руководители подразделений используют заложенный в системе механизм.

2. При отсутствии необходимых для выполнения заказа ресурсов или средств имеется возможность провести моделирование переговоров с другими руководителями подразделений. В систему каждый руководитель подразделения закладывает:

- стратегию взаимодействия (в зависимости от загрузки его ресурсов, выполнения своих целевых показателей, а также личного решения; стратегия необходима для определения готовности вступления в коалицию для совместного использования ресурсов и средств);

- цену каждого ресурса и средства (для проведения аукционов).

Таким образом, в модели МАС проводится имитация переговоров. Результаты переговоров транслируются всем участникам для поддержки принятия их решений: они могут согласовать либо не согласовать эти результаты. При отсутствии согласования вопрос выносится на совместное решение руководителя подразделения и директора.

Результаты переговоров и формирования коалиций являются исходными данными для составления плана выполнения работ.

3. Руководитель подразделения формирует оптимальный план выполнения работ с учетом ограничений по времени (включающий работу по новому договору). В плане допустимы прерывания выполнения работ. Данный план утверждается директором. С заказчиком подписывается договор, в котором указывается срок выполнения работы и штрафные санкции за сдвиг сроков (процент от суммы договора). После этого производство начинает работать по новому плану (включающему работу по новому договору по производству ТП).

4. При поступлении нового заказа (работы) переформируется план выполнения работ данного агента–руководителя подразделения. При

возникновении обстоятельств, повлекших отклонение выполнения работы по времени от планового, текущий план пересчитывается и вводится в действие, начиная со следующего рабочего дня.

Рассмотрим практическую задачу, показывающую целесообразность применения коалиций на базе описанного процесса производства ТП на предприятии «Альтернативные энергосистемы».

В штатном режиме работы предприятия руководителя подразделений производят поиск заказов и управляют процессом их выполнения. Руководители подразделений конкурируют за ресурсы и средства, могут объединяться в коалиции. В таком режиме предприятие справляется с выполнением всех заказов в срок.

Пусть на отдельное подразделение предприятия в один день поступает крупный заказ на выполнение 15 однотипных изделий (например, в связи со строительством крупного района города Екатеринбурга – «Академический»). Для данного подразделения это большой заказ, **превышающий** его производственные мощности. В этом случае выполнение всех заказов в срок, выполняемых данным подразделением, находится под угрозой, и в связи с этим агент–директор ставит доминирующую цель для всех агентов–руководителей подразделений: «выполнить все заказы в срок (без штрафов) или с минимальными штрафами для предприятия в целом».

Известные методы и модели не дают гарантии, что будет обеспечено выполнение всех заказов одновременно и в срок (или с минимальным штрафом). Коалиция дает возможность агентам договориться и составить совместный план по использованию ресурсов и средств всех агентов–руководителей подразделений (дивизионов) для выполнения имеющихся заказов в срок (или с минимальными штрафами).

1.5 Постановка задачи по разработке системы распределения ресурсов и формирования коалиций

Для решения поставленной в работе задачи целесообразна разработка

системы моделирования процессов формирования коалиций.

Для разработки системы моделирования коалиций необходимо решить следующие задачи:

1. провести обзор методов и моделей, используемых в процессе принятия решений, методов взаимодействий агентов;
2. провести сравнительный анализ математических моделей мультиагентных ППР, программных средств моделирования мультиагентных ППР с точки зрения возможностей их использования для создания коалиционных моделей;
3. разработать коалиционную модель мультиагентного ППР;
4. разработать требования к проектированию системы распределения ресурсов и формирования коалиций;
5. разработать систему распределения ресурсов и формирования коалиций;
6. апробировать разработанную систему на примере задачи по производству ТП на промышленном предприятии.

Выводы по главе 1

1. Проведен обзор состояния в области систем мультиагентного моделирования. Определены понятия бизнес–процессов, процессов принятия решений и требования к ним. Изучена структура МППР, рассмотрены МППР в промышленном производстве.

2. Проведен сравнительный анализ архитектур агентов. Определено, что наиболее полно для решения задач проблемной области ППР подходит гибридная архитектура.

3. Проведен сравнительный анализа стандартов взаимодействия агентов. Благодаря централизованной архитектуре и возможности работы с онтологиями, выбран стандарт FIPA. Данный стандарт является универсальным и легко реализуемым в программных системах.

4. Рассмотрена типовая структура и основные функции систем мультиагентного моделирования. Рассмотрены примеры эффективного внедрения

систем распределения ресурсов и формирования коалиций.

5. Проведен сравнительный анализ наиболее распространенных программных систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций: AnyLogic 6, MagentA, BPsim2, RepastJ, Simplex3, Tecnomatix PlantSimulation. В результате проведения анализа сделан вывод о необходимости разработки новой системы *для моделирования ППР* с ориентацией на работу в МАС и возможностью составления оптимальных расписаний выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени для каждой из работ.

6. Определены критерии оценки эффективности работы систем распределения ресурсов и формирования коалиций.

7. Произведена постановка практической задачи по моделированию производства (сборки и строительства) тепловых пунктов.

8. Произведена постановка задачи по разработке системы распределения ресурсов и формирования коалиций.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КОАЛИЦИОННОЙ МОДЕЛИ

2.1 Требования к модели

Целью разработки коалиционной модели [2,3,7–9] является описание процессов формирования коалиций при планировании коллективного использования ресурсов и средств. Модель должна позволять составление оптимальных планов выполнения работ с учетом ограничений работ по времени, с использованием алгоритмов проведения аукционов. Модель должна отвечать следующим требованиям.

1) Ориентация на моделирование МППР. Необходимо отражение следующих основных особенностей МППР: ориентация на различные типы ресурсов и средств; учет возникновения и разрешения конфликтов; наличие возможности иерархического представления структуры процесса и расчета различных характеристик процесса на каждом уровне иерархии.

2) Использование средств описания агентов, основанных на модели гибридного агента и обеспечивающих следующие основные возможности: определение целей агента, описание базы знаний агента, выбор определенной стратегии взаимодействия агентов.

3) Наличие механизма формирования коалиций, обеспечивающего следующие основные возможности: определение целей коалиции, описание базы знаний коалиции.

4) Наличие механизма описания МАС, позволяющего определение: множества агентов и коалиций в МАС, множества установленных связей между агентами и коалициями, общей базы знаний МАС.

5) Наличие аппарата организации взаимодействий агентов и коалиций, включающего: язык общения агентов, соответствующий проблемной области МППР и разработанный на основе стандарта взаимодействия агентов; механизм обмена сообщениями между агентами и коалициями и множество методов взаимодействий агентов и коалиций в МАС.

6) Наличие механизма разрешения конфликтов между агентами, основанного на использовании стратегий взаимодействия агентов и организации аукционов.

7) Наличие механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени.

Для анализа аналогов и поиска модели, наиболее близко отвечающей установленным требованиям, проведем сравнительный анализ существующих моделей.

2.2 Сравнительный анализ существующих моделей

Для предметной области процессов преобразования ресурсов в настоящее время разработаны следующие математические модели: модель Б.И. Клебанова и И.М. Москалева [170, 171], модель открытой мультиагентной системы В.А. Виттиха и П.О. Скобелева [58, 62], модель И.П. Соловьева и Д.Ю. Бугайченко [172, 173], ситуационная модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой [157, 174], модель Ю.Г. Карпова и А.В. Борщева [175, 176]. Проведем сравнение с каждой из данных моделей.

Сравнение с моделью Б.И. Клебанова и И.М. Москалева

В работе Б.И. Клебанова и И.М. Москалева [170, 171] представлена математическая модель дискретного ППР, состоящая из следующих типов агентов : пассивных и активных преобразователей ресурсов, источников заявок и потребителей ресурсов, активных и пассивных парков средств производства и хранилищ ресурсов, В качестве средств могут выступать средства производства, люди и отдельные подразделения предприятия. Определены виды взаимодействий между агентами. Разработана математическая модель ППР на основе аппарата продукционных систем, учитывающая ограничения на ресурсы преобразования и целевые установки, как всего процесса, так и отдельных элементов в условиях конфликтов на ресурсах и средствах общего доступа. В рамках математической модели ППР определены: структура продукционной

системы ППР, типы правил преобразования, графы смены состояний элементов модели, учитывающие возникновение конфликтов. Показано, что разработанная математическая модель ППР является адекватным математическим описанием объекта моделирования, служит основой для построения алгоритмов и программ при машинной реализации модели. На основе предложенных математических моделей элементов ППР разработан набор базовых мета-классов для описания онтологии предметной области. Предложенный онтологический подход позволяет концептуально моделировать ППР путем последовательного анализа и структурирования имеющихся данных об объекте моделирования. Определен алгоритм генерации имитационной модели на основе онтологической модели предметной области. Определены алгоритмы планирования и динамической диспетчизации ППР в соответствии с заданными критериями эффективности. В моделях учтена возможность активного динамического перераспределения средств между различными процессами выполнения заказов.

Рассмотрим в общем случае смешанную модель ППР. В такой модели вершины графа X образуют: пассивные преобразователи, активные преобразователи, парки средств и хранилища ресурсов; а множество дуг представлено ресурсами и средствами.

Модель активных и пассивных ППР [171]:

$$G = \langle (AC \cup PC \cup SR \cup SM), (\overline{RF} \cup MF \cup IF), RES \rangle, \quad (2.1)$$

где: $AC = \{ac_i\}, i = \overline{1, N}$ – множество активных элементов модели ППР;

$PC = \{pc_i\}, i = \overline{1, N}$ – множество пассивных элементов модели ППР;

$SR = \{sr_k\}, k = \overline{1, K}$ – хранилища ресурса;

$SM = \{sm_l\}, l = \overline{1, L}$ – множество разделяемых парков средств;

$\overline{RF} = \{rf_{ij} = (x_i, y_j) \mid x_i \in AC \cup SR, y_j \in AC \cup PC \cup SR, x_i \neq y_j\}$ – множество возможных потоков ресурса между элементами модели;

$MF = \{mf_{ij} = (x_i, y_j) \mid x_i \in PC, y_j \in SM\}$ – множество потоков средств между элементами модели;

$IF = \{if_{ij} = (x_i, y_j) \mid x_i, y_j \in AC \cup SR \cup SM, x_i \neq y_j\}$ – множество информационных потоков между преобразователями, в рамках которых осуществляются переговоры и выбор поставщиков ресурсов и средств, объемы и сроки поставок;

$RES = \{res_i\}, i = \overline{1, R}$ – множество ресурсов циркулирующих в сети.

Выводы.

1. Достоинства модели:

- наличие возможности разрешения конфликтов между агентами в модели на общих ресурсах и средствах;
- наличие языка взаимодействия агентов в модели;
- модель позволяет работать с онтологиями предметной области.

2. Недостатки модели:

- агенты в модели описываются методами, основанными на продукционных системах;
- отсутствие встроенного механизма формирования коалиций;
- отсутствие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени;
- отсутствие встроенного механизма организации аукционов между агентами.

Сравнение с моделью открытой мультиагентной системы В.А. Виттиха и П.О. Скобелева

Открытая мультиагентная система (ОМАС) на основе **ПВ–сетей (сетей потребностей и возможностей)** В.А. Виттиха и П.О. Скобелева, представлена в работах [57–62]. Данная модель базируется на **холистическом подходе**, состоящем в следующем:

- модель ОМАС декомпозируется на автономные сущности (деталь, материал, работник, станок, автомобиль и т. д.);
- каждая сущность имеет собственных агентов потребностей и агентов возможностей;
- агенты возможностей ищут себе наиболее выгодное применение, а агенты

потребностей – максимально удовлетворить свои требования;

– потребности и возможности (например, заказы и ресурсы) находятся в постоянном поиске соответствия (**матчинга**), обусловленного заданными индивидуальными критериями для каждой из сторон.

В такой открытой системе агенты потребностей и возможностей реагируют на любые изменения в системе, разрывая имеющиеся и устанавливая новые связи. Систему распределения ресурсов и формирования коалиций в терминах модели ОМАС можно представить как систему, состоящую из агентов возможностей и потребностей, соревнующихся или кооперирующихся друг с другом (в зависимости от ситуации), с целью выполнения задачи.

Разработанный подход развивает теорию сложных социально – технических систем на основе фундаментальных работ К. Николиса, И. Пригожина, М. Минского, В.А. Виттиха [41–43,44,63] и др. Важнейшим результатом этой теории является осознание необходимости построения сложных систем с использованием моделей живых организмов, обладающих способностью к самоорганизации и эволюции. Основной особенностью подхода является **самоорганизация заказов и ресурсов**. Под **самоорганизацией** при этом понимается возможность системы автономно устанавливать новые связи между компонентами и разрывать существующие [58, 62].

Основой модели ОМАС – **порождающей ПВ–сетью** [58, 62] называется множество N вида:

$$N = \{A, R, P, G\}, \quad (2.2)$$

где: A – множество агентов потребностей и возможностей для заданной предметной области; R – множество возможных отношений между агентами потребностей и возможностей; P – множество правил принятия решений и установления (разрыва) связей; G – множество целей, заданных агентам.

Архитектура ОМАС для построения ПВ–сетей состоит из базы знаний предметной области, включающей набор **онтологий** [42] деятельности; сцены текущего виртуального мира; исполняющей системы; библиотеки расширений и интерфейсной системы [58, 62] (см. рисунок 2.1).

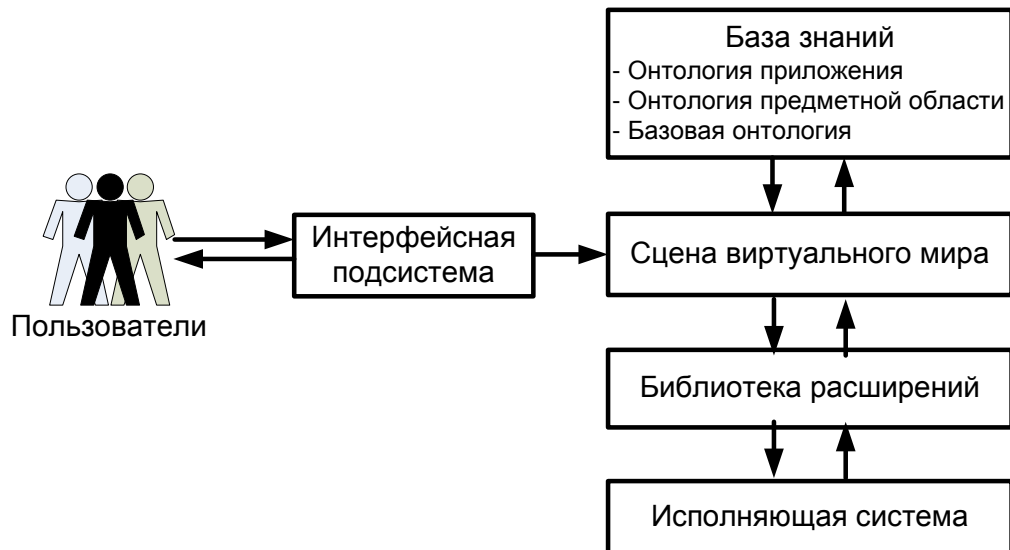


Рисунок 2.1 – Общая архитектура ОМАС

Базовыми компонентами агентов в ПВ–сетях являются [58,62]:

1. матчинговый процессор – позволяет агентам устанавливать связи между собой и проверять условия допустимости решения;
2. машина принятия решений – строит таблицы допустимых решений и в соответствии с критериями выбирает наилучшее решение;
3. блок работы с онтологиями – позволяет агенту вести поиск по онтологии;
4. потоковый вычислитель – позволяет проводить расчеты атрибутов агентов.

Основное отличие от коалиционной модели: в ПВ–сети есть более детальные агенты – до уровня отдельных заказов, ресурсов и операций, в отличие от коалиционной модели, где агент является исключительно моделью ЛПР. В связи с этим, разработанная модель на базе ПВ–сетей позволяет проводить моделирование на оперативном уровне, в отличие от коалиционной модели, нацеленной на более стратегический – на уровень общей загрузки мощностей предприятия.

Выводы.

1. Достоинства модели:

- простота реализации мультиагентной модели, позволившей унифицировать агентов потребностей и возможностей;
- непрерывный процесс принятия и пересмотра решений агентами,

позволяющий системе гибко реагировать на любые события;

- агенты в модели обладают способностью самоорганизации;
- модель позволяет работать с онтологиями предметной области.

2. Недостатки модели:

– В ПВ–сети ресурс «договаривается» с потребителями. Отсутствует обмен информацией между агентами потребностей – владельцами ресурсов. Рассмотрим пример: пусть на отдельное подразделение предприятия поступает большой заказ, который превышает по объему ресурсы ПВ–сети. В этом случае ПВ–сеть не дает гарантии, что произойдет выполнение всего заказа в срок. В то время как Коалиция дает возможность агентам договориться – составить совместный план действий по использованию общих ресурсов и средств для синхронного запуска работ и выполнения заказа в срок.

– В ПВ–сети есть агенты на уровне отдельных заказов, ресурсов и операций что позволяет моделировать тактический (оперативный) уровень работы предприятия, но отсутствует возможность моделирования стратегического уровня – загрузки мощностей предприятия в целом.

– В ПВ–сети потребности и возможности разорваны, т.е. нет подчинения между ресурсами и руководителями.

– Отсутствие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени.

Таким образом, рассмотренная модель не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к коалиционной модели МППР.

Сравнение с ситуационной моделью МППР К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой

В работах К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой [157,160–165,174] представлена ситуационная модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов. Определена следующая структура системы ППР:

$$PS = \langle Rps, Bps, Ips \rangle, \quad (2.3)$$

где: $Rps = \{RES(t)\} \cup \{MECH(t)\} \cup \{Order(t)\} \cup \{Sig(t)\} \cup \{Message(t)\} \cup \{U(t)\} \cup \{G(t)\}$ –

текущее состояние ресурсов, средств, заявок, сигналов, сообщений, команд управления, целей (рабочая память);

Bps – множество правил преобразования ресурсов и действий агентов (база знаний);

Ips – машина вывода, состоящая из планировщика и машины логического вывода по базе знаний агентов).

Также подробно рассмотрена обобщенная форма правил преобразования и машина логического вывода. Ситуационная модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов [157] наиболее полно описывает МППР. В рамках математической модели МППР определены структура системы МППР, типы правил преобразования и смены состояний.

Вывод. Рассмотренная модель полностью ориентирована на описание МППР, но не обеспечивает всех требований для работы МППР в коалиционной модели.

Сравнение с моделью И.П. Соловьева и Д.Ю. Бугайченко

Одной из моделей, позволяющих описывать МППР, является модель И.П. Соловьева и Д.Ю. Бугайченко [172, 173]. В модели описываются цели агента, механизмы формирования базы знаний агента. Для описания агента в модели предложена следующая архитектура. Внешняя среда агента описывается с помощью множества S –состояний среды. Возможные действия агента описываются с помощью множества A –действий. Таким образом, агента можно представить в виде функции: $S \rightarrow A$.

Выбор конкретного действия из множества возможных агент осуществляет на основании текущего состояния внешней среды, а также истории, описывающей предыдущие состояния. При этом действия агента могут влиять на окружающую среду, но не контролировать ее полностью. Взаимодействие агента и внешней среды можно представлять с помощью истории (*history*), которая является упорядоченной последовательностью пар состояние–действие [172, 173]:

$$h: s_0(a_0) \rightarrow s_1(a_1) \rightarrow s_2(a_2) \rightarrow \dots \quad (2.4)$$

где: s_0 – начальное состояние внешней среды; a_i – i -е действие, выбранное агентом; s_i – состояние внешней среды после осуществления агентом $(i-1)$ -го действия.

Для описания агента используется модель восприятия окружающей среды. Для этого введено множество P возможных восприятий и функция $see: S \rightarrow P$, описывающие, каким образом определенные состояния среды воспринимаются агентом. В этом случае агент описывается с помощью функции $action: P^* \rightarrow A$, т.е. действие агента определяется текущим восприятием состояния внешней среды, а также множеством предыдущих восприятий.

Еще одной модификацией абстрактной архитектуры Д.Ю. Бугайченко является агент с состоянием [172, 173]. Такой агент содержит внутренние структуры данных (что естественно для любой информационной системы), которые он модифицирует в зависимости от восприятия текущего состояния внешней среды, и на основе полученных результатов выбирает действие. Для формализации этого процесса введено множество I внутренних состояний агента и функция $refine: I \times P \rightarrow I$, отвечающая за обновление внутреннего состояния в соответствии с текущим восприятием среды. Агент же в этом случае будет описываться с помощью функции $action: I \rightarrow A$, т. е. действие будет выбираться на основе текущего внутреннего состояния.

Преимущество модели агента с состоянием заключается в удобстве ее практической реализации. Состояние позволяет основывать выбор действия не на последовательности входных данных, а на одном конкретном элементе состояния. Чаще всего вся история агента и не нужна для принятия конкретного решения, а достаточно лишь какой-то полученной из нее конкретной информации. Данная абстрактная архитектура обладает одним существенным недостатком: определенный таким образом агент не получает информации о совершенных им самим действиях, что резко ограничивает его возможности в накоплении опыта и анализе потенциальных последствий действий [172, 173].

Д.Ю. Бугайченко предложил включение информации о совершаемых действиях явно во входные данные функции выбора действия $action: (P \times A)^* \rightarrow$

А. В таком виде агент явно получает информацию о всей истории взаимодействия с окружающей средой, а не только о последовательности состояний, в которые окружающая среда переходила [172, 173].

Вывод. Рассмотренная модель представляет методологический интерес, но в то же время является слишком общей и требует детальной проработки при описании сложных МППР. В данной модели не введены основные понятия для описания коалиционной модели МППР, нет встроенного механизма формирования коалиций, языка обмена сообщениями между активными объектами (разработанного для МППР на основе стандарта взаимодействия агентов), механизмов разрешения конфликтов между активными объектами. В итоге можно сделать вывод, что понятийный аппарат модели Д.Ю. Бугайченко не соответствует требованиям коалиционной модели МППР.

Сравнительный анализ данных моделей по критериям их ориентации на описание ППР и описание агентов представлен в таблице 2.1. Строки таблицы, выделенные цветом, определяют «нишу» модели, планируемой к разработке.

Таблица 2.1. Сравнительный анализ существующих математических моделей

№	Критерии	Модель управления ППР (Б.И. Клебанова и И.М. Москалева)	Модель открытой МАС (В.А. Виттиха и П.О. Скобелева)	Модель мультиагентного процесса (И.П. Соловьева и Д.Ю. Бугайченко)	Ситуационная модель МППР (К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой)	Модель А.В. Борщева и Ю.Г. Карпова
1	Ориентация модели на описание ППР					
1.1	Наличие ресурсов, средств, преобразователей, условий запуска	+	+	+	+	+
1.2	Иерархическая модель процесса	+	+	+	+	+
1.3	Наличие механизма составления расписания	+	+	-	-	+
2	Ориентация модели на описание МАС					
2.1	Возможность описания агентов	+	+	+	+	+
2.2	Возможность описания коалиций	+	+	+	+	+
2.2.1	Наличие встроенного механизма формирования коалиций	-	-	-	-	-
2.3	Возможность определения целей агента	+	+	+	+	+
2.4	Возможность формирования базы знаний агента					
2.4.1	- реляционного типа	+	+	+	+	+
2.4.2	- инфологического типа (на ограниченном естественном языке)	-	-	-	+	-
2.4.3	- сетевого типа (в виде онтологии)	+	+	-	-	-
2.5	Наличие языка обмена сообщениями между агентами					
2.5.1	- не соответствующего стандарту взаимодействия агентов	+	-	-	+	-
2.5.2	- соответствующего стандарту взаимодействия агентов	-	+	-	-	-
2.5.3	- разработанного для предметной области МППР на основе стандарта взаимодействия агентов	-	-	-	-	-
2.6	Наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени	-	-	-	-	-
2.7	Наличие встроенного механизма разрешения конфликтов					
2.7.1	- на основе использования стратегий взаимодействия	+	+	-	+	+
2.7.2	- на основе организации аукционов	-	-	-	-	-

Вывод по разделу: Из проведенного сравнительного анализа следует, что все рассмотренные модели позволяют описывать: структурные элементы ППР, агентов, их базы знаний агентов и цели. Во всех математических моделях отсутствуют: возможность описания и механизм формирования коалиций агентов; язык обмена сообщениями между агентами, разработанный для предметной области МППР на основе стандарта взаимодействия агентов; встроенный механизм формирования оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени; встроенные методы разрешения конфликтов между агентами (основанные на использовании стратегий взаимодействия и организации аукционов).

Таким образом, рассмотренные модели не обеспечивают всех требований для коалиционной модели МППР. Необходима разработка Коалиционной модели МППР, включающей ряд параметров, определяющих нишу ее применения.

2.3 Разработка коалиционной модели

В коалиционной модели функционируют процессы, представленные на рисунке 2.2, это процессы:

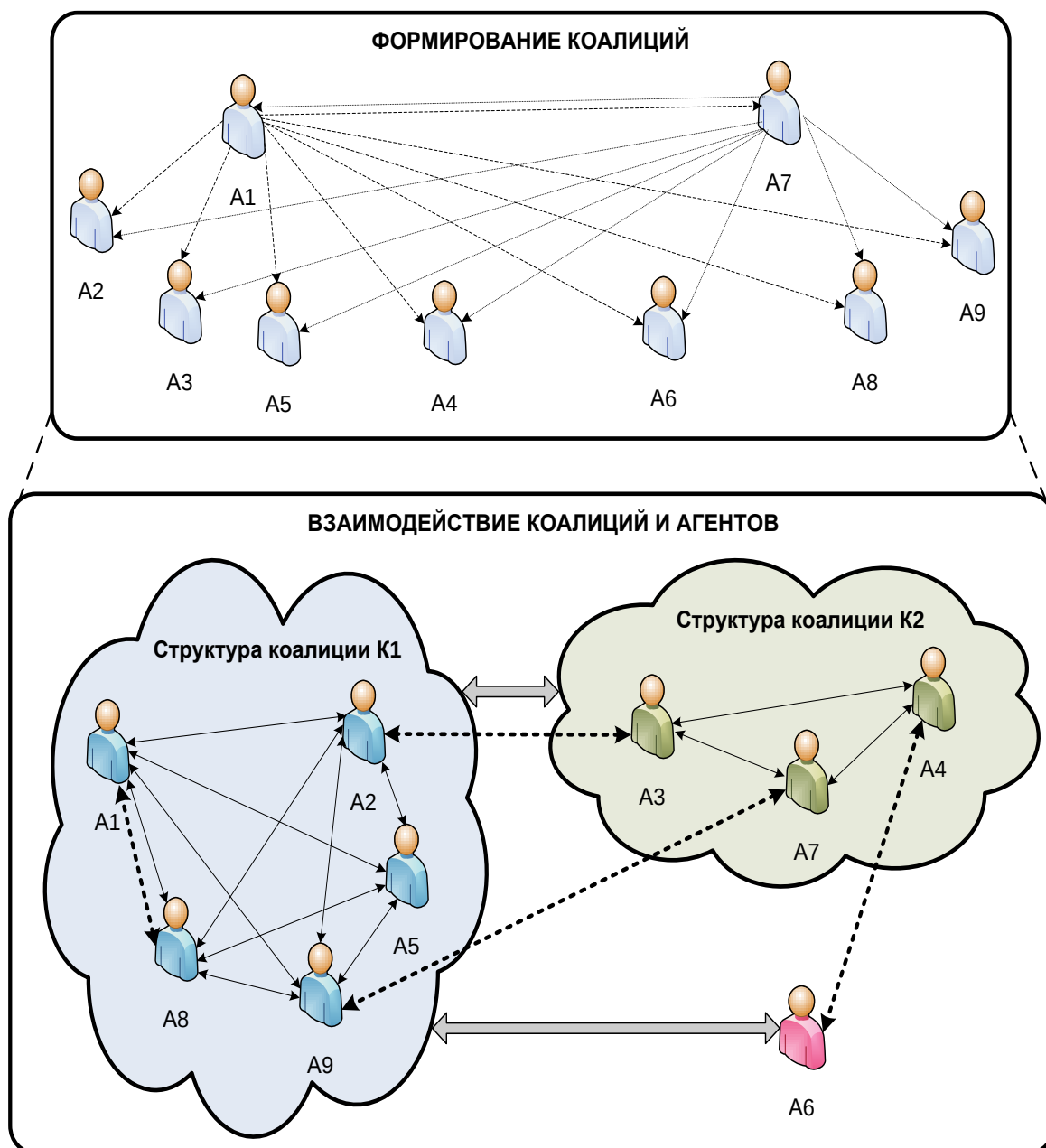
1. формирования коалиций (инициируемые агентами для взаимовыгодного сотрудничества, усиления конкурентоспособности при разрешении конфликтных ситуаций);

2. взаимодействия агентов внутри коалиции, направленные на достижение их общей цели (включающие следующие основные процессы: формирования совместных решений агентов по определенным методам, составления оптимальных планов выполнения работ коалицией с учетом ограничений по времени (план использует общие ресурсы и средства коалиции));

3. взаимодействия коалиций между собой и с отдельными агентами (возникающие на основании использования определенных стратегий поведения агентов и коалиций, по определенным методам взаимодействий);

4. взаимодействия агентов, направленные на достижение их второстепенных целей (возникающие на основании использования определенных

стратегий поведения агентов).



Условные обозначения:

- ←-----→ Процессы формирования коалиции K1
- ←-----→ Процессы формирования коалиции K2
- ←-----→ Процессы взаимодействия агентов внутри коалиции (направленные на достижение их доминирующей цели)
- ↔ Процессы взаимодействия коалиций между собой и с отдельными агентами
- ←-----→ Процессы взаимодействия агентов разных коалиций между собой и с отдельными агентами (направленные на достижение их второстепенных целей)

Рисунок 2.2 – Схемы процессов в коалиционной модели МППР

На основе проведенного анализа существующих математических моделей в п. 2.2 настоящей работы, можно сделать вывод о целесообразности использования

в качестве методической основы для разработки новой «коалиционной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов» – «ситуационной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов» К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой [157, 174]. Ситуационная модель МППР включает следующие основные объекты: ресурсы (RES), команды управления (U), средства ($MECH$), процессы (PR), источники ($Sender$) и приемники ресурсов ($Receiver$), условия запуска операций (Ca). Все ППР функционируют под управлением агентов (A), имеющих базу знаний (KB_A) и множество целей ($\{G_{A1}, \dots, G_{An}\}$).

Для реализации **коалиционной модели МППР** необходимо дополнить **ситуационную модель МППР** следующими объектами ($\{Obj_1, \dots, Obj_u\}$): коалиция (K), база знаний коалиции (KB_K), цель коалиции (G_K), общая база знаний MAC (GKB), жизненный цикл агента (L_A) и коалиции (L_K), действие агента (D_A) и коалиции (D_K), план действий агента (PD_A) и коалиции (PD_K), работа агента (W_A) и коалиции (W_K), план выполнения работ агента (PW_A) и коалиции (PW_K). В коалиционной модели МППР необходимо функционирование следующих механизмов: обмена сообщениями между агентами и коалициями, формирования коалиций, формирования оптимальных планов выполнения работ с учетом ограничений по времени, проведения аукционов.

Механизм обмена сообщениями между агентами и коалициями включает объект «сообщение» (Msg) и использует язык обмена сообщениями, разработанный для МППР на основе стандарта взаимодействия агентов. Для реализации механизма обмена сообщениями в математическую модель МППР необходимо включение следующих объектов: стратегий взаимодействия агента (Str_A) и коалиции (Str_K), методов взаимодействия агентов (Q_A) и коалиций (Q_K). В математической модели любой агент в конкретный момент времени может состоять только в одной коалиции, либо не состоять ни в одной.

Таким образом, коалиционной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов M соответствует структура, включающая расширенное множество объектов $\{Obj_1, \dots, Obj_m\}$, ориентированных на взаимодействие коалиций и отдельных агентов:

$$M = \langle Name_M, Desc_M, \{Obj_1, \dots, Obj_m\}, t_M \rangle \quad (2.5)$$

где: $Name_M$ – имя модели; $Desc_M$ – описание модели; $\{Obj_1, \dots, Obj_n\}$ – объекты (элементы модели): агенты, коалиции, ресурсы, средства, сообщения, цели, стратегии, работы, планы выполнения работ, t_M – время в модели.

Для описания коалиционной модели МППР определены следующие основные понятия. Мультиагентная система имеет следующую структуру:

$$MAS = \langle \{A_1, \dots, A_k\}, PW_A, \{K_1, \dots, K_a\}, PW_K, GKB, t_{MAS} \rangle \quad (2.6)$$

где: $\{A_1, \dots, A_k\}$ – множество агентов в MAC; $\{K_1, \dots, K_a\}$ – множество коалиций в MAC; GKB – общая база знаний MAC; PW_A – план выполнения работ агента; PW_K – план выполнения работ коалиции, t_{MAS} – время в мультиагентной системе.

Каждая коалиция K_i и каждый агент A_j имеют возможность обращаться к своим базам знаний KB_{K_i} и KB_{A_j} , получая необходимую информацию. Хранилищем информации, доступным для всех коалиций и агентов MAC, является общая база знаний GKB (General Knowledge Base). В ней хранится описание параметров всех МППР, функционирующих в данной модели; методы разрешения конфликтов $\{Q_1, \dots, Q_s\}$ между агентами и коалициями и алгоритмы стратегий поведения $\{Str_1, \dots, Str_v\}$ агентов и коалиций. Схема получения и записи информации агентами и коалициями в MAC представлена на рисунке 2.3.

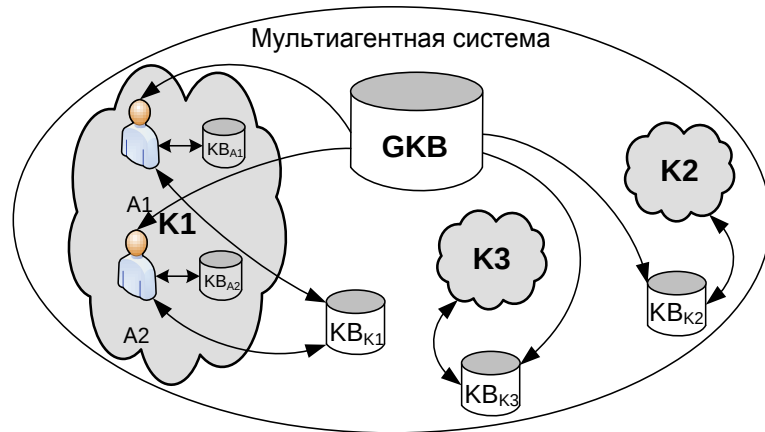


Рисунок 2.3 – Схема получения и записи информации агентами и коалициями

Агенты в коалиционной модели МППР представлены в виде следующей структуры:

$$A = \langle Name_A, \{G_{A1}, \dots, G_{An}\}, KB_A, \{Str_{A1}, \dots, Str_{Av}\} \rangle \quad (2.7)$$

где: $Name_A$ – имя агента; $\{G_{A1}, \dots, G_{An}\}$ – цели агента; KB_A – база знаний агента

(knowledge base); $\{Str_{A1}, \dots, Str_{Av}\}$ – множество допустимых стратегий взаимодействий агента.

Каждый агент A_i в МАС имеет собственную базу знаний KB_{Ai} , в которой хранятся: текущие стратегии поведения $\{Str^1_{Ai}, \dots, Str^v_{Ai}\}$ с конкретными агентами МАС, данные по использованию собственных ресурсов агента $\{Res^1_{Ai}, \dots, Res^m_{Ai}\}$ и собственных средств $\{Mech^1_{Ai}, \dots, Mech^k_{Ai}\}$, план действий агента PD_{Ai} , план выполнения работ агента PW_{Ai} .

Каждый агент A_i в МАС имеет множество целей $\{G^1_{Ai}, \dots, G^n_{Ai}\}$, хранящихся в его базе знаний KB_{Ai} , включающих одну доминирующую цель G^D_{Ai} и множество второстепенных целей $\{G^1_{Ai}, \dots, G^h_{Ai}\}$. При достижении доминирующей цели G^D_{Ai} агента A_i , либо ее изменении, связанным с изменением состояния окружающей среды (освобождения или захвата другими агентами МАС $\{A_1, \dots, A_j\}$ определенных ресурсов $\{Res_1, \dots, Res_m\}$ или средств $\{Mech_1, \dots, Mech_k\}$, действий других агентов $\{D^1_{A1}, \dots, D^t_{Aj}\}$, состояния функционирующего процесса PR), новой доминирующей целью агента A_i становится цель из множества его второстепенных целей $\{G^1_{Ai}, \dots, G^h_{Ai}\}$.

Агент A_i выбирает стратегию взаимодействия Str^{Aj}_{Ai} (из множества допустимых стратегий $\{Str_1, \dots, Str_v\}$) с другим агентом A_j для достижения определенной цели из множества целей $\{G^1_{Ai}, \dots, G^h_{Ai}\}$. Разрешение конфликтов между агентами происходит по определенным методам $\{Q_1, \dots, Q_s\}$, основанным на использовании стратегий поведения агентов или организации аукционов.

Каждый агент A_i в МАС управляет собственными ресурсами $\{Res^1_{Ai}, \dots, Res^m_{Ai}\}$ и собственными средствами $\{Mech^1_{Ai}, \dots, Mech^k_{Ai}\}$. Управление организуется с помощью формирования плана действий PD_{Ai} агентом A_i в процессе его жизненного цикла L_{Ai} на основе использования информации из собственной базы знаний KB_{Ai} и общей базы знаний GKB . Жизненному циклу L_A соответствует весь период активности агента в МАС от его определения до прекращения его функционирования.

В процессе работы МАС агенты $\{A_1, \dots, A_k\}$ могут взаимодействовать друг с другом, формировать коалиции $\{K_1, \dots, K_a\}$ с целями организации

взаимовыгодного сотрудничества, увеличения шансов получения необходимых ресурсов и средств при возникновении конфликтов.

Коалиция агентов в МАС имеет следующую структуру:

$$K = \langle Name_K, \{A_1, \dots, A_m\}, G_K, \{Str_1, \dots, Str_v\}, KB_K, t_{WAi} \rangle \quad (2.8)$$

где: $Name_K$ – имя коалиции; $\{A_1, \dots, A_m\}$ – множество агентов, входящих в коалицию; G_K – цель коалиции; $\{Str_1, \dots, Str_v\}$ – множество допустимых стратегий поведения коалиции; KB_K – база знаний коалиции; t_{WAi} – время выполнения работы агента–инициатора коалиции.

Каждая коалиция K_i в МАС имеет базу знаний KB_{Ki} , в которой хранятся: текущие стратегии поведения коалиции $\{Str^1_{Ki}, \dots, Str^v_{Ki}\}$ с другими коалициями и агентами МАС, данные по использованию общих ресурсов коалиции $\{Res^1_{Ki}, \dots, Res^l_{Ki}\}$ и общих средств $\{Mech^1_{Ki}, \dots, Mech^f_{Ki}\}$, план действий коалиции PD_{Ki} , план выполнения работ коалиции PW_{Ki} .

Формирование коалиции K_i может быть инициировано любым из агентов A_i в МАС. При этом его доминирующая цель G^D_{Ai} становится целью коалиции G_{Ki} . В случае, если агент A_j , из множества агентов МАС $\{A_1, \dots, A_n\}$, имеет доминирующую цель G^D_{Aj} , совпадающую с целью коалиции G_{Ki} , он может согласиться с предложением агента A_i вступить в коалицию K_i . При изменении доминирующей цели G^D_{Aj} агента A_j , он выходит из коалиции K_i . При достижении цели G_{Ki} коалиции K_i , данная коалиция прекращает свое существование в МАС.

При изменении доминирующей цели G^D_{Aj} агента A_j , связанным с ее достижением либо изменением состояния окружающей среды (освобождения или захвата другими коалициями МАС $\{K_1, \dots, K_l\}$ определенных ресурсов $\{Res_1, \dots, Res_u\}$ или средств $\{Mech_1, \dots, Mech_y\}$, действий других коалиций $\{D^1_{Kl}, \dots, D^r_{Kl}\}$, состояния функционирующего процесса PR), он выходит из коалиции K_p . При достижении цели G_{Kp} коалиции K_p , данная коалиция прекращает свое существование в МАС.

Для удобства описания введем понятие активных объектов $\{O_1, \dots, O_k\}$ в МАС, включающее агентов $\{A_1, \dots, A_g\}$ и коалиций $\{K_1, \dots, K_f\}$. Будем считать, что все активные объекты $\{O_1, \dots, O_k\}$ модели M могут запускать отдельные действия

$\{D_1^i, \dots, D_h^i\}$ и управлять ими. Схема действий активных объектов в коалиционной модели МППР представлена на рисунке 2.4.

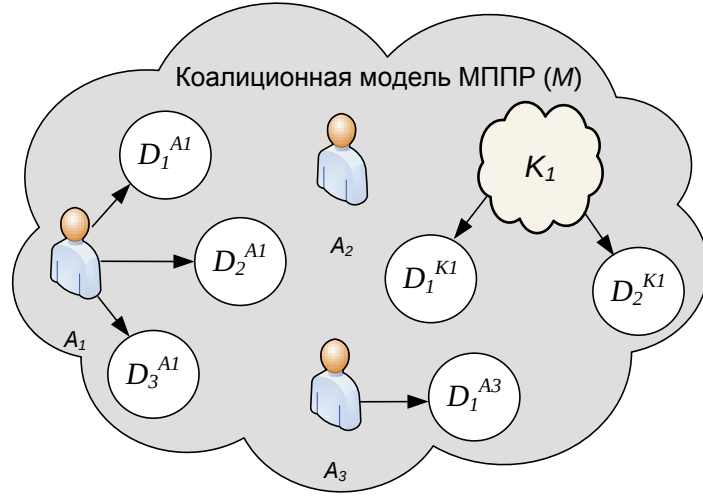


Рисунок 2.4 – Схема действий активных объектов в коалиционной модели МППР

Для коалиций $\{K_1, \dots, K_n\}$ и отдельных агентов $\{A_1, \dots, A_m\}$ необходимо составление планов действий $\{PD_{K1}, \dots, PD_{Kn}\}$ и $\{PD_{A1}, \dots, PD_{An}\}$ соответственно, определяющих последовательность запуска действий $\{D_1^i, \dots, D_p^i\}$ в работе W_i . Плану действий PD_A агента A соответствует следующая структура:

$$PD_A = \langle \{D_{A1}, \dots, D_{At}\}, \{G_{A1}, \dots, G_{At}\}, KB_A, t_{PDA} \rangle \quad (2.9)$$

где: $\{D_{A1}, \dots, D_{At}\}$ – действия агента; $\{G_{A1}, \dots, G_{At}\}$ – цели действий агента, t_{PDA} – срок выполнения плана действий агента.

Плану действий PD_K коалиции K соответствует следующая структура:

$$PD_K = \langle \{D_{K1}, \dots, D_{Kp}\}, G_K, KB_K, \{AD_1, \dots, AD_h\}, t_{PDK} \rangle \quad (2.10)$$

где: $\{D_{K1}, \dots, D_{Kp}\}$ – действия коалиции; $\{AD_1, \dots, AD_h\}$ – множество агентов коалиции K , участвующих в данном плане действий, t_{PDK} – срок выполнения плана действий коалиции.

Каждая работа W_K (W_A) коалиции K (агента A) включает определенный набор действий $\{D_1^K, \dots, D_p^K\}$ ($\{D_1^A, \dots, D_p^A\}$) и подразумевает использование ресурсов $\{Res_{K1}, \dots, Res_{Kn}\}$ ($\{Res_{A1}, \dots, Res_{Am}\}$) и средств $\{Mech_{K1}, \dots, Mech_{Kn}\}$ ($\{Mech_{A1}, \dots, Mech_{Am}\}$). Под работой W_K коалиции K будем понимать следующую структуру:

$$W_K = \langle t_{WK}, \{D_1^K, \dots, D_p^K\}, \{Res_{K1}, \dots, Res_{Km}\}, \{Mech_{K1}, \dots, Mech_{Kk}\} \rangle, \quad (2.11)$$

где: t_{WK} – время выполнения работы; $\{D_{K1}^K, \dots, D_{Kp}^K\}$ – действия по выполнению работы; $\{Res_{K1}, \dots, Res_{Km}\}$ – ресурсы, используемые в работе; $\{Mech_{K1}, \dots, Mech_{Ks}\}$ – средства, используемые в работе.

План выполнения работ PW_K (PW_A) формируется коалицией K (агентом A) для достижения цели G_K^i (G_A^i) и состоит из определенной последовательности работ $\{W_{K1}, \dots, W_{Kt}\}$ ($\{W_{A1}, \dots, W_{At}\}$). Плану выполнения работ PW_A агента A соответствует следующая структура:

$$PW_A = \langle \{W_{A1}, \dots, W_{At}\}, G_A^i, KB_A, GKB, \{AD_1, \dots, AD_h\}, t_{PWA} \rangle, \quad (2.12)$$

где: $\{W_{A1}, \dots, W_{At}\}$ – работы плана; G_A^i – цель плана; $\{AD_1, \dots, AD_h\}$ – множество агентов, участвующих в плане; t_{PWA} – срок выполнения плана работ агента.

Плану выполнения работ PW_K коалиции K соответствует следующая структура:

$$PW_K = \langle \{W_{K1}, \dots, W_{Kt}\}, G_K^i, KB_K, GKB, \{AD_1, \dots, AD_h\}, t_{PWK} \rangle, \quad (2.13)$$

где: $\{W_{K1}, \dots, W_{Kt}\}$ – работы плана; G_K^i – цель плана; $\{AD_1, \dots, AD_h\}$ – множество агентов, участвующих в плане; t_{PWK} – срок выполнения плана работ коалиции.

Таким образом, по результатам сравнения существующих математических моделей, ориентированных на описание МППР (таблица 2.1), **выявлена ниша для коалиционной модели мультиагентного процесса преобразования ресурсов**. Для анализа адекватности разработанной модели необходимо проведение ее сравнения с существующими аналогами.

2.4 Анализ существующих методов и решение задачи разрешения конфликтов

2.4.1 Метод разрешения конфликтов по стратегиям взаимодействий агентов

Коллективное поведение агентов в МАС предполагает возникновение конфликтов следующих основных типов [89]:

1. при коллективном принятии решения;
2. в связи с естественной ограниченностью ресурсов и средств.

Первый тип сводится ко второму в случае понимания под понятием «решение» понятия «ресурса», поэтому далее будем подробно рассматривать

второй тип. Одним из простых способов разрешения конфликтов является право сильного – сильный агент отбирает ресурсы у слабых. Более сложные способы разрешения конфликтных ситуаций – переговоры между агентами, направленные на достижение компромиссов [89].

Рассмотрим проблемную область конфликтов на общих ресурсах (второй тип) более подробно. Наиболее ярко конфликт на общих ресурсах и средствах возникает при индивидуальном соперничестве агентов, которое характеризуется отсутствием общих целей, потребности в чужом опыте, необходимости совместного использования ресурсов. Это классический вариант конфликтной ситуации, когда каждый агент хочет монополизировать имеющиеся ресурсы.

В случае соперничества, агентам, имеющим различные индивидуальные цели, но недостаточный опыт для их достижения, приходится объединяться в коалиции. При этом сначала происходит формирование групп агентов, а затем начинается соперничество между этими группами за общие ресурсы и средства. Ситуация, комбинирующая коллективное соперничество и индивидуальные конфликты представляет собой наиболее продуктивный случай конфликтной ситуации с точки зрения функционирования МАС, поскольку конкурирующие группы способствуют ликвидации монополий и расширению рынка.

Конфликты между агентами могут разрешаться различными способами, в зависимости от нацеленности (стратегии) агентов на определенный вид взаимодействия. К базовым видам стратегий (их можно классифицировать в терминах отношения к удовлетворению собственных требований агента и требований агента–оппонента) относятся [34]:

- 1) кооперация (сотрудничество) – основная форма взаимодействия между агентами, характеризующаяся объединением их действий, ресурсов и средств для достижения совместной цели, при разделении между ними функций [12];
- 2) конкуренция;
- 3) компромисс (важно удовлетворение как собственных требований, так и требований оппонента);
- 4) конформизм (отказ от своих требований в пользу оппонента);

5) эгоизм (важно удовлетворение только своих требований);

6) безразличие (удовлетворение, как собственных требований, так и требований оппонента – не имеет значения);

7) уклонение от взаимодействия (в общем случае приводит к тому же результату, что и конформизм).

Для оценки общего характера взаимодействия определенной пары агентов требуется определение их **общей стратегии** согласно таблице 2.2.

Таблица 2.2. Виды взаимодействия агентов, в зависимости от индивидуальных стратегий.

		Стратегия агента A2					
		кооперация	конкуренция	компромисс	конформизм	эгоизм	безразличие
Стратегия агента A1	кооперация	кооперация	конкуренция	компромисс	конформизм	эгоизм	безразличие
	конкуренция	конкуренция	конкуренция	компромисс	конформизм	эгоизм	безразличие
	компромисс	компромисс	компромисс	компромисс	конформизм	эгоизм	безразличие
	конформизм	конформизм	конформизм	конформизм	конформизм	эгоизм	безразличие
	эгоизм	эгоизм	эгоизм	эгоизм	эгоизм	эгоизм	безразличие
	безразличие	безразличие	безразличие	безразличие	безразличие	безразличие	безразличие

Как видно из таблицы, стратегии агентов обладают определенной «силой подавления». Предположение о том, что наилучшее взаимодействие агентов в МАС достигается при бесконфликтной кооперации, не справедливо. Часто наиболее эффективным являются стратегии кооперации, конкуренции и компромисса.

В соответствии с доминирующей целью каждый агент в МАС выбирает стратегию собственных действий из множества допустимых стратегий. В таблице 2.3 представлены решения по формированию коалиции в зависимости от стратегии взаимодействия агентов.

Таблица 2.3. Влияние стратегий взаимодействия агентов на решение по формированию коалиции.

Стратегия взаимодействия агентов	Готовность урегулировать конфликты на общих ресурсах и средствах	Готовность к переговорам, обмену опытом, знаниями, совместному использованию ресурсов и средств	Решение агентов по формированию коалиции
Кооперация	+	+	Выгодно
Конкуренция	-	-	Не возможно
Компромисс	+	+	Возможно
Конформизм	+	+	Возможно
Эгоизм	-	-	Не нужно
Безразличие	-	-	Не нужно
Уклонение от взаимодействия	-	-	Не нужно

Таким образом, при виде взаимодействия «конкуренция», «эгоизм», «безразличие», «уклонение от взаимодействия» рассматриваемый агент в коалицию не вступает. При видах взаимодействия «кооперация», «компромисс» и «конформизм» агент может вступить в коалицию. В процессе взаимодействия агентов, в зависимости от их результирующей стратегии, возможны следующие исходы.

1. При стратегиях **конформизма**, **эгоизма** или **безразличия** переговоров не происходит. В первом случае, ресурс или средство переходит агенту–оппоненту, а в двух других – остается у агента–хозяина.

2. При стратегии **кооперации** два или более агентов могут объединиться в коалицию. В этом случае ресурсы и средства становятся «общими» и возникает необходимость **планирования** их использования.

3. При стратегиях **конкуренции** или **компромисса** необходимо проведение переговоров. Модель переговоров на основе аукционов наиболее полно соответствует проблемной области МППР и ее можно считать наиболее перспективной для разрешения конфликтов между агентами [12]. Таким образом, для дальнейшего исследования задач разрешения конфликтов необходимо исследование моделей проведения аукционов.

2.4.2 Методы проведения аукционов между агентами

Проведение аукционов предполагает наличие развитых механизмов взаимодействия агентов [177]. Под **аукционом** будем понимать процедуру,

обладающую следующими свойствами [178]:

1. ее результатом являются два решения:
 - кому из агентов передать благо;
 - кто из агентов и сколько должен «заплатить»;
2. агенты посылают сигналы о своей готовности заплатить;
3. решения о том, кому из агентов передать благо и кто из агентов и сколько должен заплатить определяются исключительно на основе полученных сигналов [34].

Агент–продавец может устанавливать резервную и начальную цену. Резервная цена по существу является ценностью объекта для агента–продавца. Начальная цена – это цена, с которой начинается торг. Агент–аукционер устанавливает шаг торгов, величину которого целесообразно увязывать со стартовой ценой. Классификация видов аукционов представлена на рисунке 2.5 [34]. Под «ценой» в данном контексте понимается некоторая абстрактная «необходимость» или «полезность» чего–либо для данного агента, в соответствии с его целями. В случае открытого аукциона агентом–аукционером «цены» объявляются всем агентам–участникам. В закрытом аукционе о предлагаемых ценах знает только агент–аукционер.

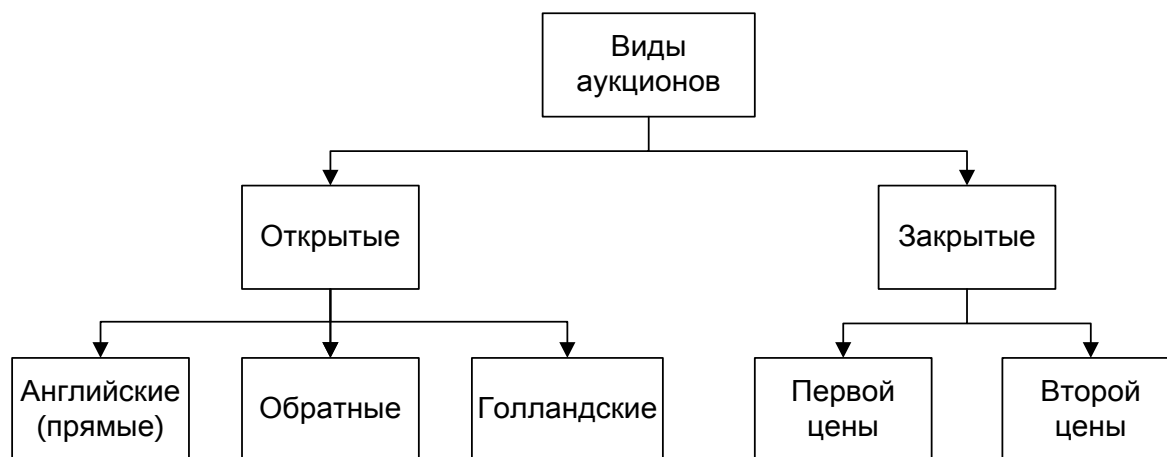


Рисунок 2.5 – Классификация видов аукционов

Рассмотрим подробно виды аукционов, представленных на рисунке 2.5:

1. Английский (прямой) аукцион:

- самый распространенный;

- проводится с гласными торгами и поднятием цены;
- начинается с минимальной цены, которая задается, как стартовая;
- агенты выставляют по очереди более высокие цены согласно шагу аукциона;
- побеждает агент, предложивший максимальную цену;
- не всегда торги заканчиваются продажей.

Вывод: адекватен МППР, имеет следующие особенности:

- агентам–покупателям может быть выгодно объединяться в коалиции;
- агент–победитель выше всех оценивает объект торгов;
- в процессе торгов агенты получают информацию об оценках друг друга, что делает торги более обоснованными.

2. Обратный аукцион:

- агенты–покупатели выставляют запросы на требуемые товары;
- агенты–продавцы соревнуются, предлагая лучшую цену;
- агентам–продавцам может быть выгодно объединяться в коалиции
- является обратным к английскому.

Вывод: адекватен МППР, имеет особенности, аналогичные английскому аукциону.

3. Голландский аукцион:

- оптовый аукцион, на котором агент–продавец выставляет много единиц товара одновременно;
- агенты–покупатели могут купить только предложенное количество единиц товара;
- агентам–покупателям может быть выгодно объединяться в коалиции;
- торг начинается с верхней цены, которая постепенно снижается;
- побеждает агент, предложивший максимальную цену.

Вывод: не адекватен МППР.

4. Закрытый аукцион первой цены.

- торги закрыты от внешних агентов;

- каждый агент подает свою цену в закрытом от других агентов виде;
- агент–продавец выбирает наибольшую цену;
- агент–покупатель получает предмет торгов по той цене, которую назвал;
- агентам невыгодно объединяться в коалиции.

Вывод: не адекватен МППР.

5. Закрытый аукцион второй цены. Агент–победитель определяется аналогично закрытым аукционам первой цены, но платит за предмет торгов не свою цену, а вторую по величине.

Вывод: не адекватен МППР.

Наряду с аукционами между агентами существуют аукционы между коалициями. В этом случае один или несколько агентов представляют интересы коалиции, и, в случае выигрыша, проводится аукцион внутри коалиции. При этом виды аукционов между коалициями (и внутри коалиции) имеют аналогичную классификацию. Существующие обзоры практики применения аукционов, согласно Клемпереру [96,179], позволяют сделать вывод о необходимости выделения следующих аспектов:

1. в случае открытых видов аукционов агентам–участникам выгодно объединяться в коалиции;
2. для «сильных» и для «слабых» агентов–участников должны быть одинаковые правила входа на аукцион;
3. в английском аукционе низкая объявленная резервная цена (начальная) обуславливает выгодность объединения агентов–участников в коалиции;
4. в открытых аукционах необходим учет стратегий других агентов–участников для определения собственной стратегии агента;
5. агенты могут выдвигать цены с намерением последующего монопольного положения;
6. у «слабых» агентов и коалиций меньше стимулов участвовать в открытом аукционе, чем в закрытом;
7. открытый аукцион всегда эффективен, в отличие от закрытого.

Вывод: В результате анализа возможных видов аукционов, можно сделать вывод, что для предметной области МППР подходят методы английского и обратного аукционов.

2.5 Анализ существующих методов и решение задачи планирования

2.5.1 Требования к методу составления плана выполнения работ

Целями формирования требований к методу составления плана выполнения работ является «оснащение» агента данным методом в рамках Коалиционной модели МППР и возможность решения практической задачи, сформулированной в Главе 4 настоящей работы. Исходя из данной цели сформулируем требования к методу составления плана выполнения работ:

- 1) Соответствие предметной области МППР. Необходимо отражение следующих основных особенностей МППР: ориентация на различные типы ресурсов и средств; возможность иерархического представления структуры процесса и расчета его характеристик на каждом уровне иерархии.
- 2) Вычислительная простота метода при использовании в СИМ.
- 3) Ориентация на решение практической задачи, подразумевающей использование метода для системы, состоящей из двух множеств ресурсов и средств с учетом ограничений по времени выполнения работ.
- 4) Оптимальность по времени расписания, полученного с использованием данного метода.

В связи с большим количеством методов, описанных в рамках ТСП, проведем анализ наиболее известных методов, в первом приближении соответствующих определенным выше требованиям.

2.5.2 Анализ методов теории составления расписаний

Целью анализа существующих методов составления планов выполнения работ агентом является поиск метода ТСП и, при необходимости, его доработка под выше обозначенные требования.

- 1. Метод ветвей и границ.** Впервые метод был предложен Лендом и

Дойгом [180] в 1960 году для решения общей задачи целочисленного линейного программирования. В основе метода лежит идея последовательного разбиения множества допустимых решений на подмножества [181]. На каждом шаге метода элементы разбиения подвергаются проверке для выяснения, содержит данное подмножество оптимальное решение или нет. Проверка осуществляется посредством вычисления оценки снизу для целевой функции на данном подмножестве. Если оценка снизу не меньше рекорда – наилучшего из найденных решений, то подмножество может быть отброшено. Проверяемое подмножество может быть отброшено еще и в том случае, когда в нем удастся найти наилучшее решение. Если значение целевой функции на найденном решении меньше рекорда, то происходит смена рекорда. По окончании работы алгоритма рекорд является результатом его работы.

Если удастся отбросить все элементы разбиения, то рекорд – оптимальное решение задачи [181]. В противном случае, из неотброшенных подмножеств выбирается наиболее перспективное (например, с наименьшим значением нижней оценки), и оно подвергается разбиению. Новые подмножества вновь подвергаются проверке и т. д.

Для уменьшения трудоемкости алгоритма существует несколько методов, один из которых состоит в искусственном завышении нижней оценки [181]. Предположим, что нас интересует не только оптимальное решение, но и приближенные решения с относительной погрешностью не более ϵ . Тогда завышение нижней оценки в $(1+\epsilon)$ раз приводит к желаемому результату.

Вывод. При анализе данного метода можно сделать вывод о его вычислительной сложности. Применение метода для составления планов выполнения работ в МАС накладывает серьезные требования к вычислительным ресурсам и повышает время моделирования. В связи с этим будем считать нецелесообразным использование данного метода для составления планов выполнения работ в МАС.

2. Алгоритм Литтла. Данный алгоритм [182] используется для поиска оптимального замкнутого (гамильтонова) контура в графе [183], имеющем N

вершин, причем каждая вершина i связана с любой другой вершиной j двунаправленной дугой. Каждой дуге приписан вес C_{ij} , причем веса дуг строго положительны ($C_{ij} \geq 0$). Веса дуг образуют матрицу стоимости. Все элементы по диагонали матрицы приравнивают к бесконечности ($C_{jj} = \infty$).

В случае, если пара вершин i и j не связана между собой (граф не полносвязный), то соответствующему элементу матрицы стоимости приписываем вес, равный длине минимального пути между вершинами i и j [184]. Если в итоге дуга (i, j) войдет в результирующий контур, то ее необходимо заменить соответствующим ей путем. Общая идея алгоритма [184]: нужно разделить огромное число перебираемых вариантов на классы и получить оценки (снизу – в задаче минимизации, сверху – в задаче максимизации) для этих классов, чтобы иметь возможность отбрасывать варианты не по одному, а целыми классами. Трудность состоит в том, чтобы найти такое разделение на классы (ветви) и такие оценки (границы), чтобы процедура была эффективной. Алгоритм Литтла можно формализовать следующим образом [184].

а) В каждой строке матрицы стоимости найдем минимальный элемент и вычтем его из всех элементов строки. Сделаем это и для столбцов, не содержащих нуля. Получим матрицу стоимости, каждая строка и каждый столбец которой содержат хотя бы один нулевой элемент.

б) Для каждого нулевого элемента матрицы C_{ij} рассчитаем коэффициент Γ_{ij} , который равен сумме наименьшего элемента i строки (исключая элемент $C_{ij}=0$) и наименьшего элемента j столбца. Из всех коэффициентов Γ_{ij} выберем такой, который является максимальным $\Gamma_{k,l} = \max\{\Gamma_{ij}\}$. В гамильтонов контур вносится соответствующая дуга (k,l) .

с) Удаляем k -тую строку и столбец l , поменяем на бесконечность значение элемента $C_{l,k}$ (поскольку дуга (k,l) включена в контур, то обратный путь из l в k недопустим).

д) Если порядок матрицы $\neq 2$, переходим на шаг «а».

е) В текущий ориентированный граф [183] вносим две недостающие дуги, определяющиеся однозначно матрицей прядка 2. Получаем гамильтонов контур.

В ходе решения ведется постоянный подсчет текущего значения **нижней границы**. Нижняя граница равна сумме всех вычтенных элементов в строках и столбцах. Итоговое значение нижней границы должно совпасть с длиной результирующего контура.

Вывод. Данный метод является вычислительно сложным для применения при решении задачи составления планов выполнения работ в МАС.

3. Метод случайного поиска. Обычно выбор решения можно представить последовательностью выборов. Если делать эти выборы с помощью какого-либо случайного механизма, то решение находится достаточно быстро, при этом необходимо запоминать "рекорд", т. е. наилучшее из встретившихся решений [156]. Данный метод можно улучшить, если учесть в случайном механизме перспективность тех или иных выборов, т. е. комбинировать случайный поиск с эвристическим методом и методом локального поиска [184]; либо другим методом теории составления расписаний (ТСР).

Вывод. Данный метод является алгоритмически простым, при этом для получения решения необходимо достаточно большое время работы. В связи с этим будем считать возможным применение данного метода при решении задачи составления планов выполнения работ в МАС. При этом метод не гарантирует оптимальность расписания по времени.

4. Метод Джонсона. Составление плана работ для случая, когда имеется система с двумя множествами ресурсов и средств является отдельной задачей, решенной в рамках ТСР. Согласно теореме Джонсона [142, 185] для этого случая имеется оптимальное расписание. Подробно данный метод рассмотрен далее в данной работе.

Вывод. Метод не является вычислительно сложным для применения при решении задачи составления планов выполнения работ в МАС. Метод гарантирует оптимальность расписания по времени. Для системы из двух множеств ресурсов и средств будем использовать этот метод.

Вывод по разделу 2.5.2.

1. Вследствие ориентации на последующее использование выбранного

метода ТСР для решения задач в системах распределения ресурсов и формирования коалиций, одним из важных критериев метода должна являться его алгоритмическая простота. Одним из наиболее простых эвристических методов ТСР, дающих достаточно точные решения, является метод случайного поиска. В связи с этим, в качестве основы алгоритма для решения задачи составления планов выполнения работ будем использовать метод случайного поиска.

2. Для системы из двух множеств ресурсов и средств агенты будут использовать метод Джонсона для поиска оптимального расписания выполнения работ.

Выбранные методы необходимо формализовать для использования агентами в МАС и поместить в базу данных мультиагентной системы (*GKB*) для обеспечения возможности их использования агентами.

2.5.3 Общее описание задачи планирования

В качестве основы алгоритма для решения задачи составления планов выполнения работ были выбраны метод Джонсона [142, 185] и метод случайного поиска. Для решения задачи планирования необходимо создание мультиагентной модели для превентивной оценки количества ресурсов и средств для МППР с целью установления равновесия между финансовыми затратами и скоростью работ (для максимизации прибыли предприятия, на котором функционирует данный МППР).

Ключевым моментом является динамичность системы – заказы возникают в произвольные моменты времени. В связи с этим, для максимизации прибыли, необходимо оставлять часть ресурсов и средств в резерве и, при необходимости, отзывать часть используемых ресурсов и средств на более срочные заказы.

Опишем последовательность работы коалиционной модели МППР для задачи планирования.

1. Инициация работ – поступление заказа. Происходит определение агента A_i – координатора работ и выделение ему ресурсов $\{Res^{Ai}_1, \dots, Res^{Ai}_n\}$ и средств $\{Mech^{Ai}_1, \dots, Mech^{Ai}_m\}$ из общего резерва (Pool) под его координацию. Возможные

цели агента A_i :

- минимизация времени выполнения работ по заказу: $t^{Ai}(W_i) \rightarrow \min$;
- минимизация финансовых затрат по выполнению работ (т.е. максимизация прибыли агента): $S^{Ai} \rightarrow \max$;
- минимизация количества используемых «общих» ресурсов и средств в связи с вероятностью возникновения «параллельного» заказа: $N^{Ai} \rightarrow \min$.

2. Поступление «параллельного» заказа. В процессе выполнения одного заказа существует вероятность поступления второго. При этом в системе происходит определение агента A_j , который планирует, может ли он выполнить работу W_j в указанный срок t_j и с имеющимися «резервными» ресурсами $\{Res^{Aj}_1, \dots, Res^{Aj}_t\}$ и средствами $\{Mech^{Aj}_1, \dots, Mech^{Aj}_v\}$. При отсутствии необходимых ресурсов или средств, агент A_j может организовывать взаимодействия с другими агентами $\{A_k, \dots, A_l\}$ в МАС, в результате которых возможно создание коалиции K_p для совместного выполнения работы W_j согласно алгоритму, представленному в п. 2.6.5. Далее возможно возникновение третьего «параллельного» заказа, и т. д.

3. Возникновение конфликтов. В случае нехватки ресурсов или средств возникает необходимость взаимодействий между агентами на основе алгоритма разрешения конфликтов в п. 2.6.3 (в приведенном примере, агента A_j с агентом A_i), на основе его стратегии взаимодействия $\{Str_{Aj}, Str_{Ai}\}$. При этом в зависимости от стратегий может потребоваться проведение аукциона.

2.5.4 Составление плана выполнения работ по методу случайного поиска

Для последующего использования параметров задачи составления планов выполнения работ в качестве исходных данных алгоритма планирования, необходимо проведение их формализации.

1. Формирование списков: агентов $\{A_1, \dots, A_m\}$; работ $\{W_1, \dots, W_f\}$; типов ресурсов $\{1, \dots, t\}$; ресурсов $\{Res^1_1, \dots, Res^t_i\}$; типов средств $\{1, \dots, v\}$; средств $\{Mech^1_1, \dots, Mech^v_j\}$.

2. Определение условий выполнения работ $\{W_1, \dots, W_f\}$. Взаимосвязи

списков из п.1 определяют следующие условия выполнения работ:

- агент A_i может управлять выполнением только одной работы W_i ;
- агенты $\{A_1, \dots, A_m\}$ могут использовать ресурсы любого типа $\{1, \dots, t\}$ и средства любого типа $\{1, \dots, v\}$ для выполнения работы W_i ;
- агенты $\{A_1, \dots, A_m\}$ не могут использовать средство $Mech_k$ без ресурса Res_k для выполнения работы W_i ;
- ресурсы типа k могут выполнять работу W_i только с использованием средств типа k ;
- в зависимости от типа $\{1, \dots, t\}$ ресурсы могут быть привязаны только к одной работе W_i до ее окончания, либо переходить с одной работы W_i на другую W_j ;
- средства всех типов $\{1, \dots, v\}$ могут переходить с одной работы W_i на другую W_j .

Условия выполнения работ:

- минимальный шаг выполнения работы W_i – 1 день;
- ресурсы $\{Res_1, \dots, Res_t\}$ и средства $\{Mech_1, \dots, Mech_t\}$ не могут быть захвачены агентом A_j во время их использования другим агентом A_i ;
- для выполнения работы W_i захват средств $\{Mech_1, \dots, Mech_t\}$ не является необходимым.

Введем следующие коэффициенты:

- весовой коэффициент V_i необходимости выполнения i -го формализуемого ограничения R_i плана выполнения работ PW_i может принимать следующие значения: $V_i = \{1, 2, \dots, 100\}$;
- весовой коэффициент Q_i необходимости выполнения i -го неформализуемого ограничения L_i плана выполнения работ PW_i может принимать следующие значения: $Q_i = \{1, 2, \dots, 10\}$;
- суммарный коэффициент несоответствий i -го плана выполнения работ K_i ; начальное значение K_i принимается равным сумме всех коэффициентов несоответствия формализуемым ограничениям $\{V_1, \dots, V_n\}$ и неформализуемым

ограничениям $\{Q_1, \dots, Q_m\}$:

$$K_i = \sum_{n=1}^N V_n + \sum_{m=1}^M Q_m, \quad (2.14)$$

где: N – число формализуемых ограничений; M – число неформализуемых ограничений.

3. Определение формализуемых $\{R_1, \dots, R_n\}$ и неформализуемых $\{L_1, \dots, L_m\}$ ограничений; их весовых коэффициентов несоответствия $\{V_1, \dots, V_n\}$ и $\{Q_1, \dots, Q_m\}$ соответственно (для определения важности).

К формализуемым ограничениям $\{R_1, \dots, R_n\}$ относятся следующие:

– R_1 ($V_i = 100$): каждая работа должна быть выполнена вовремя (фактическое время выполнения работы T не должно быть больше расчетного максимального времени T_0 , $T \leq T_0$);

– R_2 ($V_i = 10$): не должно быть окон в работе ресурсов (окна в работе средств допустимы). Число окон в работе ресурсов определяется как сумма свободных ресурсов по всем рабочим дням, и рассчитывается по формуле:

$$R_2 = \sum_{i=1}^D w_i * Re s_i, \quad (2.15)$$

где: D – количество дней, на которые составляется план выполнения работ PW_i (текущий день, $d \in (1, D)$); w_i – параметр свободы ресурса, $w_i = \{1, 0\}$.

К неформализуемым (или сложно формализуемым ограничениям) $\{L_1, \dots, L_m\}$ относятся следующие:

– L_1 ($Q_1 = 4$): загрузка ресурсов одного типа должна быть равномерной с учетом коэффициентов скорости работы, зависящих от дня недели, личных событий, настроения, и т. д.;

– L_2 ($Q_2 = 1$): необходимо проведение технического обучения ресурсов всех типов, направленного на повышение скорости выполнения работ (с периодичностью и продолжительностью, связанной с типом ресурса, его квалификацией, времени работы, текущей загруженностью и т. д.);

– L_3 ($Q_3 = 2$): необходимо проведение технического обслуживания средств (с периодичностью и продолжительностью, связанной с типом средства, его

сроком службы, времени эксплуатации и т. д.).

4. Загрузка исходных данных по работам $\{W_1, \dots, W_i\}$:

- дата инициации работ, D_b ;
- крайняя дата завершения работ, D_e ;
- требуемый состав действий, $\{D_1, \dots, D_s\}$.

Пример загрузки исходных данных представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Пример загрузки исходных данных по работам.

Наименование работы	Дата начала работы	Крайняя дата завершения работ	Требуемый состав действий
W_1	13.05.10	26.05.10	$\langle D_1, D_2, D_3 \rangle$
W_2	21.05.10	21.06.10	$\langle D_1, D_3 \rangle$
W_3	18.06.10	10.09.10	$\langle D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 \rangle$

5. Формирование параметров работ $\{W_1, \dots, W_i\}$:

- количество ресурсов типа 1: N_{Res1} ;
- параметр привязанности ресурсов типа 1 только к одной работе до ее окончания: $P_{Res1} = \{1, 0\}$;
- количество ресурсов типа 2: N_{Res2} ;
- параметр привязанности ресурсов типа 2 только к одной работе до ее окончания: $P_{Res2} = \{1, 0\}$;
- количество ресурсов типа n : N_{Resn} ;
- параметр привязанности ресурсов типа n только к одной работе до ее окончания: $P_{Res3} = \{1, 0\}$;
- количество средств типа 1: N_{Mech1} ;
- количество средств типа 2: N_{Mech2} ;
- количество средств типа m : N_{Mechm} ;
- расчетное максимальное время выполнения работы в днях: T_O .

Так как каждая работа W_j состоит из действий $\{D_1, \dots, D_i\}$, состав и очередность которых определена в базе знаний мультиагентной системы (ГКВ): $W_j = D_1 + D_2 + \dots + D_n$, то для расчета максимального времени выполнения работы используется следующая формула:

$$T_O = t_1 + t_2 + \dots + t_n, \quad (2.16)$$

где: t_i – среднее время выполнения действия D_i (из GKB).

Пример расчета параметров работ представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Пример расчета параметров работ.

Параметры\Работы	N_{Res1}	P_{Res1}	N_{Res2}	P_{Res2}	N_{Res3}	P_{Res3}	N_{Mech1}	N_{Mech2}	T_O
W_1	2	1	1	0	1	0	0	0	3
W_2	4	1	1	0	1	0	1	1	5
W_3	1	1	1	0	1	0	0	1	3
W_4	1	1	2	0	1	0	0	1	4

В рамках создания системы необходима разработка алгоритма составления планов выполнения работ для общего случая. Данный алгоритм, основанный на методе случайного поиска, представлен на рисунке 2.6.

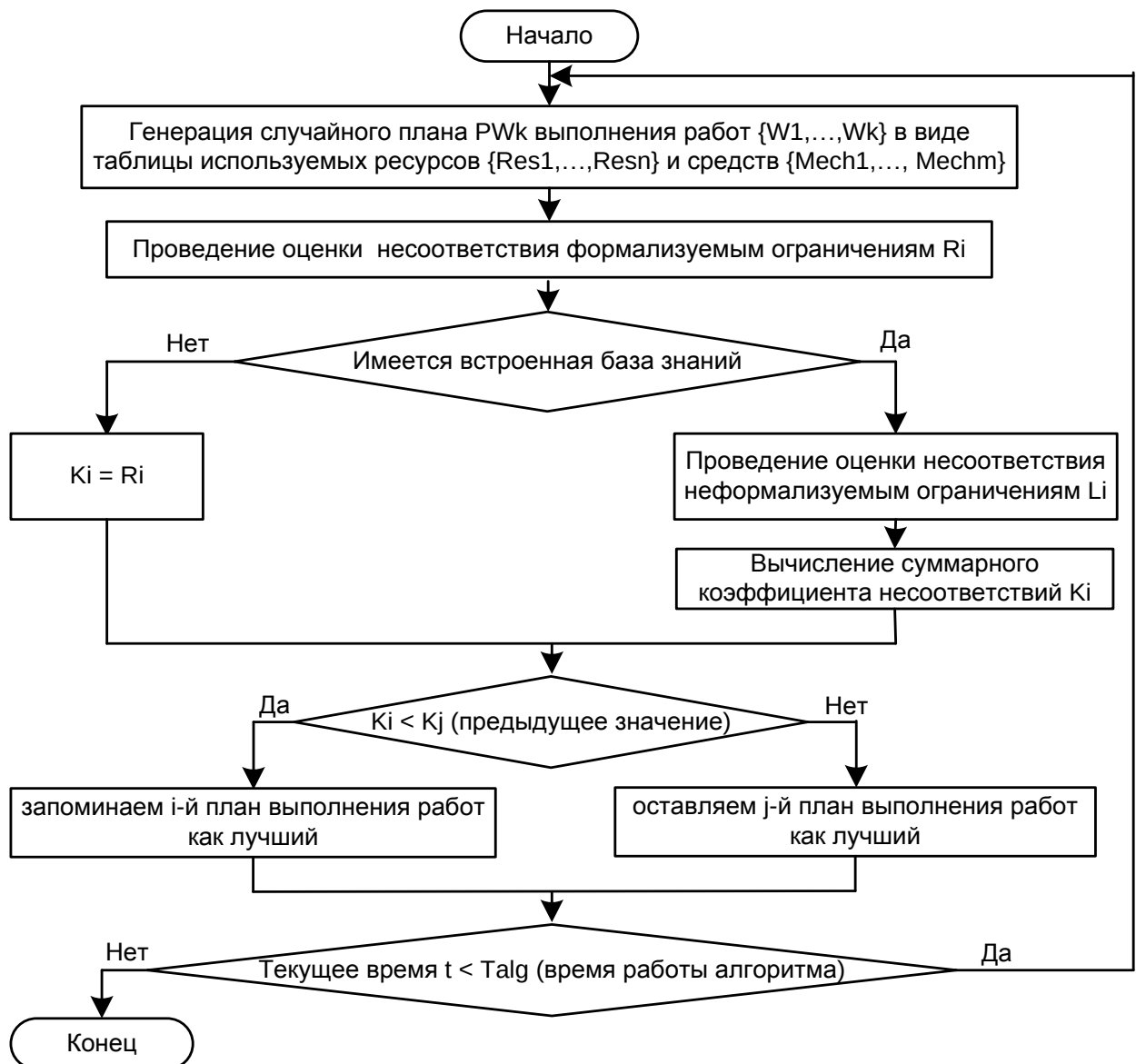


Рисунок 2.6 – Алгоритм составления планов по методу случайного поиска

Приведем описание алгоритма:

1. Генерация случайного плана PW_i выполнения работ $\{W_1, \dots, W_i\}$ (с использованием данных п.2 и п.3 данного алгоритма в случае не первого прогона) в виде таблицы используемых ресурсов $\{Res_1, \dots, Res_t\}$ и средств $\{Mech_1, \dots, Mech_t\}$, столбцами которой являются дни проведения работ, а строками – сами работы. Также в каждый день необходим подсчет свободных ресурсов и средств.

Пример плана выполнения работ PW_i представлен в таблице 2.6. В примере будем считать, что агенты–координаторы $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ управляют работами $\{W_1, W_2, W_3, W_4\}$ соответственно. Все агенты могут координировать действия «собственных» ресурсов и средств; пусть всего имеется: $4Res_1$ (проектировщики), $2Res_2$ (сборщики), $1Res_3$ (контролеры качества), $1Mech_1$ (специализированная графическая станция), $1Mech_2$ (станок по шлифовке металла). Каждая работа должна начинаться с Res_1 и заканчиваться Res_3 ; Res_1 может использовать $Mech_1$, Res_2 может использовать $Mech_2$.

Таблица 2.6. Пример плана распределения ресурсов и средств по работам.

Дни \ Работы	1	2	3	4	5
W_1	$2Res_1, Res_2$	$2Res_1, Res_2$	«нпостой»	Res_2, Res_3	
W_2	$Res_1, Mech_1$	$2Res_1, Mech_1$	$Res_2, Mech_2$	$4Res_1, Res_2$	Res_3
W_3	Res_1, Res_2	$Res_2, Mech_2, Res_3$	Res_1, Res_3		
W_4			Res_1, Res_2	«нпостой»	$Res_1, 2Res_2, Mech_2$
Свободные ресурсы и средства	$Res_3, Mech_2$	–	$2Res_1, Mech_1$	$Mech_1, Mech_2$	$3Res_1, Mech_1$

В данном примере (таблица 2.6) время (дни) начала выполнения работ W_1, W_2, W_3 – 1-й день, работы W_4 – 3-й день. Крайний срок выполнения работы W_1 – 4-й день, работы W_2 – далее, чем 5-й день (выходит за пределы таблицы), работ W_3 и W_4 – 5-й день. По таблице видно, что работу W_4 агент A_4 не может выполнить с помощью своих ресурсов и средств.

2. Проведение оценки несоответствия неформализуемым ограничениям $\{R_1, \dots, R_n\}$. Расчет суммарного коэффициента несоответствия формализуемым

ограничениям G_x производится по следующей формуле:

$$G_x = \sum_{i=1}^n f_i * V_i, \quad (2.17)$$

где: x – текущий вариант плана выполнения работ; n – количество формализуемых ограничений; f_i – число невыполнений i -го формализуемого ограничения; V_i – весовой коэффициент необходимости выполнения формализуемого ограничения R_i плана выполнения работ PW_i .

Пример вычисления суммарного коэффициента несоответствия формализуемым ограничениям G_x :

$$G_1 = 1*100 + 6*10 = 160.$$

Проведение оценки несоответствия неформализуемым ограничениям $\{L_1, \dots, L_m\}$ – при наличии встроенной базы знаний, содержащей информацию по накопленному опыту работы и/или наиболее успешные примеры принятия решений по сложным ситуациям в процессе проектирования, сборки и контроля качества. Наличие и полнота данной базы знаний не является необходимым качеством для работы алгоритма, ее цель – получение наилучшего решения путем максимально полного учета неформализуемых ограничений. При отсутствии базы знаний – переход к п. 5; определяем $K_x = G_x$.

С использованием результирующих интерпретаций неформализуемых ограничений, произведем расчет суммарного коэффициента несоответствия неформализуемым ограничениям H_x по следующей формуле:

$$H_x = \sum_{i=1}^m d_i * Q_i, \quad (2.18)$$

где: x – текущий вариант плана выполнения работ; m – количество неформализуемых ограничений; d_i – число невыполнений i -го неформализуемого ограничения; Q_i – весовой коэффициент необходимости выполнения i -го неформализуемого ограничения L_i плана выполнения работ.

Пример вычисления суммарного коэффициента несоответствия неформализуемым ограничениям H_x :

$$H_1 = 1*4 = 4.$$

3. Вычисление суммарного коэффициента несоответствий K_x путем

сложения суммарного коэффициента несоответствия формализуемым ограничениям G_x и суммарного коэффициента несоответствия неформализуемым ограничениям H_x по следующей формуле:

$$K_x = G_x + H_x \quad (2.19)$$

Пример: $K_x = 160 + 4 = 164$.

4. Выбор лучшего плана выполнения работ. Если суммарный коэффициент несоответствий x -го плана выполнения работ K_x меньше соответствующего коэффициента несоответствий y -го плана выполнения работ K_y , ранее выбранного лучшим, $K_x < K_y$, то запоминаем x -й план выполнения работ как лучший. Иначе оставляем y -й план выполнения работ лучшим.

Пример: $K_1 = 170$; $K_2 = 164$; $K_2 < K_1$, поэтому запоминаем план выполнения работ PW_2 как лучший.

5. Проверка истечения заранее определенного времени работы алгоритма T_{alg} . Если текущее время $t < T_{alg}$ – переходим на п. 1. Иначе – конец алгоритма.

Вывод. Применение данного алгоритма позволит планировать агентами и коалициями использование ресурсов и средств при выполнении работ различного типа. Алгоритм не дает оптимальное решение и является достаточно примитивным, в связи с чем необходимо рассмотрение алгоритма по теореме Джонсона для случая наличия двух множеств ресурсов и средств.

2.5.5 Составление плана выполнения работ по методу Джонсона

Составление плана работ для случая, когда имеется система с двумя множествами ресурсов и средств является отдельной задачей, решенной в рамках ТСП. Рассмотрим этот метод в связи с возможностью использования данных результатов ТСП для практических задач, поставленных в работе.

Пусть имеется система из n работ и m множеств ресурсов и средств, используемых для выполнения этих работ. Считаем, что наша система является системой **конвейерного типа**, т.е. последовательность использования ресурсов и средств в процессе выполнения работы одинакова для каждой работы (работа соответствует заказу). Если какое-то множество ресурсов и средств не

используется в работе, то значение регулярного критерия для этой работы равно 0. В качестве регулярного критерия будем рассматривать время; возможно использование других критериев (например, денег).

Введем обозначения задачи Джонсона [185]:

$$n \mid m \mid F \mid F_{\max}, \quad (2.20)$$

где: n – количество работ; m – количество множеств ресурсов и средств (исследуем случай $m = 2$); F – критерий, определяющий, что работы выполняются в системе конвейерного типа; $F_{\max}$ – критерий минимизации максимальной длительности выполнения работы.

Пусть [142]: A_i – длительность работы первого множества ресурсов и средств для i -й работы; B_i – длительность работы второго множества ресурсов и средств для i -й работы; F_i – длительность прохождения i -й работы. Некоторые A_i и B_i могут быть равны 0. Упрощение модели состоит в том, что:

- считаем что одно множество ресурсов и средств в каждый момент времени выполняет не более одной работы;
- одна работа не может выполняться двумя множествами одновременно.

Считаем, что все A_i и B_i нам известны, т.е. трудоемкость выполнения работ заранее известна. Задача – упорядочить n работ таким образом, чтобы минимизировать максимальную длительность прохождения работы $F_{\max}$. В соответствии с [142]:

$$F_{\max} \geq \sum_{i=1}^n A_i + B_n, \quad (2.21)$$

$$F_{\max} \geq A_1 + \sum_{i=1}^n B_i, \quad (2.22)$$

Т.к. суммы не зависят от последовательности выполнения работ, то минимизировать $F_{\max}$ можно лишь путем минимизации A_i и B_n за счет упорядочивания работ. Из (2.21) следует, что:

$$F_{\max} = \sum_{i=1}^n A_i + B_n + X, \quad (2.23)$$

где: X – суммарное время простоя первого множества ресурсов и средств при выполнении всех работ.

Согласно Джонсону [142, 185], можно ограничиться рассмотрением расписаний, в которых работы по первому множеству ресурсов и средств «упакованы» плотно, начиная с первой. Т.е. первое множество работает без простоев до завершения A_n . Приведение любого расписания к этому виду не приведет к увеличению максимальной длительности выполнения работ F_{max} . Поэтому можно считать $X=0$.

Теорема Джонсона: если составляется расписание для системы $n \mid m \mid F \mid F_{max}$ и все работы доступны одновременно, то оптимум ищется среди расписаний, в которых сохраняется порядок выполнения работ на двух первых (1 и 2) и двух последних ($m-1$ и m) машинах [142]. В терминах данной работы по «машиной» будем понимать множество ресурсов и средств, находящихся под управлением агента.

На основе ряда утверждений, представленных в [142], выведем алгоритм составления плана выполнения работ (расписания) на основе данной теоремы.

1) Установим $A = \min \{A_i, i=1, n\}$; $B = \min \{B_i, i=1, n\}$. Примем: если какая-то работа не выполняется на множестве ресурсов и средств, то ее длительность равна 0, но эта длительность участвует в сравнениях для обеспечения общности.

2) Формируем расписание в виде таблицы. Если $A - B \leq 0$, то перебираем множество A_i , начиная с 1-го элемента и ищем первый элемент равный A . Соответствующая работа i будет выполняться первой, размещаем ее в начале расписания (при первом проходе цикла – первой).

3) Иначе, если $A - B > 0$, то перебираем множество B_i , начиная с 1-го элемента и ищем первый элемент равный B . Соответствующая работа i будет выполняться последней, размещаем ее в конце расписания (при первом проходе цикла – последней).

4) Исключим размещенную в расписании работу из множества рассматриваемых работ: установим вновь $A = \min \{A_i, i=1, n-1\}$; $B = \min \{B_i, i=1, n-1\}$.

5) Переход на п.2., цикл проходит $n-1$ раз, после чего остается одна работа.

В соответствие с теоремой Джонсона [142], упорядочение работ,

полученное по данному алгоритму, является **оптимальным**, т.е. минимизирует максимальную длительность прохождения работы.

Пример. Пусть исходные данные для задачи представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Исходные данные для задачи.

Обозначение работы	Время на выполнение 1-го этапа работы 1-ым множеством ресурсов и средств (A_i)	Время на выполнение 2-го этапа работы 2-ым множеством ресурсов и средств (B_i)
a	5	2
b	2	3
c	0	6
d	8	1
e	3	2

Составим план выполнения работ (расписание) в соответствие с алгоритмом Джонсона [185]:

1) $A = \{A_i\} = \{a(5), b(2), c(0), d(8), e(3)\}$, $B = \{B_i\} = \{a(2), b(3), c(6), d(1), e(2)\}$.

$\min\{A\}=0$, достигается на работе c ; $\min\{B\}=1$, достигается на работе d .

Проведем сравнение A и B . $A < B \Leftrightarrow 0 < 1$, значит **работа c – первая**.

2) $A = \{a(5), b(2), d(8), e(3)\}$, $B = \{a(2), b(3), d(1), e(2)\}$.

$\min\{A\}=2$, достигается на работе b ; $\min\{B\}=1$, достигается на работе d .

Проведем сравнение A и B . $B < A \Leftrightarrow 1 < 2$, значит **работа d – последняя**.

3) $A = \{a(5), b(2), e(3)\}$, $B = \{a(2), b(3), e(2)\}$.

$\min\{A\}=2$, достигается на работе b ; $\min\{B\}=2$, достигается на работах a и e .

$\min\{A\} = \min\{B\} \Rightarrow$ выбираем A , значит **работа b – первая**.

4) $A = \{a(5), e(3)\}$, $B = \{a(2), e(2)\}$.

$\min\{A\}=3$, достигается на работе e ; $\min\{B\}=2$, достигается на работах a и e .

Проведем сравнение A и B . $B < A \Leftrightarrow 2 < 3$, при этом берем работу с наименьшим индексом, значит **работа a – последняя**.

5) $A = \{e(3)\}$, $B = \{e(2)\}$. Эта работа ставится в середину расписания.

6) Выстраиваем цепочку работ $\{c, b, e, a, d\}$. Составим диаграмму Ганта (таблица 2.8):

Таблица 2.8. План выполнения работ (расписание).

t, дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A	b		e			a					d								
B	c					b				e		a							d

Суммарное время выполнения работ – 19 дней. Это оптимальное время согласно теореме Джонсона [185].

Вывод. Применение данного алгоритма обеспечивает оптимальное время выполнения работ. При этом не учитываются ограничения по времени выполнения работ, что необходимо для решения практических задач. В связи с этим необходимо разработать новый алгоритм на основе алгоритма Джонсона, учитывающий ограничения по времени выполнения работ.

2.5.6 Составление плана выполнения работ с учетом ограничения по времени

Введем дополнения в описанный алгоритм, основанный на теореме Джонсона. Данные дополнения разработаны авторами данной работы. Введем для каждой работы критическое время или дату, определяющую максимальный срок ее выполнения. При переходе за эту дату возникают нежелательные последствия – пени, штрафы и т. д. На практике ограничения по времени встречаются наиболее часто и этот алгоритм имеет смысл исследовать особо.

Пусть для каждой работы i установлено значение T_i , ограничивающее сверху время прохождения данной работы ($A_i + B_i \leq T_i$). Тогда алгоритм выглядит следующим образом.

1) Построим для данного множества работ оптимальный (по Джонсону) алгоритм, описанный в разделе 2.5.5 данной работы. После применения этого алгоритма мы получили расписание S^* оптимальное (по Джонсону), то есть минимизирующее F_{max} за счет упорядочивания работ. Но данное расписание не обеспечивает выполнение ограничений по времени, и вполне возможно, что оптимальное по времени расписание Джонсона приведет к уплате больших штрафов.

2) Рассмотрим подробнее процесс прохождения работ на машинах. Пусть $X_{[i]}$ – время простоя 2-й машины для i -й работы, предшествующее $B_{[i]}$. Типичное расписание имеет следующий вид (см. таблицу 2.9).

Таблица 2.9. Пример типичного расписания.

Машина 1	$A_{[1]}$	$A_{[2]}$		$A_{[3]}$	$A_{[4]}$		$A_{[5]}$	
Машина 2	$X_{[1]}$	$B_{[1]}$	$X_{[2]}$	$B_{[2]}$	$B_{[3]}$	$X_{[4]}$	$B_{[4]}$	$B_{[5]}$

Значения $X_{[i]}$ могут быть выражены через A_s и B_s следующим образом [142]:

$$X_{[1]} = A_{[1]},$$

$$X_{[2]} = \max [A_{[1]} + A_{[2]} - B_{[1]} - X_{[1]}, 0],$$

$$X_{[3]} = \max [A_{[1]} + A_{[2]} + A_{[3]} - B_{[1]} - B_{[2]} - X_{[1]} - X_{[2]}, 0].$$

В общем случае:

$$X_{[J]} = \max \left(\sum_{i=1}^J A_{[i]} - \sum_{i=1}^{J-1} B_{[i]} - \sum_{i=1}^{J-1} X_{[i]}, 0 \right).$$

Отсюда получаем частные суммы:

$$X_{[1]} = A_{[1]},$$

$$X_{[1]} + X_{[2]} = \max [A_{[1]} + A_{[2]} - B_{[1]}, A_{[1]}],$$

$$X_{[1]} + X_{[2]} + X_{[3]} = \max [A_{[1]} + A_{[2]} + A_{[3]} - B_{[1]} - B_{[2]}, X_{[1]} + X_{[2]}] =$$

$$= \max \left[\sum_{i=1}^3 A_{[i]} - \sum_{i=1}^2 B_{[i]}, \sum_{i=1}^2 A_{[i]} - B_{[1]}, A_{[1]} \right].$$

$$\text{Вообще, } \sum_{i=1}^J X_{[i]} = \max \left[\sum_{i=1}^J A_{[i]} - \sum_{i=1}^{J-1} B_{[i]}, \sum_{i=1}^{J-1} A_{[i]} - \sum_{i=1}^{J-2} B_{[i]}, \dots, \sum_{i=1}^2 A_{[i]} - B_{[1]}, A_{[1]} \right].$$

$$\text{Определим } Y_J \text{ как: } Y_J = \sum_{i=1}^J A_{[i]} - \sum_{i=1}^{J-1} B_{[i]}, \text{ то } \sum_{i=1}^J X_{[i]} = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_J).$$

Теперь, если максимальную длительность прохождения для конкретного расписания S обозначить $F_{\max}(S)$, то

$$F_{\max}(S) = \sum_{i=1}^n B_{[i]} + \sum_{i=1}^n X_{[i]} = \sum_{i=1}^n B_{[i]} + \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \quad (2.24)$$

Введем обозначение $X^* = \sum_{i=1}^J X_{[i]} = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_J)$ при оптимальном

размещении Джонсона. Это время простоя при оптимальном размещении работ.

Сформулируем требование: при поиске расписания S^{**} , обеспечивающего выполнение ограничений по времени, не допустить времени простоя, превышающего X^* . Т.е. предложенный алгоритм не должен ухудшать временных характеристик алгоритма Джонсона. Цель алгоритма – найти размещение S^{**} обеспечивающее выполнение ограничений по времени для каждой работы, или хотя бы минимизирующее количество работ, превышающих контрольное время (т.е. минимизирующее размер штрафа).

3) Начнем рассматривать выполнение ограничения по времени для полученного расписания с последней работы. Проверим выполнение неравенств:

$$F_{\max}(S) = \sum_{i=1}^n B_{[i]} + \sum_{i=1}^n X_{[i]} = \sum_{i=1}^n B_{[i]} + \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \leq T_n, \quad \sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad (2.25)$$

4) Если неравенства (2.25) выполняются, то работа n остается последней в расписании. А значит в искомом расписании S^{**} мы определили последний элемент. Исключим размещенную в расписании работу из множества рассматриваемых работ, т.е. отбросим из расписания S^* этот последний элемент и вновь проверим выполнение неравенств, т.е. перейдем в цикле на п. 3.

5) Если неравенства (2.25) не выполняются, то работа выходит за критическое время T_i , либо появляется время простоя, превышающее оптимальное. Тогда предпоследнюю работу S^* ставим последней, и проверяем выполнение неравенств (2.25) снова. Необходимо при этом учитывать, что переставив предпоследнюю работу в конец мы получаем другое расписание, и для него необходимо вновь пересчитать значения $Y_1, \dots, Y_{n-1}$. С этими новыми значениями перейдем в цикле на п. 3.

6) Если неравенства (2.25) после прохождения п. 5 вновь не выполняются, то предпоследняя работа также выходит за критическое время T_i , либо появляется время простоя, превышающее оптимальное. Тогда третью с конца работу ставим последней, и проверяем выполнение неравенств (2.25). Необходимо при этом учитывать, что переставив данную работу в конец, мы получаем другое расписание, и для него необходимо пересчитать значения $Y_1, \dots, Y_{n-1}$. С этими новыми значениями необходимо перейти в цикле на п. 3. Так мы идем по

расписанию S^* с конца до первой работы в цикле. Если при этом встречаются работы, для которых неравенства (2.25) выполняются, то переносим их в расписание S^{**} , наращивая список определенных работ с хвоста расписания.

7) Если расписание S^{**} сформировано с учетом ограничений по времени выполнения работ на основе оптимального расписания Джонсона, то «Конец алгоритма».

Если несколько работ в результате замен окажутся в начале расписания, но любое упорядочивание для них не приводит к выполнению неравенств (2.25), то между агентами, управляющими работами возникает конфликт на общих ресурсах и средствах. Переходим на п. 8.

8) Пусть множество C представляет собой множество работ, каждая из которых выходит за предельное время своего выполнения T_k , либо при ее размещении появляется время простоя, превышающее оптимальное. **Примем для данных работ размещение в порядке, в котором они идут в алгоритме Джонсона.** При этом время прохождения работ будет оптимально, но могут появиться отдельные **штрафы за просрочку** выполнения некоторых работ. В любом случае суммарные штрафы будут не больше, чем при алгоритме Джонсона. Определим сумму максимально возможного штрафа за просрочку выполнения работы – Q_k . Определим реальный штраф за просрочку выполнения работы – R_k . Расписание составлено, «Конец алгоритма».

Пример. Пусть исходные данные представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10. Исходные данные для задачи.

Обозначение работы	Время на выполнение 1-го этапа работы 1-ым множеством ресурсов и средств, A_i	Время на выполнение 2-го этапа работы 2-ым множеством ресурсов и средств, B_i	Ограничение времени выполнения работы, T_i	Штраф за превышение времени выполнения работы, Q_i
a	5	2	11	1
b	2	3	19	1
c	0	6	25	3
d	8	1	27	3
e	3	2	8	4

Составим план выполнения работ (расписание) в соответствии с алгоритмом Джонсона с учетом ограничения по времени для каждой работы:

$$1) A = \{A_i\} = \{a(5), b(2), c(0), d(8), e(3)\}, B = \{B_i\} = \{a(2), b(3), c(6), d(1), e(2)\}.$$

Т.к. исходные данные в примере совпадают с исходными данными из примера в разделе 2.5.5, то можно воспользоваться результатом этого примера: оптимальное расписание по Джонсону: $S^* = \{c, b, e, a, d\}$. В соответствии с алгоритмом, приведенном в данном разделе, учтем ограничения по времени выполнения работ T_i . Для этого проведем расчет Y_J [142] по формуле:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i : \quad (2.26)$$

$$Y_1 = 0;$$

$$Y_2 = 0+2-6 = -4;$$

$$Y_3 = 0+2+3-6-3 = -4;$$

$$Y_4 = 0+2+3+5-6-3-2 = -1;$$

$$Y_5 = 0+2+3+5+8-6-3-2-2 = 5.$$

$$\sum_{i=1}^J X_i = \max(Y_1, Y_2, \dots, Y_J). \quad (2.27)$$

$$X^*=5.$$

Для $J=5$: $\sum_{i=1}^J X_i = \max(0, -4, -3, -1, 5) = 5$, т.е. суммарное время простоя в

расписании $S = \{c, b, e, a, d\}$ равно 5. Время простоя для количества исследуемых работ в множестве $J=5$, можно занести в таблицу 2.11.

Таблица 2.11. Время простоя по работам.

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
5	5
4	0
3	0
2	0
1	0

2) Цикл по номеру работы в расписании $S^* = \{c, b, e, a, d\}$, начиная с конца.

2а) $J=5$.

2а1) Цикл – последняя в S^* работа – d . Проверим ограничение по времени

T_i . Неравенство: $\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$, $(6+3+2+2+1)+5=19$, $19 \leq 27$ – неравенство выполняется. Неравенство $\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$, $5 \leq 5$ также выполняется.

Если неравенства выполнены, то $J=J-1$. Целевое расписание, $S^{**} = (, , , d)$.

2b) $J=4$.

2b1) $S = \{c, b, e, a\}$. Неравенство: $\sum_{i=1}^4 B_i + \sum_{i=1}^4 X_i \leq T_i$, $(6+3+2+2)+0=13$, $13 \leq 11$ –

неравенство не выполняется. Раз неравенство не выполнилось, переставляем последним предыдущий элемент e .

2b2) $S = \{c, b, a, e\}$, рассчитаем для этого расписания Y_i (таблица 2.12):

Таблица 2.12. Время простоя по работам.

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
4	0
3	0
2	0
1	0

$$Y_1 = 0;$$

$$Y_2 = 0+2-6 = -4;$$

$$Y_3 = 0+2+5-6-3 = -2;$$

$$Y_4 = 0+2+5+3-6-3-2 = -1.$$

Неравенство: $\sum_{i=1}^4 B_i + \sum_{i=1}^4 X_i \leq T_i$ для элемента e : $(6+3+2+2)+0=13$, $13 \leq 8$ –

неравенство не выполняется. Раз неравенство не выполнилось, переставляем последним предыдущий элемент b .

2b3) $S = \{c, e, a, b\}$, рассчитаем для этого расписания Y_i (таблица 2.13):

Таблица 2.13. Время простоя по работам.

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
4	0
3	0
2	0
1	0

$$Y_1 = 0;$$

$$Y_2 = 0+3-6 = -3;$$

$$Y_3 = 0+3+5-6-2 = 0;$$

$$Y_4 = 0+3+5+2-6-2-2 = 0.$$

Неравенство: $\sum_{i=1}^4 B_i + \sum_{i=1}^4 X_i \leq T_i$ для элемента b : $(6+2+2+3)+0=13$, $13 \leq 19$ –

неравенство выполняется. Неравенство $\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$, $0 \leq 5$ также выполняется.

Значит, целевое расписание, $S^{**} = (, , , b, d)$.

2с) $J=3$.

2с1) $S = \{c, e, a\}$. Неравенство: $\sum_{i=1}^3 B_i + \sum_{i=1}^3 X_i \leq T_i$ для элемента a :

$(6+2+2)+0=10$, $10 \leq 11$ – неравенство выполняется. $0 \leq 5$ также выполняется.

Значит, целевое расписание, $S^{**} = (, , a, b, d)$.

2с2) $S = \{c, e\}$.

Неравенство: $\sum_{i=1}^3 B_i + \sum_{i=1}^3 X_i \leq T_i$ для элемента e : $(6+2)+0=8$, $8 \leq 8$ – неравенство

выполняется. $0 \leq 5$ также выполняется.

Значит, целевое расписание, $S^{**} = (, e, a, b, d)$.

2с3) $S = \{c\}$. Значит, целевое расписание, $S^{**} = (c, e, a, b, d)$.

3) Составим диаграмму Ганта (см. таблицу 2.14).

Таблица 2.14. План выполнения работ (расписание).

t, дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A	e			a				b		d									
B	c						e		a		b								d
T						25		8		11			19						27
Q						3		4		1			1						3
R						0		0		0			0						0

Таким образом, мы построили расписание S^{**} с учетом ограничений по времени выполнения каждой работы. Суммарное время выполнения работ – 19 дней, также как в расписании Джонсона S^* . Т.е. алгоритм обеспечил *оптимальное* время выполнения работ. При этом ни одна работа не превысила контрольное время выполнения и штраф равен нулю. В классическом расписании Джонсона (п.

2.5.5) S^* штраф составляет 5 единиц из 12 возможных.

Вывод: предложенный алгоритм обеспечивает наименьшую длительность прохождения работ в условиях ограничений по времени выполнения каждой работы, а также их выполнение с минимизацией штрафа. В связи с этим будем использовать данный алгоритм для практических задач составления планов выполнения работ на производственных предприятиях.

Далее необходимо проведение сравнения разработанного алгоритма Джонсона с учетом ограничения по времени с аналогами.

2.5.7 Сравнение алгоритма с учетом ограничения по времени с аналогами

Анализ библиографических источников показал, что, несмотря на исследования ряда авторов [186–189], примеров доработки классического алгоритма Джонсона условиями ограничения на время выполнения работ практически не существует, хотя данная задача имеет большой практический интерес (аналогичный вывод сделан Юрием Александровичем Заком в [190]: «Исследованию математических свойств таких задач не уделялось должного внимания в литературе»). Наиболее близким аналогом разработанного авторами данной работы алгоритма, является метод Ю.А. Зака [190, 191]. При этом у авторов данной работы и у Ю.А. Зака различен подход к решению задачи. Проведем анализ данных алгоритмов.

1. В разработанном авторами работы алгоритме основным требованием является обеспечение оптимального (по Джонсону) расписания работ, т. е. алгоритм обеспечивает в заданных условиях минимально возможное время выполнения работ. Суть алгоритма:

- на первом шаге находится классическое оптимальное по Джонсону расписание;
- на втором шаге накладываются ограничения по времени, при этом при создании нового расписания путем особых перестановок общее время выполнения работ не ухудшается;

- если во время работы алгоритма выясняется невозможность выполнения ограничения по времени для какой-то работы, то в расписание вводится штраф, в соответствии с определенной штрафной функцией.

Таким образом, по завершении работы алгоритма гарантировано построение оптимального по времени расписания с возможным штрафом за просроченное выполнение отдельных работ. При этом работа агента по данному алгоритму не требует остановки для принятия дополнительных решений в случае несовместности системы.

Суть алгоритма Ю.А. Зака [190, 191]:

- строится расписание, удовлетворяющее ограничениям на сроки выполнения работ (первой ставится работа, которая должна быть выполнена первой, и т.д.);

- если во время работы алгоритма выясняется невозможность выполнения ограничения по времени для какой-либо работы, то предлагается корректировка ограничения (на вычисленную величину), либо признание задачи невыполнимой;

- при удовлетворении ограничений на сроки выполнения работ происходит поиск оптимального по времени расписания с помощью метода эффективного отсеивания неоптимальных вариантов.

Таким образом, по завершении работы алгоритма гарантировано построение расписания с ограничениями по срокам выполнения задач (с корректировками ограничений при невозможности их выполнения), либо признание задачи невыполнимой.

Для демонстрации отличия алгоритмов в п. 4.3 и Приложении 7 данной работы проведен экспериментальный расчет расписания по алгоритму Ю.А. Зака. По результатам данного расчета было получено расписание с большим общим временем выполнения работ, чем в разработанном авторами данной работы алгоритме, но с меньшим размером штрафа за просрочку выполнения отдельных работ и меньшим количеством просроченных работ. Таким образом, алгоритм Ю.А. Зака не обеспечивает оптимальное время выполнения работ. Данный эксперимент полностью подтверждает описанные выше различия в методах.

2. В отличие от алгоритма Ю.А. Зака, разработанный авторами работы алгоритм не предусматривает отсеивание недопустимых расписаний (не укладывающихся в определенные времена выполнения работ). Производятся особым способом перестановки в расписании, полученном «по Джонсону».

3. В отличие от алгоритма Ю.А. Зака, в разработанном авторами работы алгоритме под ограничениями понимаются некие объективные ограничения среды (производственные циклы, договорные условия и т. п.), которые нельзя изменить. В связи с этим, при превышении времени выполнения работы на расписание накладывается штраф. У Ю.А. Зака в этой ситуации допускается корректировка ограничения по времени таким образом, чтобы оно стало «минимально допустимым».

4. В отличие от алгоритма Ю.А. Зака, разработанный авторами работы алгоритм в любом случае гарантирует агенту построение расписания, а значит подходит для использования в системе распределения ресурсов и формирования коалиций.

5. Алгоритм Ю.А. Зака разработан для системы из m машин. Разработанный авторами работы алгоритм применим для системы из 2–х машин.

Вывод: разработанный авторами данной работы алгоритм имеет ряд специфических особенностей, отличающих его от алгоритма Ю.А. Зака. Новый алгоритм разработан для «оснащения» агента механизмом составления оптимальных планов выполнения работ (в рамках Коалиционной модели МППР, для задачи из 2–х машин) и необходимости решения конкретной практической задачи (рассмотренной в Главе 4 настоящей работы).

2.6 Методика проектирования системы распределения ресурсов и формирования коалиций

2.6.1 Алгоритм жизненного цикла коалиции

Основным алгоритмом, описывающим работу Коалиционной модели является алгоритм жизненного цикла коалиции. Графически алгоритм представлен на рисунках 2.7 (часть 1) и 2.8 (часть 2).

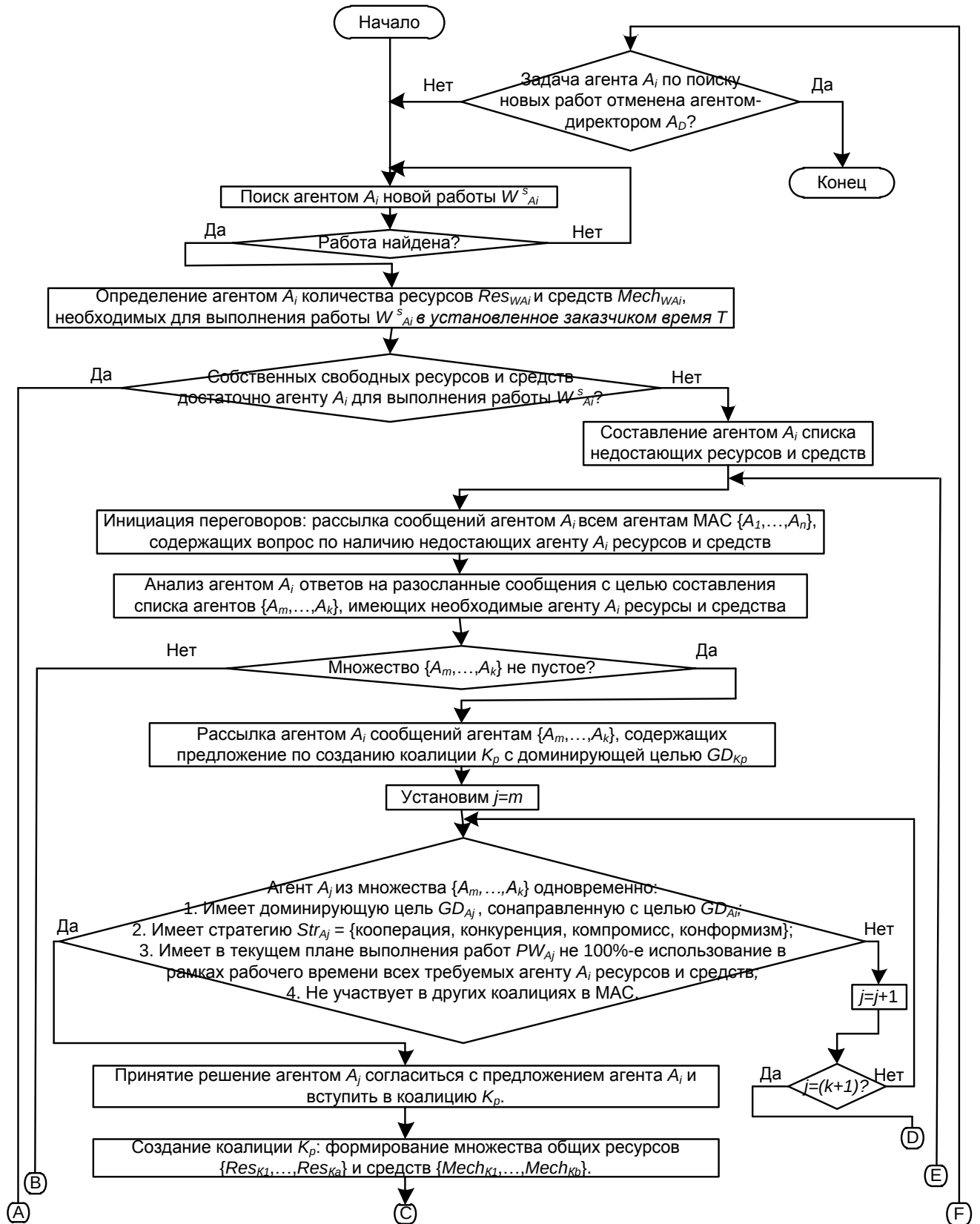


Рисунок 2.7 – Алгоритм жизненного цикла коалиции (часть 1)

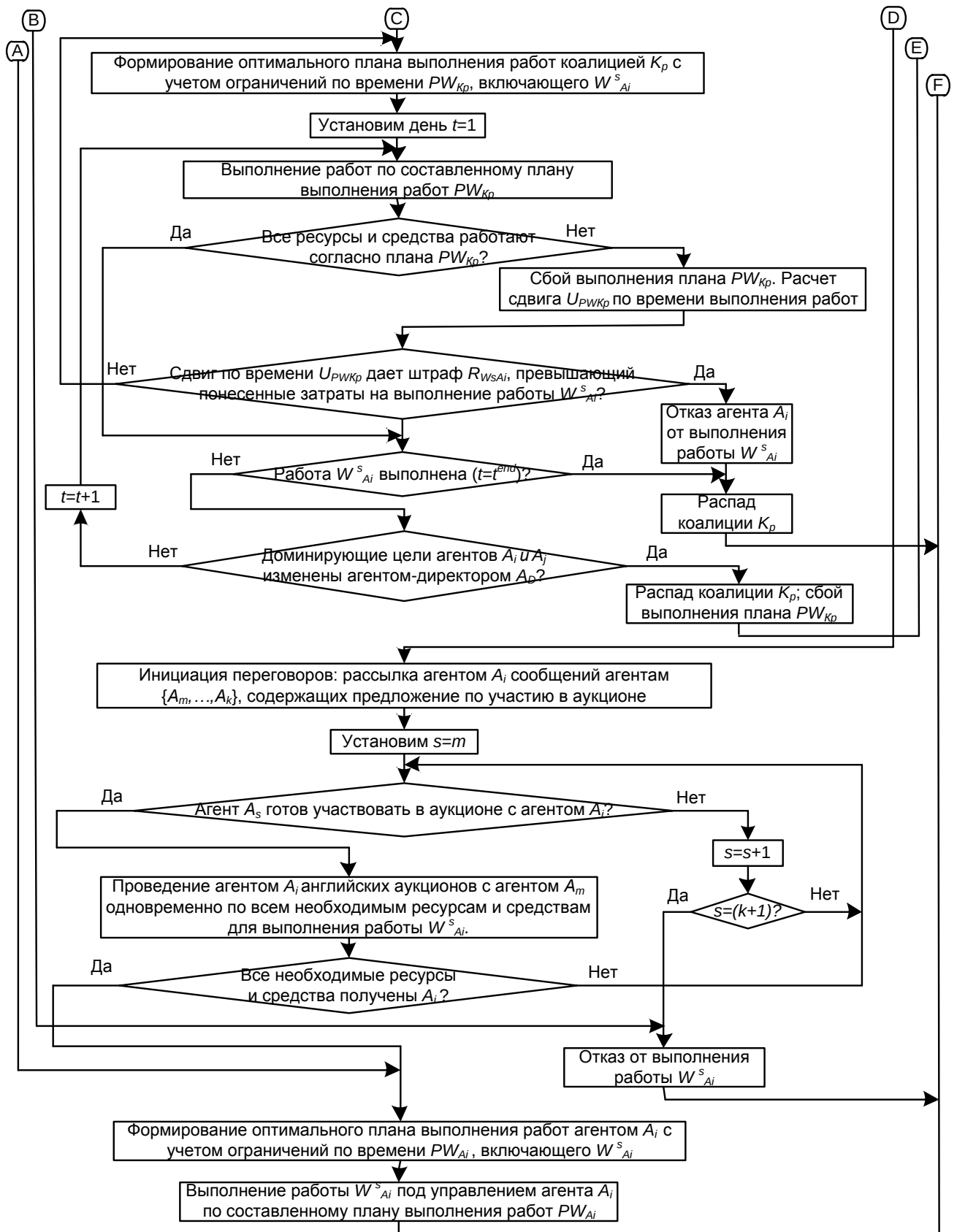


Рисунок 2.8 – Алгоритм жизненного цикла коалиции (часть 2)

2.6.2 Алгоритмы проведения аукционов

В разделе рассматриваются методики английского и обратного аукционов. Выбор данных типов аукционов связан с выводом о возможности их применимости для предметной области МППР.

Английский аукцион (см. рисунок 2.9) проводится среди агентов, ожидающих ресурс. Аукцион может быть организован при появлении в системе свободного ресурса. Аукцион проводится среди всех агентов, подавших к этому моменту заявки на ресурс, т.е. ожидающих его.

Торги проводятся один раз, победителем аукциона становится агент, предложивший наибольшую цену за данный ресурс (первую цену). Если в системе осталась часть ресурса, то она отдается агенту, предложившему вторую цену, и т. д. Если весь свободный ресурс в системе закончился, но имеются неудовлетворенные заявки от агентов, то эти агенты присоединяются к множеству агентов, ожидающих поступления нового ресурса.

Взаимодействие агентов с ресурсами в этом случае организовано следующим образом. Запросы агентов на ресурс Res с атрибутами $a_1, a_2, \dots, a_n$ поступают в МАС. Если данный ресурс с запрошенными атрибутами имеется, он тут же предоставляется агенту. Если данного ресурса с запрошенными атрибутами нет в наличии, МАС принимается заявка на ресурс.

Когда свободный ресурс появляется в МАС, анализируется число заявок n .

1) $n=1 \Rightarrow$ отдаем ресурс, добавляем агента–кандидата в хозяева.

2) $n=0 \Rightarrow$ ресурс остается свободным.

3) $n>1 \Rightarrow$ при появлении ресурса проводится английский аукцион, отдаем ресурс, добавляем агента–победителя в хозяева. Анализируем свободный остаток ресурса, проверяем, достаточен ли он для удовлетворения заявки со второй ценой. Если достаточен, отдаем ресурс, добавляем агента со второй ценой в хозяева. Если недостаточен, проверяем, достаточен ли для заявки с третьей ценой и т.д.

Таким образом, обеспечивается наиболее полное и оперативное распределение ресурса среди ожидающих его агентов. Причем, аукцион при

появлении ресурса в системе проводится только один раз. Неудовлетворенные заявки ожидают нового появления ресурса в системе.

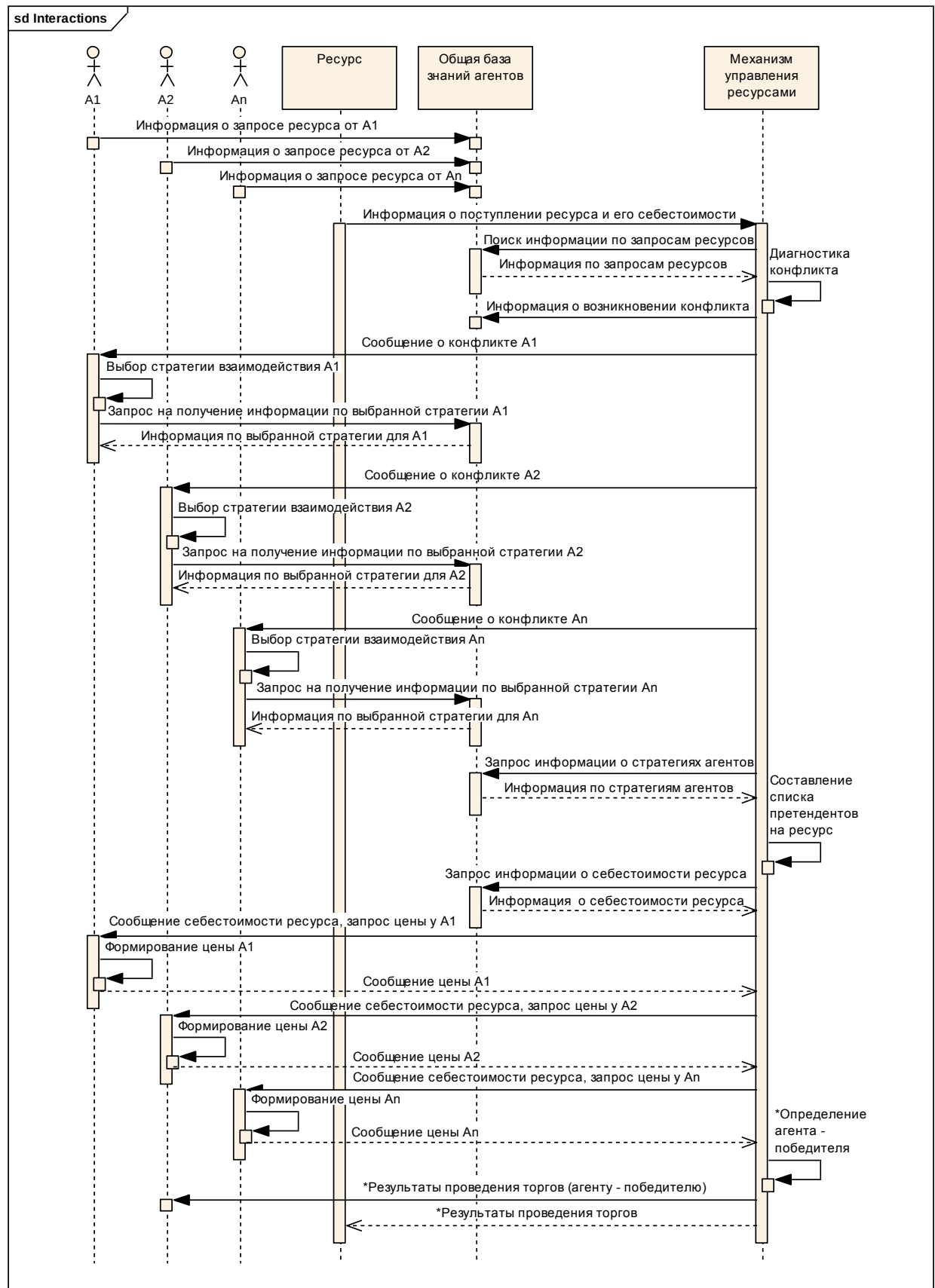


Рисунок 2.9 – Диаграмма последовательности проведения английского аукциона

Пусть агенты A_1, A_2, A_4 подают заявки на ресурс Res_i . Пусть в момент времени t_1 в МАС появился свободный ресурс Res_i (см. рисунок 2.10), тогда

$$Res_i = \langle \sigma_1, \sigma_2, \sigma_4 \rangle, \quad (2.28)$$

где: σ – заявка на ресурс от агентов A_1, A_2, A_4 ; $\sigma_i = \langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$,

где: $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ – атрибуты заявки, в т. ч.: a_1 – стоимость ресурса; a_2 – приоритет агента; и т.д.

Пусть в результате английского аукциона победил агент A_4 , он получил ресурс Res_i , его заявка закрыта.

Далее, агент A_3 подал заявку на ресурс Res_i . Пусть в момент времени t_2 в МАС появился свободный ресурс Res_i , тогда $Res_i = \langle \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \rangle$. Пусть в результате английского аукциона победил агент A_2 , он получил ресурс Res_i , его заявка закрыта. Но ресурс Res_i еще не исчерпан, тогда обслуживается следующая по аукционной цене заявка от агента A_3 . Таким образом, в ожидании ресурса Res_i остается только агент A_1 .

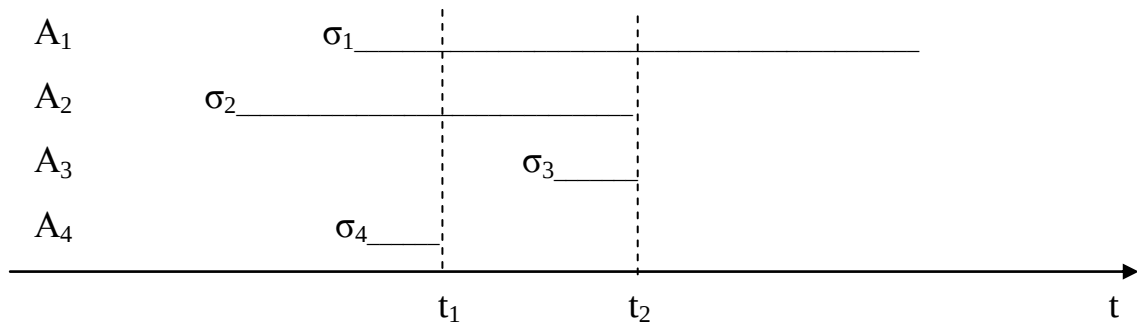


Рисунок 2.10 – График поступления заявок на ресурс от агентов

Обратный аукцион (см. рисунок 2.11) целесообразно проводить в случае, когда агент претендует на ресурс, уже занятый другими агентами. В этом случае агенты – владельцы либо отказывают, либо предлагают цену, за которую они могут уступить ресурс. Торги проводятся один раз, агент–претендент выбирает минимальную цену из всех цен, предложенных другими агентами. На рисунке 2.10. агенты $\langle A_2, \dots, A_n \rangle$ являются владельцами ресурса Res_i , а агент A_1 – претендентом на ресурс Res_i .

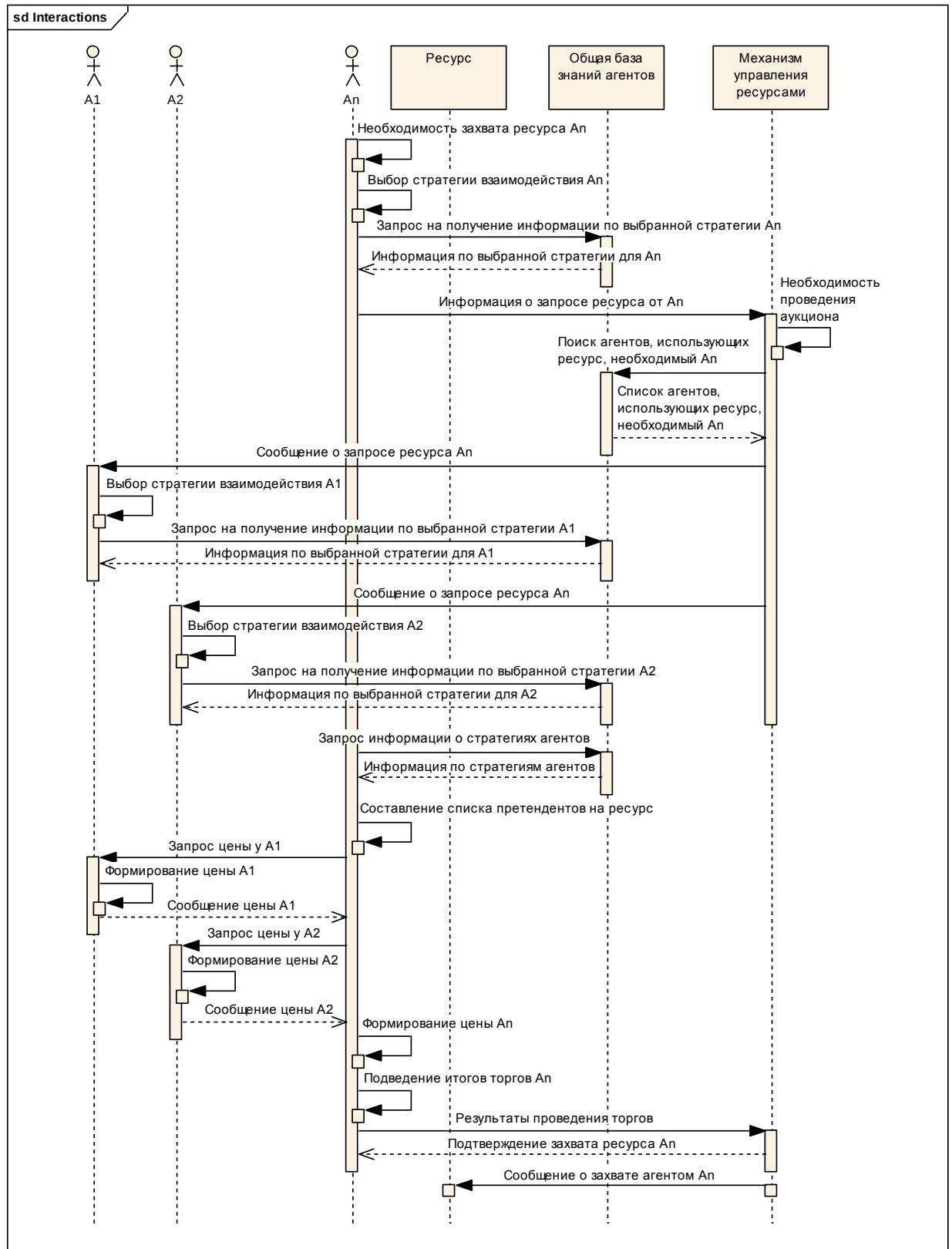


Рисунок 2.11 – Диаграмма последовательности проведения обратного аукциона

Выводы по главе 2

1. Установлены требования для Коалиционной модели МППР. Проведен сравнительный анализ математических моделей, позволяющих описывать МППР, и определена ниша Коалиционной модели МППР.

2. Разработана Коалиционная модель МППР. Проверка адекватности модели показала, что проанализированные аналоги не обеспечивают всех установленных требований.

3. Проведен анализ методов разрешения конфликтов между агентами и сделан вывод, что для предметной области МППР подходят методы английского и обратного аукционов.

4. Проведен анализ методов теории составления расписаний. В качестве основы алгоритма для решения задачи составления планов выполнения работ выбран метод случайного поиска. Для системы из двух множеств ресурсов и средств (2-х машин) выбран метод на основе теоремы Джонсона.

5. Разработан алгоритм составления оптимальных расписаний выполнения работ агентами (на основе теоремы Джонсона), учитывающий ограничения по времени выполнения каждой из работ.

6. Проведено сравнение разработанного алгоритма с наиболее близким аналогом – алгоритмом Ю.А. Зака. Сделан вывод о наличии у разработанного алгоритма ряда специфических особенностей, отличающих его от алгоритма Ю.А. Зака.

7. Разработаны алгоритмы для предметной области ППР: мультиагентного моделирования, разрешения конфликтов в МАС, захвата ресурсов и средств агентами, проведения аукционов между агентами, жизненного цикла коалиции.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ И ФОРМИРОВАНИЯ КОАЛИЦИЙ

3.1 Структура системы

Для разработки jSIM [6,10,14,192–196] необходимо провести описание ее функций и далее описать схему функциональной интеграции с СИМ BPSim2.

Цель создания системы jSIM: развитие механизма взаимодействий агентов в СИМ BPSim2 и введение методов формирования коалиций [5,11,12].

Требования к системе jSIM. Система представляет собой конструктор, позволяющий описать реализацию методов взаимодействий агентов непрограммирующим пользователем. Конструктор содержит следующие объекты: коалиция, агент, ресурс, средство. При определении метода взаимодействия, пользователь устанавливает необходимые объекты и формирует алгоритм их взаимодействия путем установки связей между объектами, образующими UML–диаграмму последовательности [15]. Конструктор включает возможности сохранения и загрузки методов, разработанных пользователем.

Система jSIM включает готовые методы (шаблоны), которые можно загружать и изменять:

- 1) на основе использования стратегий (методов) взаимодействий (кооперация, конкуренция, компромисс, конформизм);
- 2) на основе организации аукционов: английского, обратного.

При переходе из одного состояния в другое агент может воспользоваться одним из доступных методов. Пространство методов агента создается при помощи конструктора агентов. Методы агента описываются в виде блок–схем, причем для каждого функционального блока требуется задание параметров выполнения. При таком подходе непосредственно программирование будет сведено к минимуму, что увеличит наглядность метода для непрограммирующих пользователей.

Все алгоритмы взаимодействия, которые предполагается реализовывать,

необходимо задавать с использованием правила «если–то» для того, чтобы конкретный пользователь не задавался вопросом их реализации.

3.2 Функции системы

Для системы jSIM можно выделить следующие основные функции:

- 1) визуализация процесса моделирования в виде диаграммы последовательности, ведение истории действий агентов и коалиций;
- 2) обмен сообщениями между агентами;
- 3) формирование коалиций;
- 4) проведение аукционов между агентами;
- 5) составление планов выполнения работ по методу Джонсона с учетом ограничения выполнения каждой работы по времени;
- 6) управление запуском, скоростью и остановом моделирования;
- 7) возможность подключения к внешней базе данных для получения информации о свойствах агентов и коалиций, их стратегиях.

Система jSIM интегрирована с СИМ BPSim2 с целью получения данных о построенной модели и свойствах агентов. Схема функциональной интеграции систем представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема функциональной интеграции jSIM и BPSim2

Для реализации данных функций необходима разработка методов

взаимодействия агентов и языка взаимодействия.

3.3 Принципы построения системы

3.3.1 Разработка языка взаимодействия агентов

Для передачи сообщений между агентами будем использовать тип сообщений ACL (Agent Communication Language), используемый в стандарте FIPA. В таблице 3.1 представлена структура полей сообщения ACL стандарта FIPA.

Таблица 3.1. Структура полей сообщения ACL стандарта FIPA.

Параметр	Категория параметра
Performative	Тип коммуникативных действий
Sender	Участник коммуникации
Receiver	Участник коммуникации
Reply-to	Участник коммуникации
Content	Содержание сообщения
Language	Описание содержания
Encoding	Описание содержания
Ontology	Описание содержания
Protocol	Управление коммуникацией
Conversation-id	Управление коммуникацией
Reply-with	Управление коммуникацией
In-reply-to	Управление коммуникацией
Reply-by	Управление коммуникацией

Стандарт FIPA позволяет использовать часть полей сообщения ACL. В разработанной модели из структуры сообщения ACL используются следующие поля.

1. Выполняемое действие (performative). В модели всегда имеет значение – request (запрос).
2. Отправитель (sender). Это поле автоматически заполняется при создании сообщения.

3. Адресат (receiver). Это поле может содержать несколько адресатов. Адресат задается именем агента и системы, в которой он функционирует (MyName@MySystem).

4. Тело сообщения (content). Содержит данные в зависимости от вида сообщения. Агент, получив такое сообщение, обрабатывает его в соответствии с заданным алгоритмом. Далее он формирует новое сообщение или выполняет какой-либо алгоритм.

5. Вид сообщения (conversation-id). Служит для интерпретации содержания сообщения.

В стандарте FIPA для передачи сообщений типа ACL между агентами используется LISP-подобный язык FIPA Semantic Language (SL). Для предметной области МППР необходима разработка **расширения языка FIPA SL** вследствие отсутствия его адаптации к предметной области МППР. Виды сообщений, формирующие расширение языка FIPA SL (разработанное в рамках данной работы), представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Виды сообщений расширения языка FIPA SL для МППР

Вид сообщения	Назначение	Параметры тела сообщения	Расшифровка параметров
PERFORM	задание агенту на выполнение работы	Agent Work	Имя агента Описание работы
ASK	вопрос от агента	Agent Price Value Time Resource	Имя агента Цена ресурса Количество ресурса Время использования Наименование ресурса
INFORM	ответ от агента	те же, что в «ASK»	те же, что в «ASK»
OFFER	сообщения механизма разрешения конфликта на общих ресурсах по проведению аукциона	те же, что в «ASK»	те же, что в «ASK»
DOP	предложения агентов по цене ресурса в аукционе	Agent Price_N Resource	Имя агента Предлагаемая цена ресурса_номер предл-я Наименование ресурса
DECISION	сообщ-я мех-ма разрешения конфликта на общих ресурсах по аукциону	те же, что в «ASK»	те же, что в «ASK»
POST	запись результатов распределения ресурсов в общую базу знаний	те же, что в «ASK»	те же, что в «ASK»

Таким образом, разработано расширение языка FIPA Semantic Language для взаимодействия агентов в рамках функционирования МППР. Далее необходима программная реализация разработанного языка в системе jSIM.

3.3.2 Программная реализация языка взаимодействия агентов

В разрабатываемой системе за каждым объектом типа «агент» закреплены два массива. В первый из них заносятся исходящие сообщения, во второй – входящие. Также за каждым агентом закреплены две переменные, хранящие число входящих сообщений и число отправленных сообщений. Сообщение представляет собой запись следующей структуры:

m_agent: string – имя агента отправителя;
 m_type: string – тип сообщения; m_content:
 string – содержимое сообщения;
 m_state: byte – состояние в котором сообщение прибывает в данный момент.

Для отправки сообщения каким либо агентом необходимо вызвать функцию «FIPA(<to>, <type>, <content>)», которая отправляет сообщение агенту «to», типа «type», содержащее «content». В поле «to» необходимо указать имя агента которому адресуется данное сообщение. В поле «type» указывается тип сообщения: Ask (вопрос), Inform (ответ), Perform (поручение), Prop (предложения по цене ресурса\средства).

Функция FIPA выполняет следующие действия:

1. ищет агента – получателя;
2. увеличивает его счетчик входящих сообщений;
3. заносит сообщение в массив входящих сообщений;
4. устанавливает состояние входящего сообщения в «0»;
5. увеличивает счетчик исходящих сообщений агента–отправителя;
6. заносит сообщение в массив исходящих сообщений агента–отправителя;
7. устанавливает состояние исходящего сообщения в «0».

При необходимости, функция FIPA может выводить информацию в графическом виде. Для этого последним параметром надо передать в нее ссылку

на канву, в которую необходимо вывести данные.

Для работы с сообщениями типа Inform существуют три функции:

1. `buf_out(<to>, <type>)` – функция проверки сообщения на отправку, возвращает 0 либо 1 в зависимости от того, было ли отправлено сообщение типа «type» агенту «to» (0 – неотправлено; 1 – отправлено);

2. `buf_in(<from>,<type>):<str>` – функция проверки входящих сообщений, при наличии сообщения от «from», типа «type» возвращает содержание сообщения «content», иначе возвращает пустую строку;

3. `del_mess(<from>)` – функция удаления сообщения, удаляет сообщения от агента «from» из массива входящих и исходящих сообщений (`buf_in`, `buf_out`).

Таким образом, разработанное для МППР расширение языка FIPA SL применено в системе jSIM. Для обеспечения использования системы jSIM необходима ее интеграция с BPSim2.

3.3.3 Описание принципов интеграции

Для проведения интеграции системы BPSim2 и системы jSIM необходимо:

1. разработать программный интерфейс в BPSim2 для взаимодействия с библиотеками расширений;

2. в BPSim2 разработать механизм динамической загрузки разрабатываемых библиотек расширений;

3. в BPSim2 разработать механизм вызова функций из библиотек расширений (из процедур типа «если–то» или из общего реестра функций);

4. в BPSim2 доработать форму описания функций – добавить поле «Com» (см. рисунок 3.2.) для заведения команд обмена сообщениями.

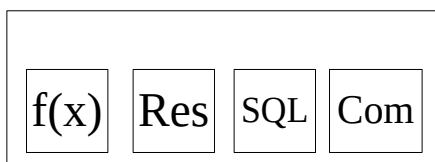


Рисунок 3.2 – Структура формы описания функций

Данные дополнения позволят решить не только текущую задачу создания библиотеки, но и упростить разработку библиотек расширений в будущем. Все

необходимые доработки минимально затронут основной алгоритм имитационного моделирования BPSim2.

Интеграция библиотеки должна осуществляться посредством дополнения исходного кода СИМ BPSim2 кодом разработанных функций и дальнейшей перекомпиляцией системы. Для этого необходимо дополнить BPSim2 следующими функциями:

1. parser_if (s : string; boss : string; del : boolean): boolean; – парсер строки условия;
2. parser_then (s : string; boss : string) : boolean; – парсер строки следствия;
3. FIPA (s : string; boss : string; sys:boolean; image : TImage); – обработка сообщений типа Perform, Cost, Ask.

Помимо исходного кода функций также необходимо добавить необходимые структуры данных, а именно переменные для каждого агента:

```

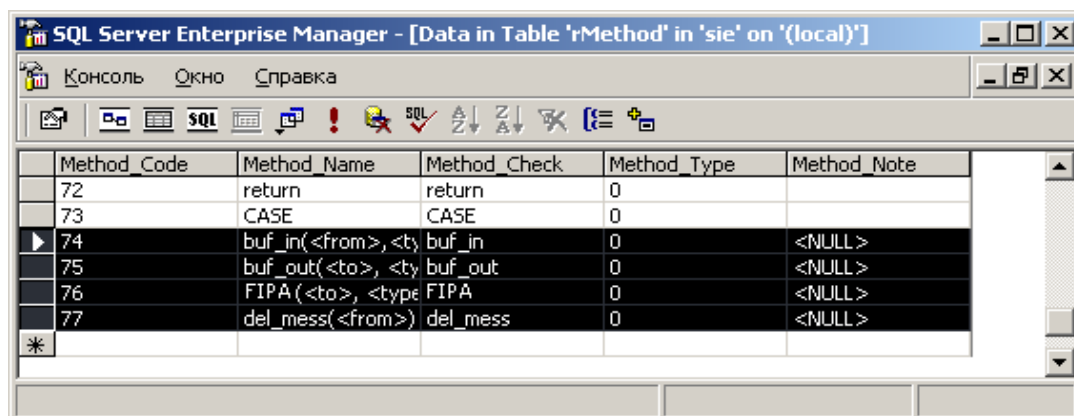
num_in      : word;      // число входящих сообщений
buf_in      : array [1..Max_Messages] of  // массив входящих сообщений
record
    m_agent   : string;    // агент отправитель
    m_type    : string;    // тип сообщения
    m_content  : string;   // содержание
    m_state   : byte;      // состояние обработки
end;

num_out     : word;      // число исходящих сообщений
buf_out     : array [1..Max_Messages] of  // массив исходящих сообщений
record
    m_agent   : string;    // агент получатель
    m_type    : string;    // тип сообщения
    m_content  : string;   // содержание
    m_state   : byte;      // состояние обработки
end.
```

Для интеграции библиотеки в машину вывода BPSim2 необходимо

обратиться к алгоритму мультиагентного моделирования, по которому работает СИМ BPsim2 (см. п. 2.7.1). Непосредственно интеграция осуществляется следующим образом:

1. Вызов функции `_FIPA` заносится в календарь. Как только какой-либо агент создал сообщение, заносим в календарь задание для агента-получателя проанализировать входящие сообщения для $SysTime = SysTime + \min(\Delta t)$. Само задание: вызвать функцию “`_ FIPA`” для A_i .
2. Проверка условий (функции: `buf_out`, `buf_in`), правила `If`, условия которых выполняются, заносим в очередь активных правил.
3. Выполнение каких-либо действий (функции: `_FIPA`, `del_mess`), если правило активно, то необходимо выполнить “*Execute (Active_Rules)*”.
4. Для того чтобы новые функции стали видны в СИМ BPsim2, необходимо занести информацию о них в базу данных. Описание используемых функций хранится в таблице `rMethod` (см. рисунок 3.3).



Method_Code	Method_Name	Method_Check	Method_Type	Method_Note
72	return	return	0	
73	CASE	CASE	0	
74	buf_in(<from>, <ty> buf_in	buf_in	0	<NULL>
75	buf_out(<to>, <ty> buf_out	buf_out	0	<NULL>
76	FIPA(<to>, <type> FIPA	FIPA	0	<NULL>
77	del_mess(<from>) del_mess	del_mess	0	<NULL>

Рисунок 3.3 – Описание используемых функций

Таким образом, для обеспечения использования системы jSIM в процессе мультиагентного моделирования проведена ее интеграция с BPsim2. Далее необходимо описание технологии работы в jSIM.

3.4 Технология работы в системе

Графический интерфейс разработанной системы jSIM (рисунок 3.4) предоставляет пользователю полную информацию о взаимодействиях агентов и приближен к интерфейсу BPsim2. При этом заведенная в BPsim2 мультиагентная

модель (визуализация и входные данные) используются в системе jSIM при ее загрузке.

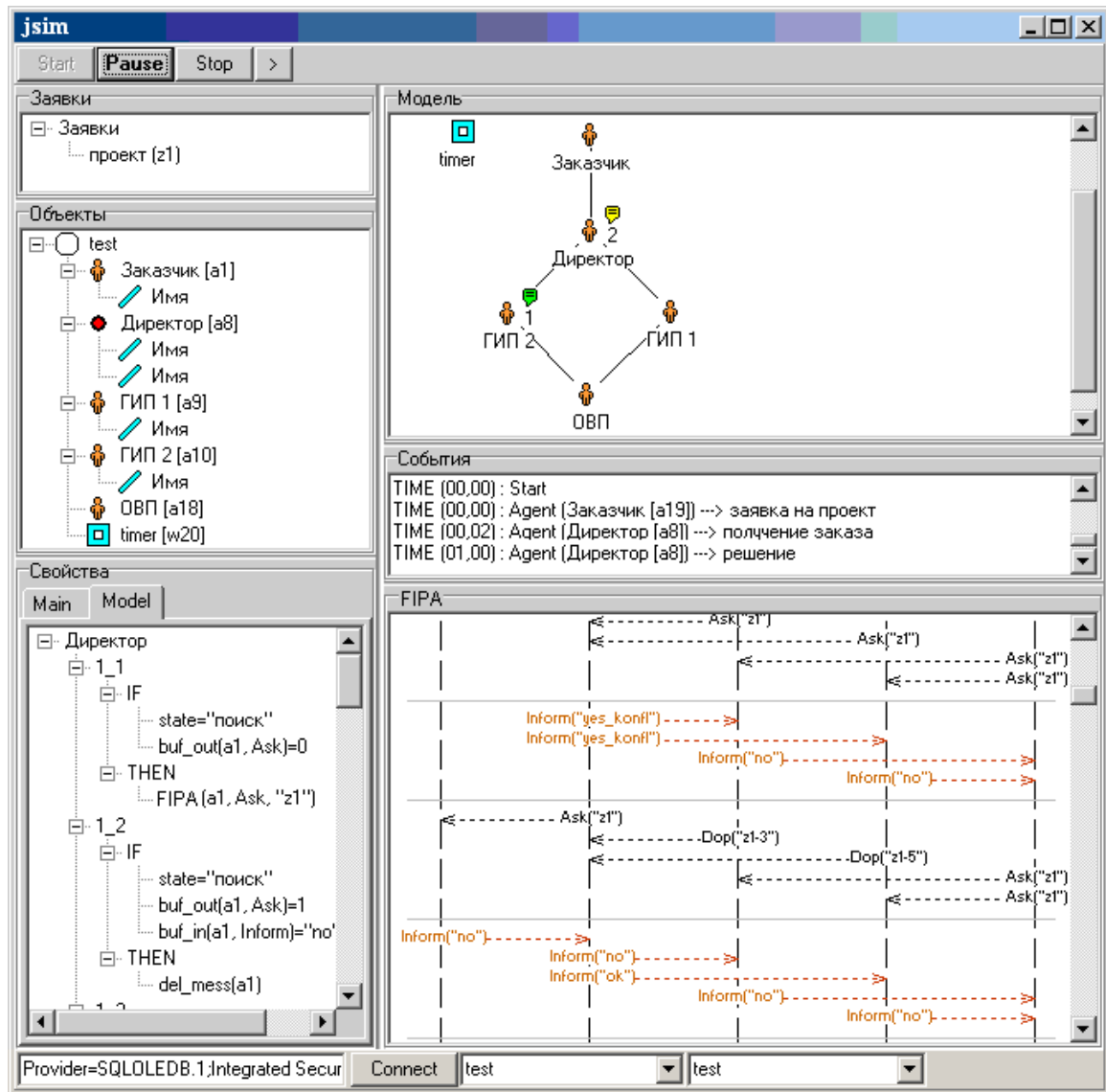


Рисунок 3.4 – Интерфейс системы jSIM

Рассмотрим подробно состав элементов в главном окне системы jSIM.

1. Заявки. В данном окне содержится список всех заявок объявленных в выбранной предметной области (ПО). Чтобы объекты модели могли работать с заявками, необходимо чтобы эти заявки были предварительно объявлены в той ПО, к которой принадлежит модель.

2. Объекты. В данном окне содержится список всех объектов модели (агенты, процессы, связи и т. д.). Представление объектов в древовидной структуре дает возможность понять, является ли объект дочерним или родительским.

3. Свойства. В поле свойства объектов есть две вкладки: «Main» и «Model». На вкладке «Main» отображается информация об имени агента, его координатах, приоритете и использовании в процессе моделирования. На вкладке «Model» отображается информация о ситуациях и соответствующих действиях агента. Если в конце стоит «(NO)», значит эта строка не будет обрабатываться в процессе моделирования. Чтобы в поле свойства появилась информация, необходимо выбрать из списка объектов того агента, по которому нужна информация.

4. Модель. В этой области динамически прорисовывается модель в ее текущем состоянии, что позволяет визуально наблюдать за процессом моделирования. Обрабатываемые заявки помечаются красным цветом. За одну итерацию до окончания обработки они помечаются желтым цветом. Заявки, помеченные зеленым цветом являются обработанными. Под всеми заявками пишется их порядковый номер.

5. События. В этом поле отображаются все события, произошедшие за время моделирования и время, когда это событие произошло (запуск/остановка моделирования, выполненные агентами действия, и т. д.).

6. Информация о переданных сообщениях представлена на рисунке 3.5.

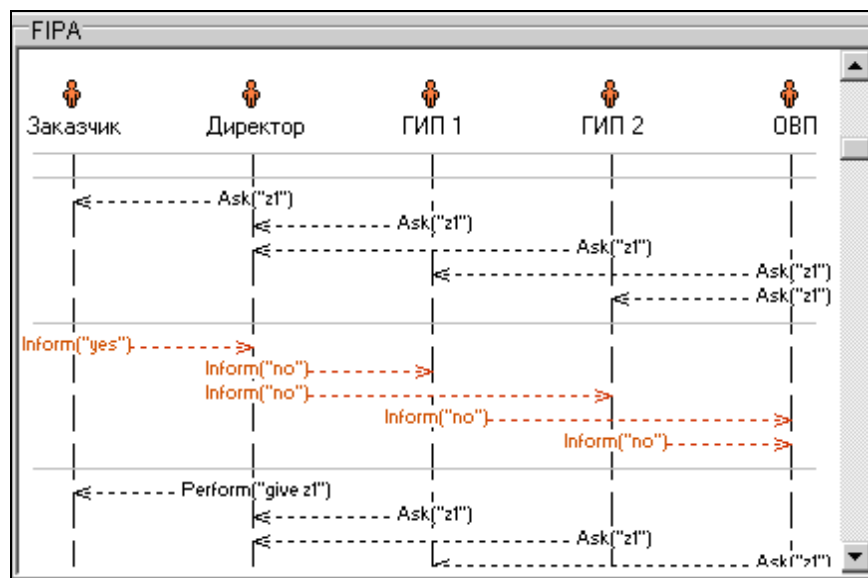


Рисунок 3.5 – Информация о переданных агентами сообщениях

В этом окне отображается информация о сообщениях, переданных

агентами, и их типах. Сообщения, отображенные красным цветом, являются автоматически сгенерированными. Сообщения, отображенные черным цветом, являются результатом взаимодействия агентов.

7. Панель управления временем моделирования представлена на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Панель управления временем моделирования

При нажатии кнопки «Start» происходит запуск моделирования. При нажатии кнопки «Pause» происходит временная остановка моделирования, при повторном ее нажатии моделирование возобновляется. При нажатии кнопки «Stop» происходит останов моделирования.

8. Панель выбора SQL сервера, предметной области (ПО) и мультиагентной модели представлена на рисунке 3.7:

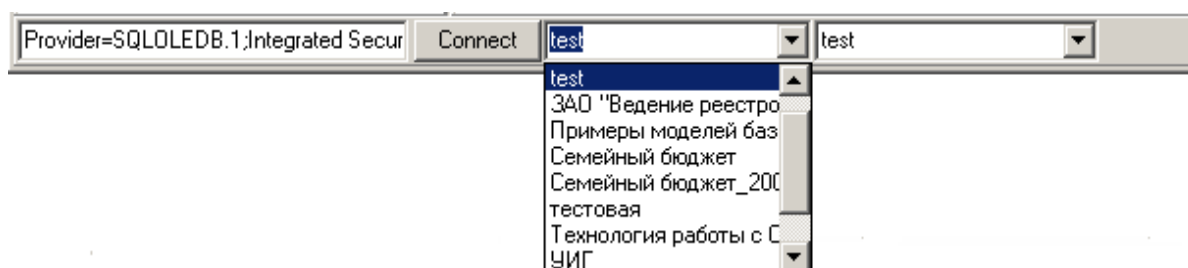


Рисунок 3.7 – Панель выбора SQL сервера, ПО и модели

Для подключения к SQL серверу необходимо изменить значение параметра «Source», присвоив ему имя необходимого сервера, и нажать на кнопку «Connect». После подключения в первой выпадающей вкладке можно будет выбрать «ПО». После этого во второй вкладке аналогичным образом можно выбрать «модель».

Выводы по главе 3

1. Разработана система мультиагентного моделирования формирования коалиций jSIM.
2. Описаны структура и функции системы jSIM.
3. На основе стандарта взаимодействия агентов FIPA разработано расширение языка FIPA Semantic Language для его адаптации к предметной

области МППР и описания взаимодействий агентов. Проведена программная реализация разработанного языка в системе jSIM.

4. Для обеспечения использования данных по формированию коалиций в процессе мультиагентного моделирования, проведена интеграция системы jSIM с системой имитационного моделирования BPsim2.

5. Описана технология работы в jSIM. Рассмотрен функционал по построению UML–диаграмм последовательности взаимодействий агентов.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Описание и схема работы теплового пункта

Тепловой пункт (ТП) представляет собой автоматизированную модульную установку, передающую тепловую энергию от внешних тепловых сетей (теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), районной тепловой станции (РТС) или котельной) к системе отопления, вентиляции или горячего водоснабжения жилищных и производственных помещений. Производство тепловых пунктов регулируется СП 41–101–95 «Проектирование тепловых пунктов» [199].

Под теплоносителем будем понимать жидкое или газообразное вещество (на практике чаще всего применяют воду), применяемое для передачи тепловой энергии. Основными задачами ТП являются:

- преобразование вида теплоносителя (газ, жидкость);
- контроль и регулирование параметров теплоносителя (температура, давление и т.д.);
- распределение теплоносителя по системам теплоснабжения;
- отключение систем теплоснабжения;
- защита систем теплоснабжения от аварийного повышения параметров теплоносителя;
- учет расходов теплоносителя и тепла.

В типичном ТП имеются следующие системы снабжения потребителей тепловой энергией:

- система горячего водоснабжения;
- система отопления;
- система вентиляции;
- система холодного водоснабжения.

ТП различаются по количеству и типу подключенных к ним систем теплоснабжения, индивидуальные особенности которых определяют тепловую схему и характеристики оборудования ТП, а также по типу монтажа и

особенностям размещения оборудования в помещении ТП. Различают следующие виды ТП [200].

1. Индивидуальный тепловой пункт (ТП). Используется для обслуживания одного потребителя (здания или его части). Как правило, располагается в подвальном или техническом помещении здания, однако, в силу особенностей обслуживаемого здания, может быть размещён в отдельностоящем сооружении.

2. Центральный тепловой пункт (ЦТП). Используется для обслуживания группы потребителей (зданий, промышленных объектов). Чаще располагается в отдельностоящем сооружении, но может быть размещен в подвальном или техническом помещении одного из зданий.

3. Блочный тепловой пункт (БТП). Изготавливается в заводских условиях и поставляется для монтажа в виде готовых блоков. Может состоять из одного или нескольких блоков. Оборудование блоков монтируется очень компактно, как правило, на одной раме. Обычно используется при необходимости экономии места, в стесненных условиях. По характеру и количеству подключенных потребителей БТП может относиться как к ТП, так и к ЦТП.

На рисунке 4.1 представлена принципиальная схема простейшего ТП; зеленым цветом отображена система горячего водоснабжения (ГВС), синим цветом – холодного водоснабжения (ХВС), светло красным цветом – система отопления жилого здания.

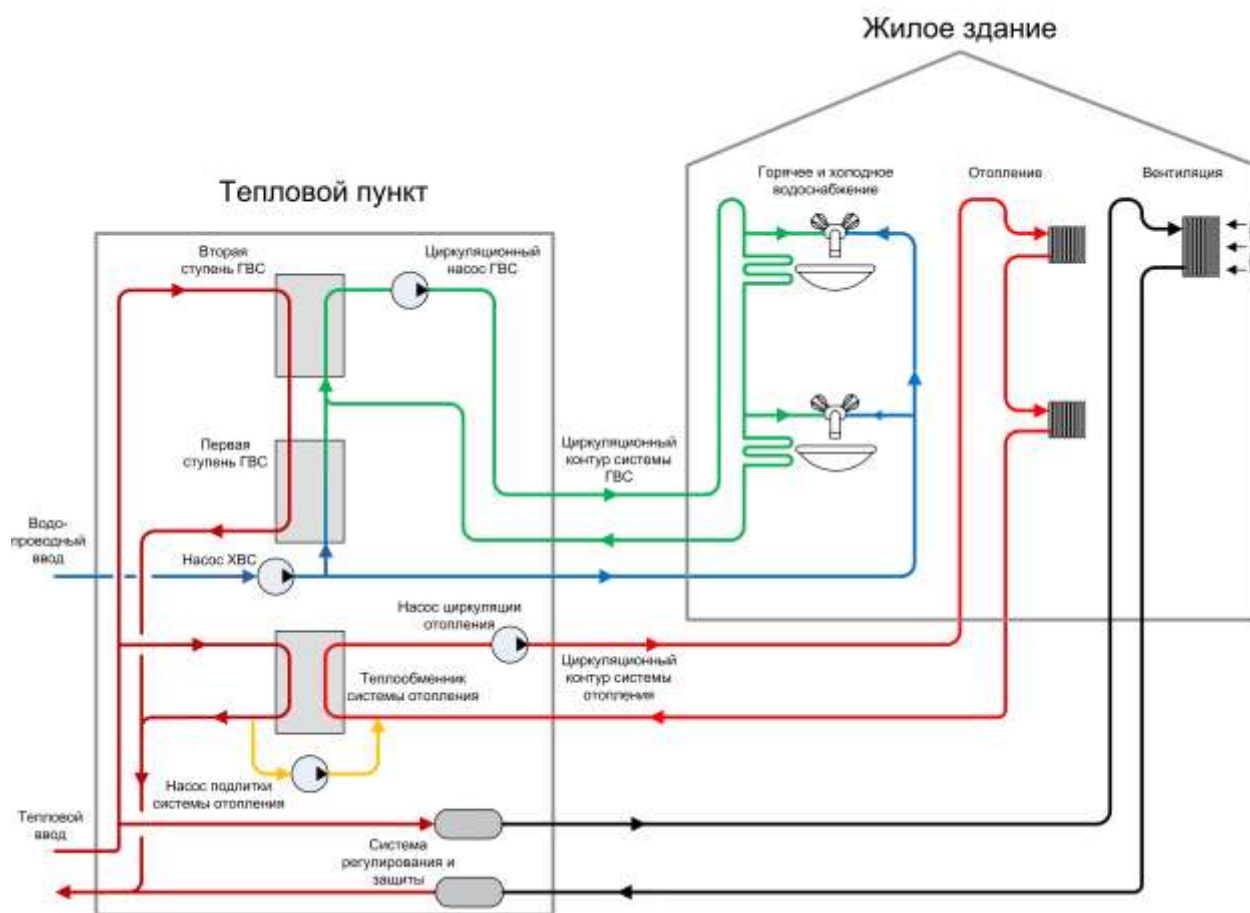


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема простейшего ТП

Важными блоками в ТП являются пластинчатые теплообменники – устройства, в которых осуществляется передача теплоты от горячего теплоносителя к холодной (нагреваемой) среде через стальные, медные, графитовые гофрированные пластины, которые стянуты в пакет (горячие и холодные слои перемежаются друг с другом) [201].

Пластинчатый теплообменник представляет собой аппарат, поверхность теплообмена которого образована из тонких штампованных гофрированных пластин. Рабочие среды в теплообменнике движутся в щелевых каналах сложной формы между соседними пластинами в противотоке. Каналы для греющего и нагреваемого теплоносителей чередуются между собой (см. рисунок 4.2). Гофрированная поверхность пластин усиливает турбулизацию потоков рабочих сред и повышает коэффициент теплоотдачи [202].

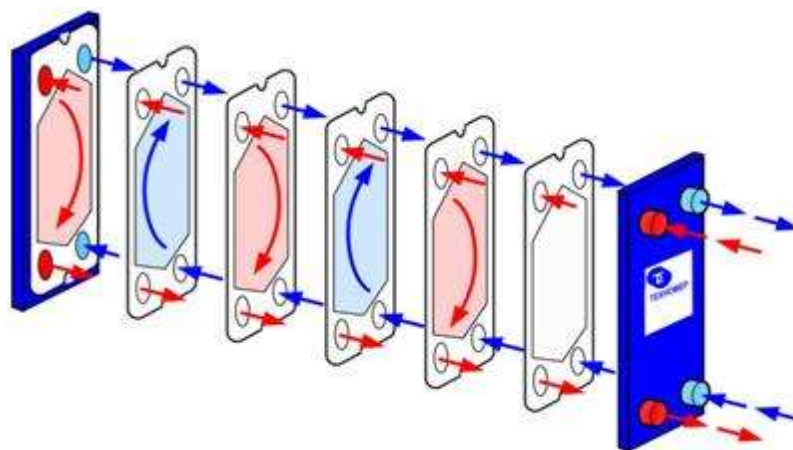


Рисунок 4.2 – Принцип работы пластинчатого теплообменника

Контурная резиновая прокладка (см. рисунок 4.3) охватывает два угловых отверстия, через которые проходит поток рабочей среды в межпластинный канал и выходит из него, а через два других отверстия, изолированных дополнительно кольцевыми уплотнениями, встречный поток проходит транзитом. Вокруг этих отверстий имеется двойная прокладка, которая гарантирует герметичность каналов. Уплотнительные прокладки крепятся к пластине таким образом, что после сборки и сжатия пластины, в аппарате образуются две системы герметичных межпластинных каналов, изолированных друг от друга металлической стенкой и прокладками – одна для греющей среды, другая – для нагреваемой [202].

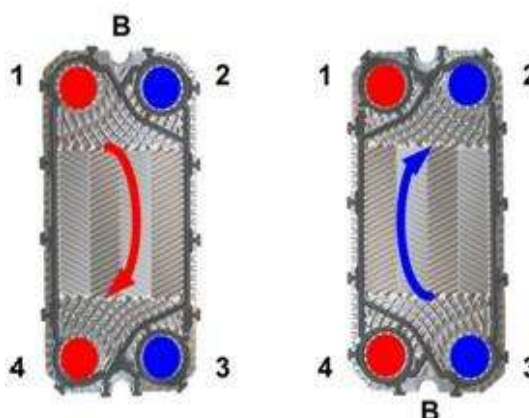
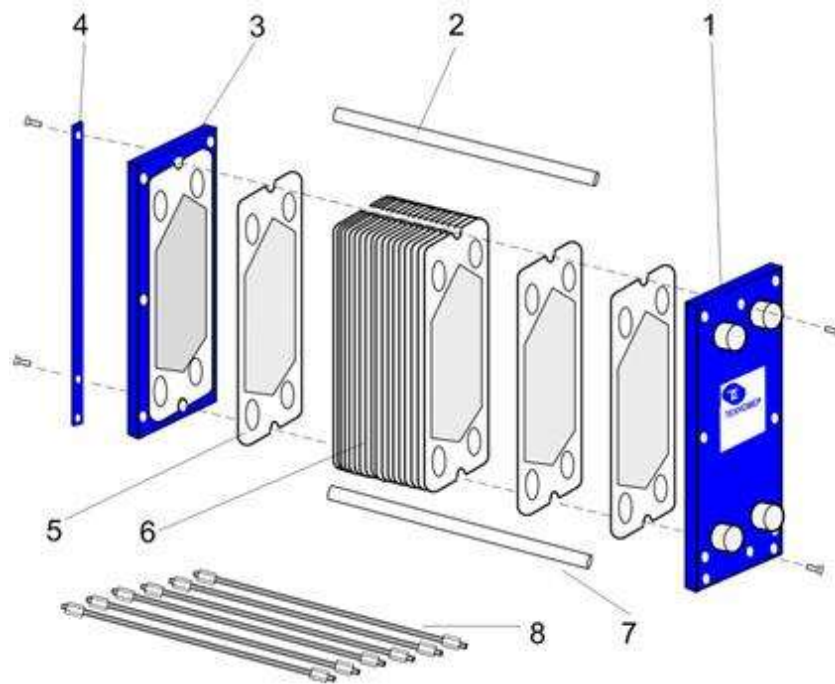


Рисунок 4.3 – Строение пластин теплообменника

Пластины собираются в пакет таким образом, что каждая последующая пластина повернута на 180° в плоскости ее поверхности относительно предыдущей [202] (см. рисунок 4.4).



- 1 – неподвижная плита;
- 2, 7 – верхняя и нижняя направляющие;
- 3 – подвижная плита;
- 4 – стойки;
- 5, 6 – пакет пластин (5,6);
- 8 – комплект стяжных шпилек.

Рисунок 4.4 – Схема сборки пластинчатого теплообменника

На рисунке 4.5. представлена онтология функционирования ТП.

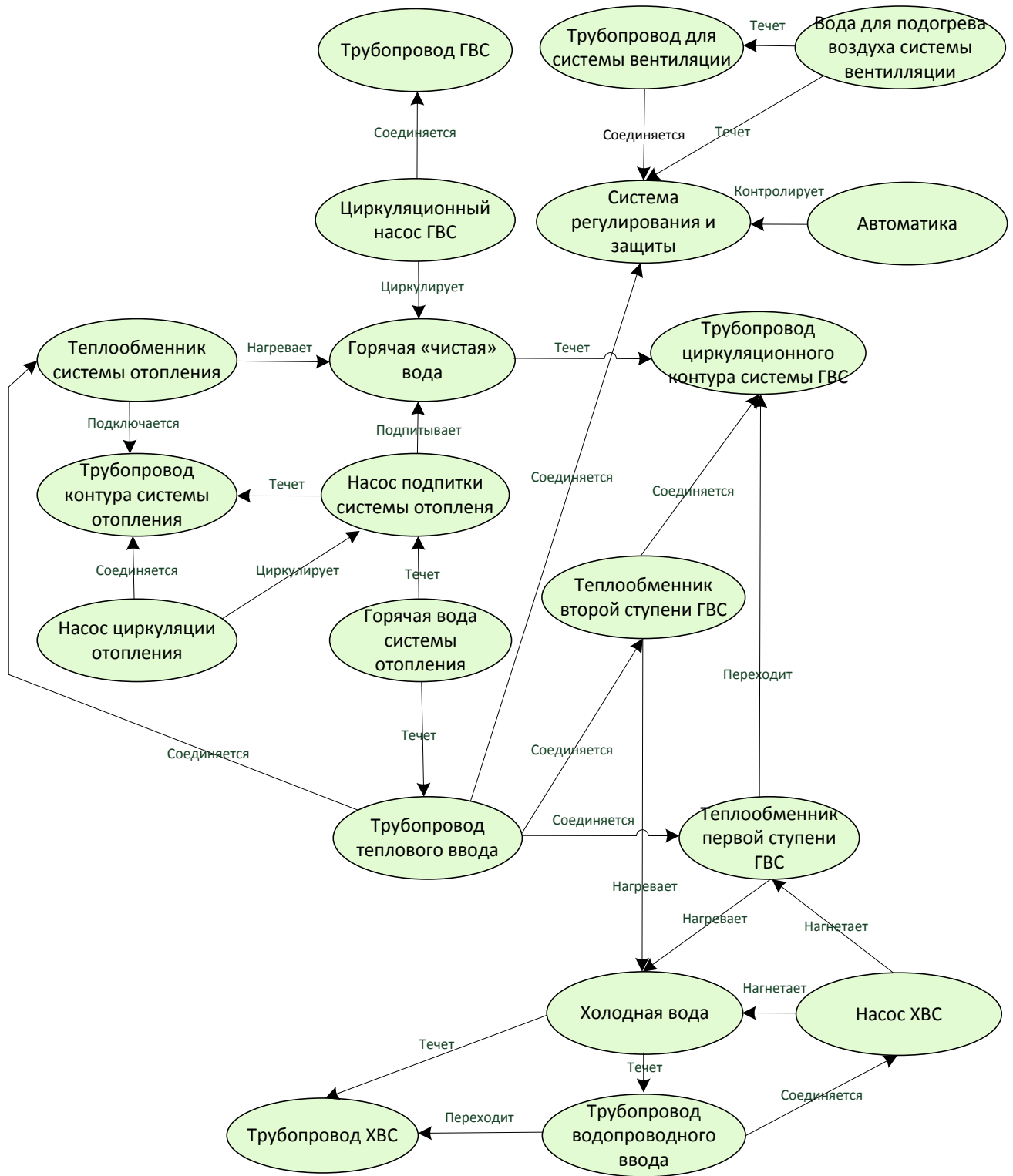


Рисунок 4.5 – Онтология функционирования ТП

При описании и разработке модели промышленной организации, специализирующейся на производстве ТП, будем считать, что ТП функционируют согласно онтологии, представленной на рисунке 4.5.

4.2 Системный анализ модели промышленного предприятия

Рассмотрим мультиагентную модель предприятия по производству ТП «Альтернативные энергосистемы» [203]. Предприятие собирает ТП трех типов: ТП – индивидуальные тепловые пункты, ЦТП – центральные тепловые пункты и БТП – блочные тепловые пункты. Предприятие организовано по дивизиональной структуре управления продуктового типа (продукт 1 – индивидуальный ТП, продукт 2 – центральный ТП, продукт 3 – блочный ТП). В процессе производства ТП будем разделять основные этапы (для которых далее будем составлять план выполнения работ):

1. проектирование;
2. сборка и контроль качества.

На рисунке 4.6 представлена схема коалиции (включающей всех агентов – руководителей подразделений) в модели по производству ТП при совместном выполнении агентами крупного заказа. Пусть заказ получен агентом A_i , и он превышает по объему возможности ресурсов и средств его подразделения. В связи с этим по алгоритму в п. 2.6.1 агент A_i формирует коалицию с агентом A_j . К ресурсам в модели относятся проектировщики, сборщики и контролеры качества. К средствам – графические станции и станки. Входом модели является заказ, выходом – тепловой пункт согласно требованиям заказа.

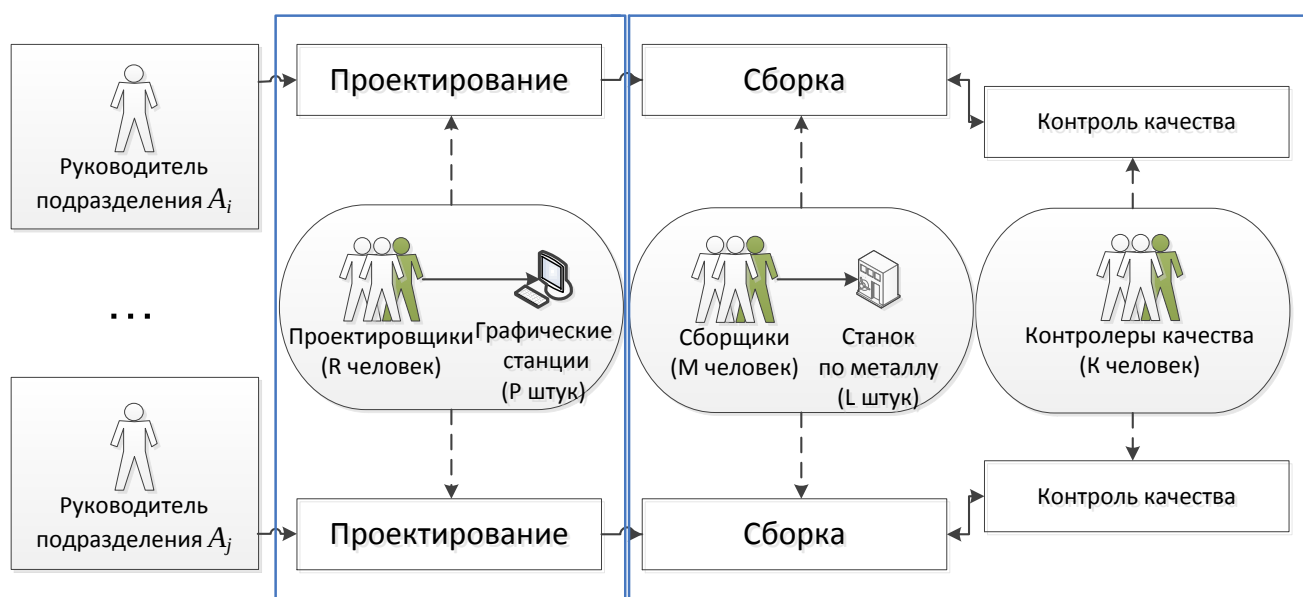


Рисунок 4.6 – Схема коалиции в модели по производству ТП

Рисунок 4.7 – Онтология работы предприятия по производству ТП

Цели агентов – руководителей подразделений (A_i, A_j):

- минимизация времени выполнения работ по заказу: $t^{An}(W_n) \rightarrow \min$;
- минимизация финансовых затрат по выполнению работ (т.е. максимизация прибыли агента): $S^{An} \rightarrow \max$;
- минимизация количества используемых «общих» ресурсов и средств в связи с вероятностью возникновения «параллельного» заказа: $N^{An} \rightarrow \min$.

Граф производства теплообменника представлен на рисунке 4.8.

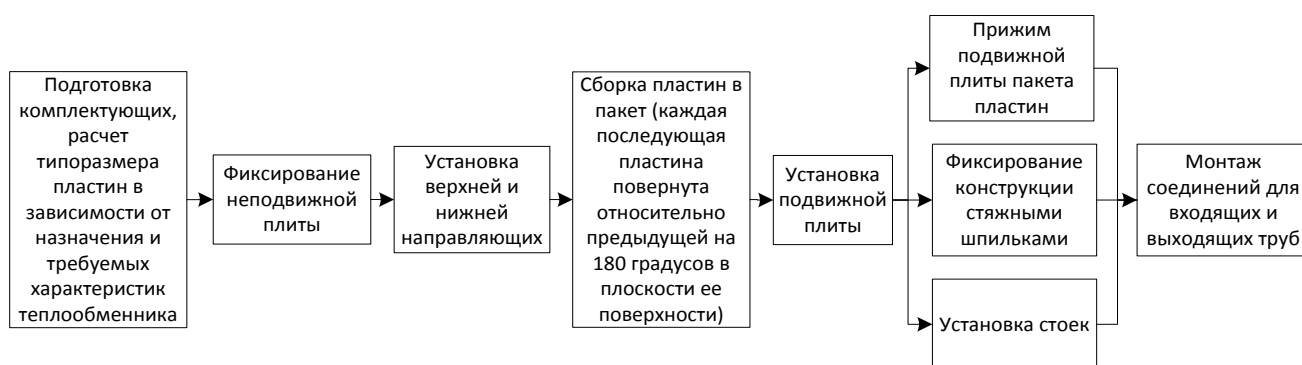


Рисунок 4.8 – Граф производства теплообменника

Граф производства ТП представлен на рисунке 4.9.

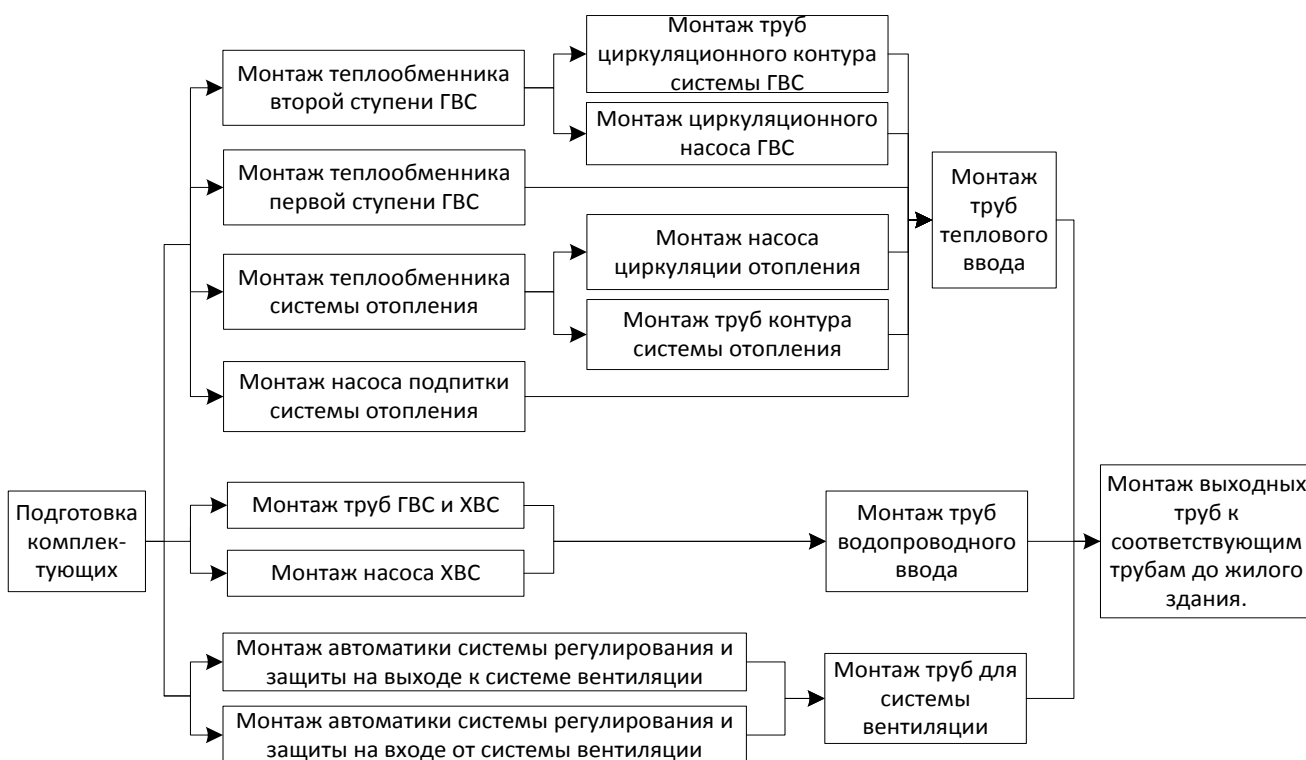


Рисунок 4.9 – Граф производства ТП

Модель процесса производства ТП представлена в виде графа на рисунке 4.10. На рисунке этапы сборки теплообменников и сборки ТП проводятся согласно процессам, представленным в виде графов на рисунках 4.8 и 4.9 соответственно.

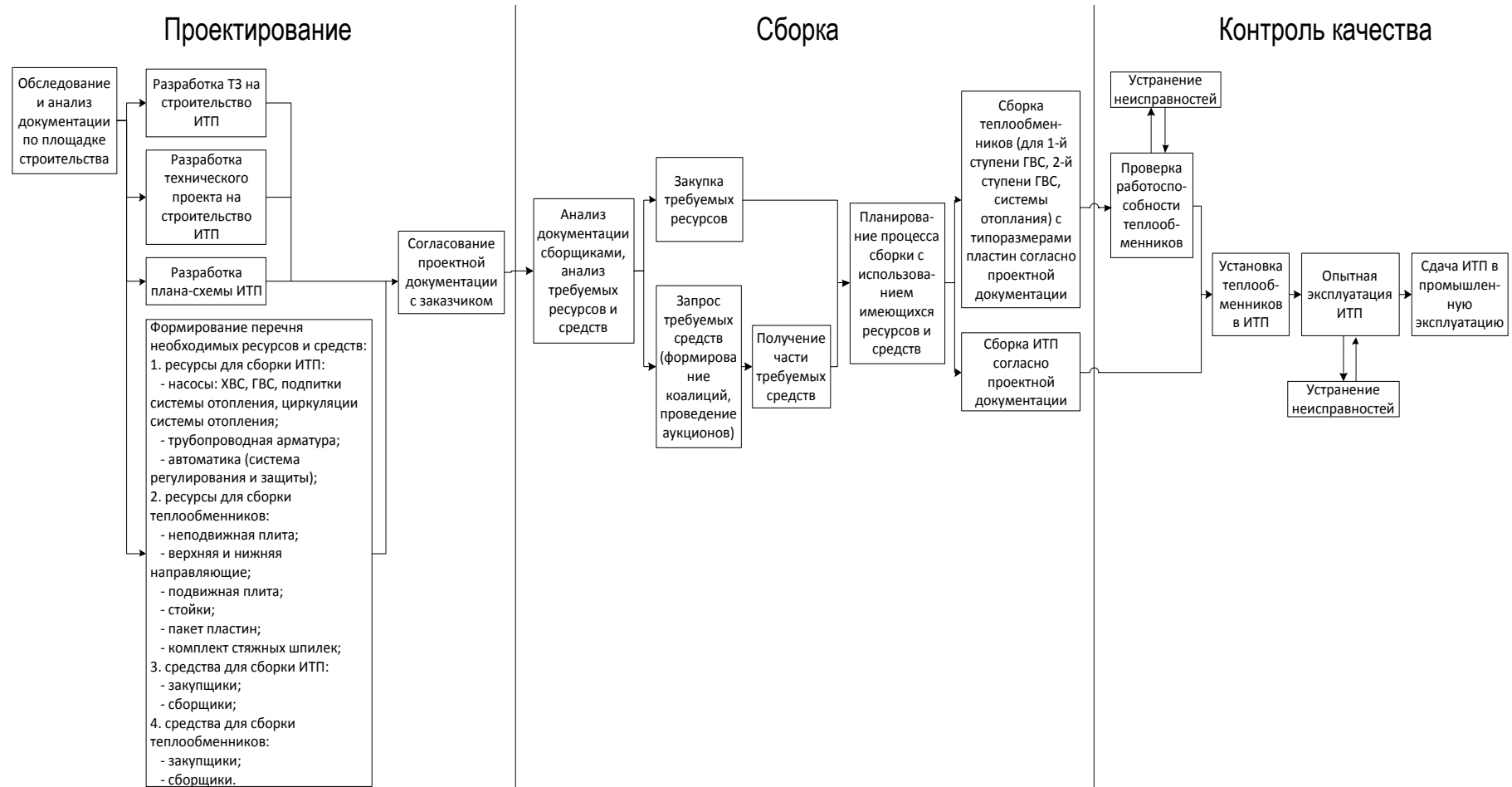


Рисунок 4.10 – Граф процесса производства ТП

4.3 Расчет плана выполнения заказов

С помощью разработанного алгоритма на основе теоремы Джонсона можно рассчитать выполнение всех работ в срок или с минимальным штрафом. Проведем расчет оптимального расписания выполнения работ (заказов). Пусть в определенный момент времени имеется очередь из 15 работ по производству ТП в системе конвейерного типа, состоящей из 2-х этапов: проектирование (1-й этап); сборка и контроль качества (2-й этап). Каждая работа управляется агентом – руководителем подразделения по производству ТП. Для каждой работы известны: время выполнения на первом множестве ресурсов и средств – A_i ; время выполнения на втором множестве ресурсов и средств – B_i ; ограничение по времени выполнения работ в целом (T_i), возможный штраф за превышение времени выполнения i -й работы (Q_i). Исходные данные для модели по производству ТП представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Исходные данные для модели по производству ТП.

№	Обозначение работы	Время на выполнение 1-го этапа работы 1-ым множеством ресурсов и средств (A_i)	Время на выполнение 2-го этапа работы 2-ым множеством ресурсов и средств (B_i)	Ограничение по времени выполнения работ (T_i)	Возможный штраф за превышение времени выполнения работ (Q_i)
1	a	5	2	10	3
2	b	2	3	19	1
3	c	0	6	15	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
10	j	3	15	120	5
11	k	5	12	150	6
12	l	4	16	70	3
13	m	3	5	100	2
14	n	7	16	160	5
15	o	3	11	140	5

Расчет расписания выполнения работ по алгоритму Джонсона приведен в Приложении 5. Расчет расписания выполнения работ по алгоритму Джонсона с доработкой авторов данной работы, а именно, с учетом ограничения по времени выполнения каждой из работ приведен в Приложении 6.

Расчет расписания выполнения работ по алгоритму Ю.А. Зака с учетом ограничения по времени выполнения каждой из работ приведен в Приложении 7.

Вывод:

1. Оптимальное расписание по алгоритму Джонсона:

$$S^*=(c, b, j, t, o, l, h, i, k, f, g, n, e, a, d).$$

Затраченное время: 130 единиц.

Штраф за превышение времени: 28 единиц.

Количество работ со штрафом: 5.

2. Оптимальное расписание по алгоритму с учетом ограничения по времени выполнения для каждой из работ:

$$S^{**}=(c, b, j, e, a, d, g, h, l, t, o, i, k, f, n).$$

Затраченное время: 130 единиц.

Штраф за превышение времени: 5 единиц.

Количество работ со штрафом: 2.

3. Оптимальное расписание по алгоритму Ю.А. Зака с учетом ограничения по времени выполнения для каждой из работ:

$$S^{***}=(e, a, c, b, d, g, h, l, t, j, f, i, o, k, n).$$

Затраченное время: 136 единиц.

Штраф за превышение времени: 3 единицы.

Количество работ со штрафом: 1.

Таким образом, построено расписание S^{**} с учетом ограничений по времени выполнения каждой работы. Суммарное время выполнения работ – 130 единиц, также как в расписании Джонсона S^* . Т.е. разработанный алгоритм обеспечил оптимальное время выполнения работ. При этом штраф за превышение времени равен 5 единицам. В классическом расписании Джонсона S^* штраф составляет 28 единиц из 67 возможных. Алгоритм Ю.А. Зака не обеспечивает

оптимальное время выполнения работ, при этом обеспечивая меньший штраф за превышение времени и меньшее количество работ со штрафом.

Таким образом, разработанный авторами данной работы алгоритм обеспечил оптимальное время выполнения работ, а также их выполнение с меньшим штрафом (в сравнении с алгоритмом по теореме Джонсона).

4.4 Разработка мультиагентной модели

До использования модели в системе jSIM на предприятии «Альтернативные энергосистемы» планирование выполнения работ по производству ТП осуществлялось в MS Excel. Проведем разработку и внедрение мультиагентной модели по производству ТП на промышленном предприятии «Альтернативные энергосистемы» в системе jSIM (см. рисунок 4.11) и далее оценим эффективность внедрения модели в jSIM относительно MS Excel по критерию изменения объема чистой прибыли предприятия от деятельности по производству ТП.

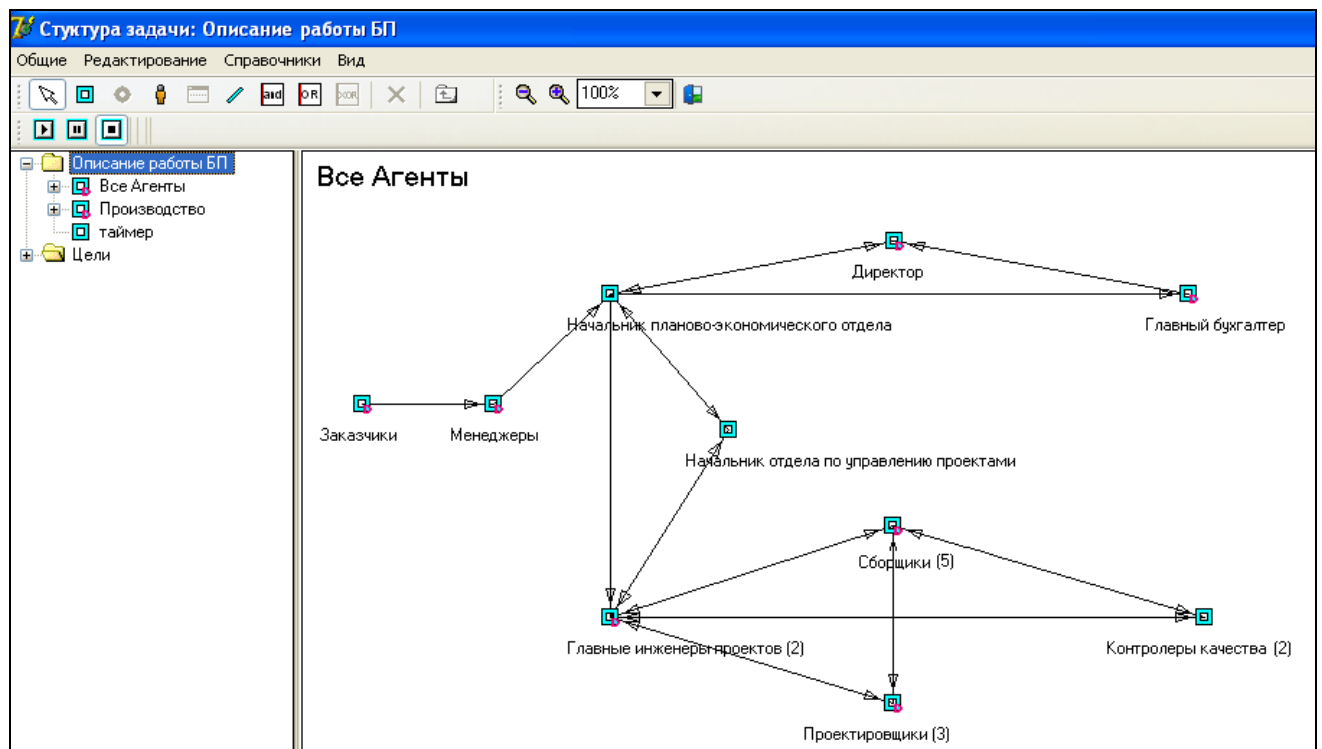


Рисунок 4.11 – Модель производства ТП в системе jSIM

На рисунке 4.12 представлены основные свойства процесса сборки ТП. В данном окне возможно указание стоимости выполнения данного процесса. На рисунке 4.13 представлено окно для описания элементов процесса сборки ТП:

условия запуска, механизмы (средства), ресурсы на выходе и затраты ресурсов для механизмов. В аналогичных окнах необходимо описание всех составляющих процесса производства ТП согласно онтологии на рисунке 4.7.

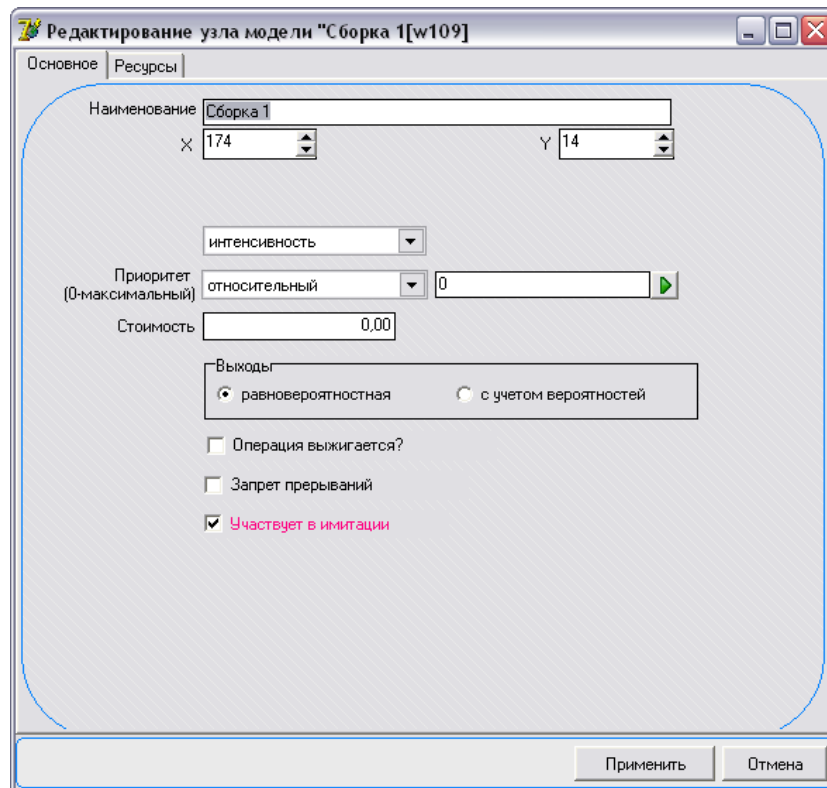


Рисунок 4.12 – Основные свойства процесса сборки ТП

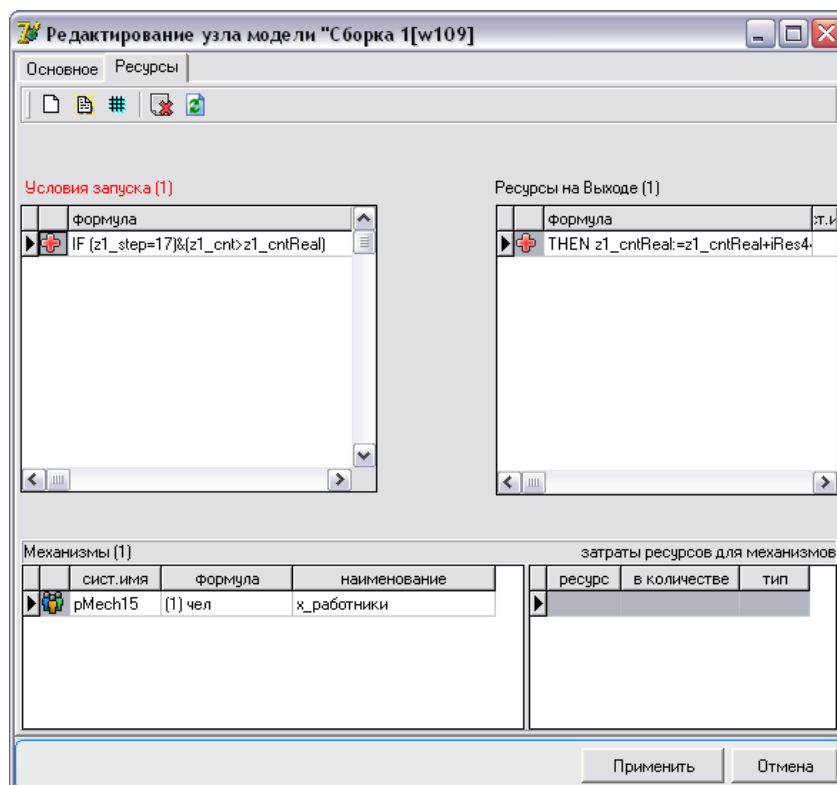


Рисунок 4.13 – Описание процесса сборки ТП

При добавлении условий запуска или ресурсов появляется диалоговое окно, в котором можно выбрать, что требуется использовать на входе – ресурс, механизм (средство), или сообщение.

При выборе «сообщение» появляется окно записи формул, в верхней части которого представлен конструктор формул, а в нижней – доступны три вкладки (см. рисунок 4.14).

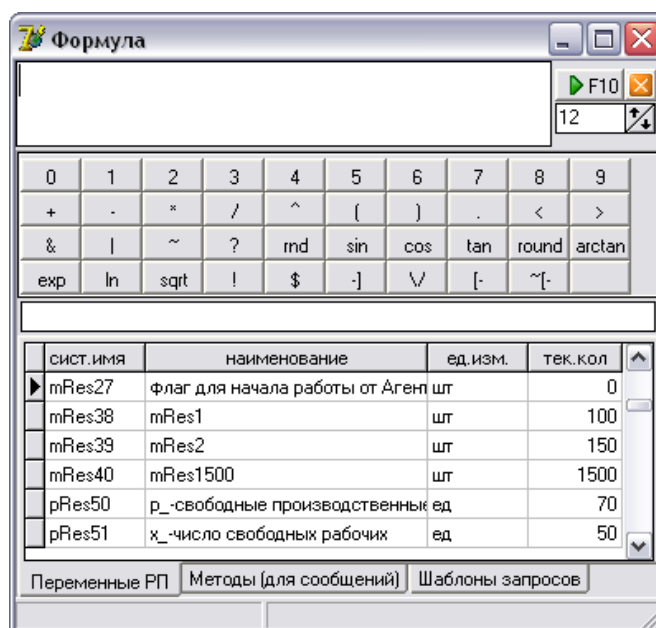


Рисунок 4.14 – Окно записи формул

При выборе «механизм», также как и при добавлении механизмов, появляется окно справочника механизмов (рисунок 4.15).

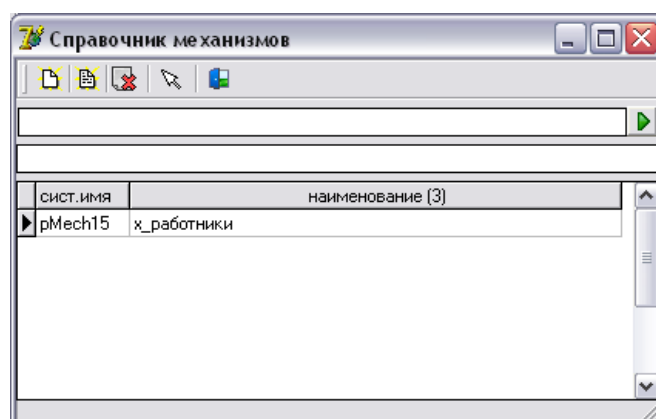


Рисунок 4.15 – Справочник механизмов

Далее необходимо выбрать из справочника нужный механизм, после чего появится окно ввода формулы, аналогичное рисунку 4.14, в котором можно ввести формулу или константу. Далее необходимо открыть справочник ресурсов и

заведем необходимые ресурсы для создания модели (см. рисунок 4.16).

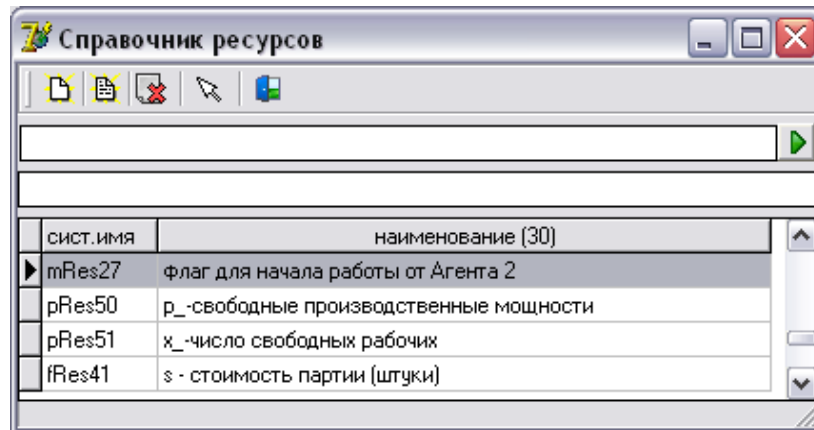


Рисунок 4.16 – Справочник ресурсов

На рисунке 4.17 на вкладке «Диагностирование ситуаций» заведена таблица описания ситуаций, в которой имеются следующие поля: имя ситуации, if (если), then (то) и текстовое описание. При добавлении новой ситуации в окне «Описание ситуации» (см. рисунок 4.18) указывается порядковый номер ситуации, имя и текстовое описание ситуации. Далее в поле «if» можно ввести необходимые условия. При добавлении условия в список условий, используется форма «if (если)», изображенная на рисунке 4.19. Сами условия представлены в виде формул и заносятся через стандартное окно ввода формул. Действия, входящие в «then», отображающиеся в виде таблицы (внизу рисунка 4.18), добавляются с помощью окна ввода действий «then (то)» (см. рисунок 4.20).

Редактирование узла модели "Менеджер ЗА[а82]				
Окно: Модель Агента				
Диагностирование ситуаций Цели агента [3]				
№	ИМЯ СИТУАЦИИ	IF	THEN	ТЕКСТОВОЕ ОПИСАНИЕ
2	расчет стоимости при N (0, 10n), timeEx >= t	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)& расчет стоимости при N (0, 10n(10^4)), timeEx >= t(20		
3	расчет стоимости при N (0, 10n), timeEx (1/2, 1)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+2, расчет стоимости при N (0, 10n), timeEx (1/2, 1)		
4	расчет стоимости при N (0, 10n), timeEx (1/4, 1/2)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+4, расчет стоимости при N (0, 10n), timeEx (1/4, 1/2)		
5	расчет стоимости при N (10n, 20n), timeEx = t	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+7, расчет стоимости при N (10n, 20n), timeEx = t		
6	расчет стоимости при N (10n, 20n), timeEx (1/2, 1)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+7, расчет стоимости при N (10n, 20n), timeEx (1/2, 1)		
7	расчет стоимости при N (10n, 20n), timeEx (1/4, 1/2)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+7, расчет стоимости при N (10n, 20n), timeEx (1/4, 1/2)		
8	расчет стоимости при N (20n, 50n), timeEx = t	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+10, расчет стоимости при N (20n, 50n), timeEx = t		
9	расчет стоимости при N (20n, 50n), timeEx (1/2, 1)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+10, расчет стоимости при N (20n, 50n), timeEx (1/2, 1)		
10	расчет стоимости при N (20n, 50n), timeEx (1/4, 1/2)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+10, расчет стоимости при N (20n, 50n), timeEx (1/4, 1/2)		
11	расчет стоимости при N > 50n, timeEx = t	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+15, расчет стоимости при N > 50n, timeEx = t		
12	расчет стоимости при N > 50n, timeEx (1/2, 1)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+15, расчет стоимости при N > 50n, timeEx (1/2, 1)		
13	расчет стоимости при N > 50n, timeEx (1/4, 1/2)	{z1_owner="a88"%z1_po0%z1_step=2%z1 (z1_owner="a82"%z1_s=z1_cnf%Res41)+15, расчет стоимости при N > 50n, timeEx (1/4, 1/2)		
14	Если получено сообщение от 4А по заказу о количестве p и r	{z1_owner="a82"%z1_po0%z1_s=0%z1_sh (z1_owner="a82"%z1_s=5%z1 и random(10)>5%z1		
15	Если подписан договор и перечислены деньги	{z1_owner="a87"%z1_step=6}	{z1_owner="a82"%z1_step=7}	Если подписан договор и перечислены деньги
16	сообщение от производства 4А о завершении производства	{z1_owner="a88"%z1_step=21}	{z1_owner="a82"%z1_step=22}	

Рисунок 4.17 – Диагностирование ситуаций агентом–руководителем подразделения

Описание ситуации

порядковый номер: 2

Имя ситуации: расчет стоимости при N (0, 10n], timeEx >= t

Текстовое описание ситуации: расчет стоимости при N (0, 10n(10*4)), timeEx >= t(20)

IF (ЕСЛИ): ([z1_owner="a88"]&{z1_p>0}&{z1_step=2}&{z1_cnt<(10*iRes44)}&{z1_cnt=(10*iRes44)}&{z1_timeex=iRes7}&{z1_timeex>iRes7})

Диапазон с: 0 по: 0

№	Действия, входящие в THEN	Время старта
1	владелец z1_owner="a82"	
2	расчет стоимости заказа s=s z1_s:=z1_cnt*iRes41	
3	шаг z1_step:=3	

Применить Отмена

Рисунок 4.18 – Описание ситуации

IF (ЕСЛИ)

Формулы

- 0 IF select(z1_a00)
- 0 IF [z1_owner="a88"]&{z1_p>0}&{z1_step=2}&{z1_cnt<(10*iRes44)}&{z1_cnt=(10*iRes44)}&{z1_timeex=iRes7}&{z1_timeex>iRes7})

Рисунок 4.19 – Добавление условий

THEN(ТО)

порядковый номер: 1

наименование: владелец

текстовое описание: владелец

THEN: z1_owner="a82"

старт(время):

приоритет:

Применить Отмена

Рисунок 4.20 – Добавление действий

Цели каждого агента вводятся в модель через визуальный интерфейс, представленный на рисунке 4.21.

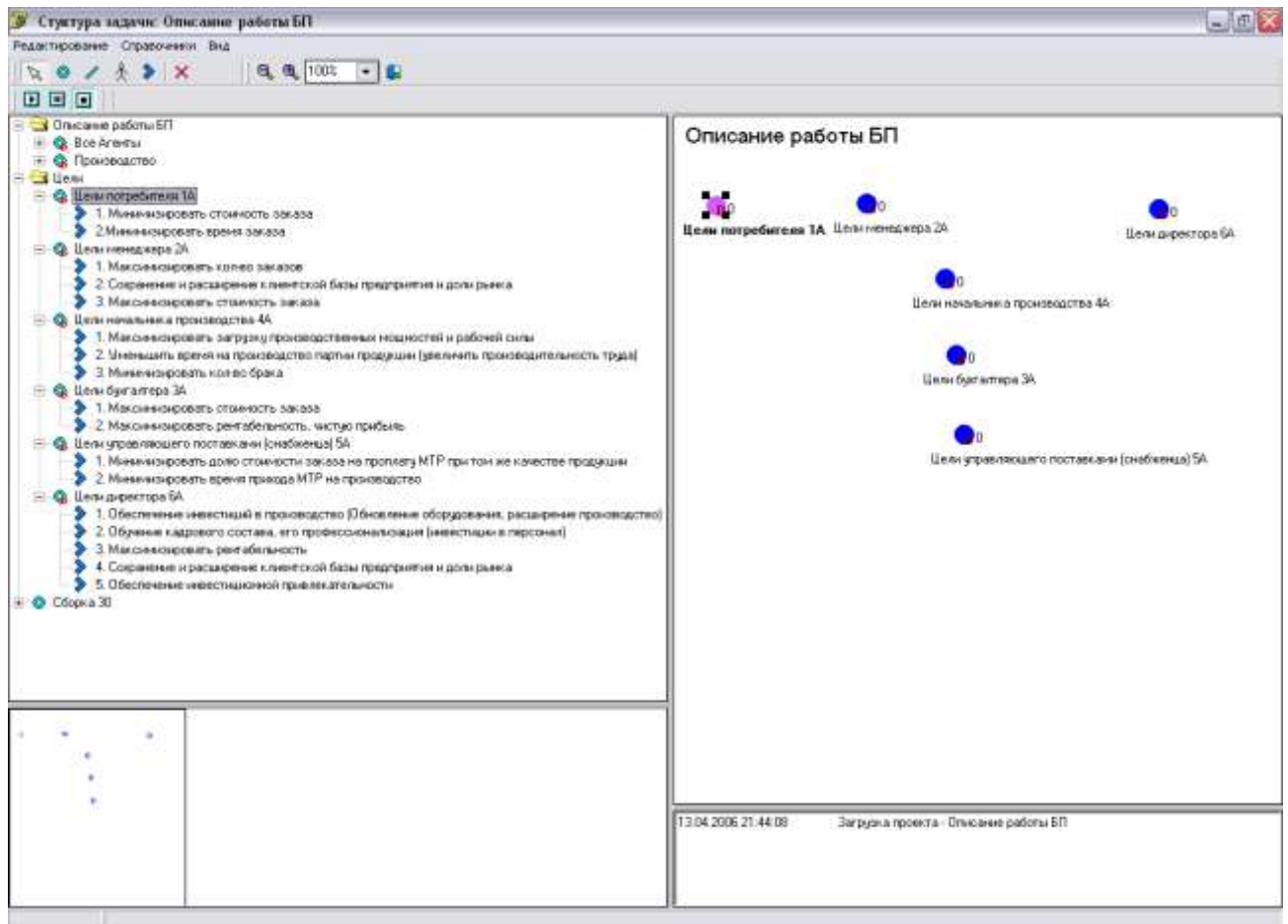


Рисунок 4.21 – Описание целей агентов

На рисунке 4.22 на примере агента–директора проиллюстрировано визуальное представление целей внутри агентов в виде графов целей. Под целями агента–директора будем понимать цели предприятия «Альтернативные энергосистемы» в целом. Каждая цель связана с определенной областью (стратой) [204]. Выделены следующие страты (согласно сбалансированной системе показателей [204]): финансы, клиенты, бизнес–процесс, обучение и рост.

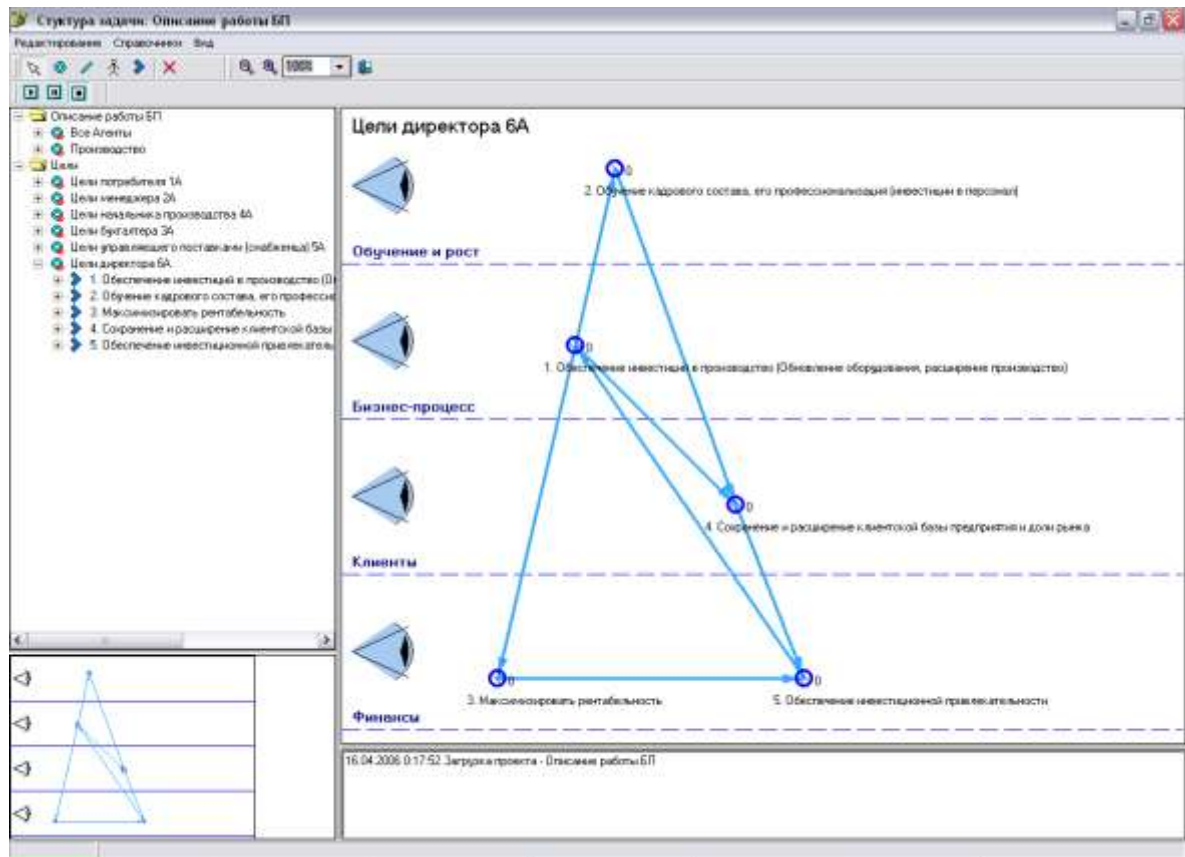


Рисунок 4.22 – Цели агента–директора

Возможности средств анализа динамических данных представлены на рисунке 4.23.

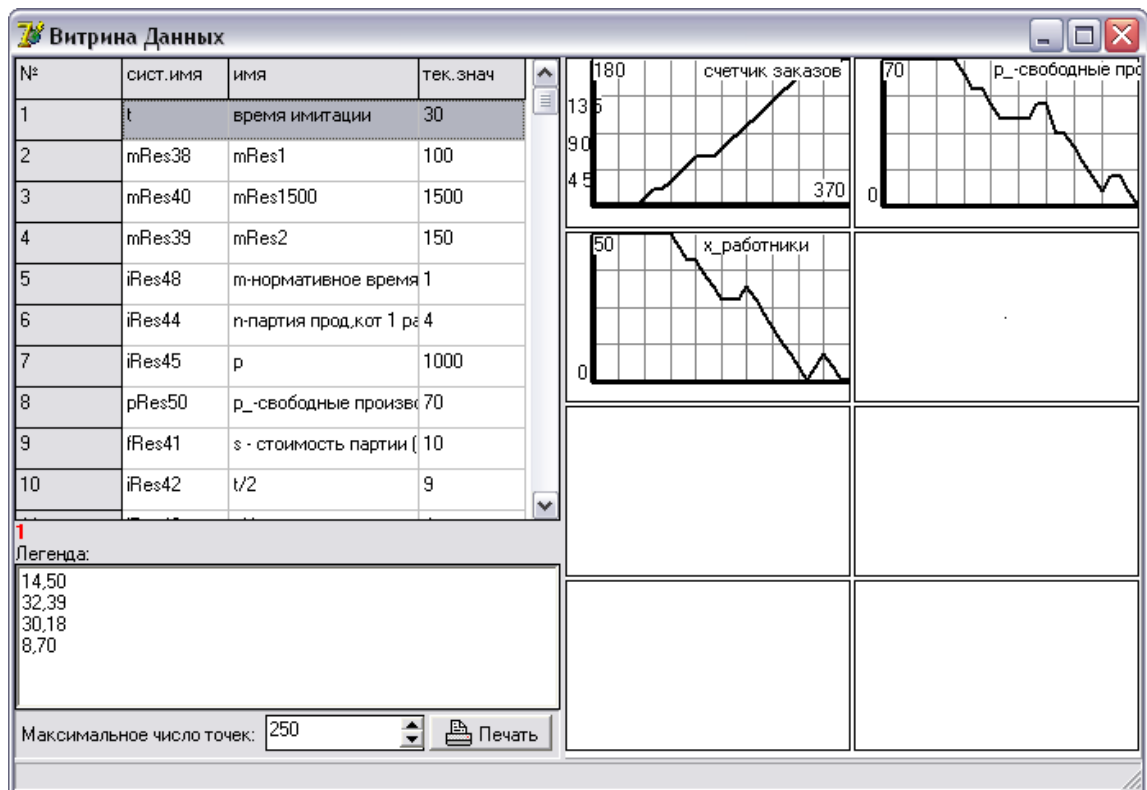


Рисунок 4.23 – Анализ результатов моделирования

Таким образом, разработана и внедрена мультиагентная модель процесса по производству ТП на предприятии «Альтернативные энергосистемы» в системе jSIM. На основе разработанной модели возможно проведение сравнительного анализа стратегий взаимодействия агентов.

4.5 Сравнительный анализ стратегий взаимодействия агентов

Проведем исследование влияния стратегий взаимодействия агентов на скорость выполнения проектов по строительству ТП. Для выбора стратегии взаимодействия агентов–руководителей подразделений (A_1 , A_2), обеспечивающую наибольшую общую производительность, было проведено 60 экспериментов (в мультиагентной модели, описанной ранее в работе) – по 10 экспериментов с каждым из 6-и типов комбинаций стратегий взаимодействия агентов. Комбинации стратегий, усредненные и округленные результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Результаты экспериментов

№ п\п	Стратегия A_1	Стратегия A_2	Проекты, выполненные A_1/A_2	Выполнение проектов в ед. времени	Число завершённых проектов
1	конкуренция	конкуренция	12/12	1.2	24
2	конкуренция	конформизм	13/7	1.0	20
3	конкуренция	компромисс	11/10	1.05	21
4	конформизм	конформизм	0/0	0	0
5	конформизм	компромисс	5/10	0.75	15
6	компромисс	компромисс	11/11	1.1	22

Таким образом, по таблице 4.2 видно, что наиболее производительным вариантом взаимодействия агентов A_1 и A_2 является вариант, когда оба агента имеют стратегию конкуренции. Далее необходимо провести оценку эффективности разработанной системы на основе оценки роста чистой прибыли предприятия «Альтернативные энергосистемы».

4.6 Расчет эффективности внедренной системы

Проведем сравнительную оценку чистой прибыли предприятия при планировании выполнения заказов в MS Excel и в системе jSIM. Будем считать, что данная оценка определяет эффективность внедрения системы jSIM на предприятии «Альтернативные энергосистемы». Для чистоты анализа считаем, что чистая прибыль всегда составляет 20% от стоимости заказа; оплата заказов всегда происходит через 5 дней после подписания акта сдачи–приемки и выставления счета. Моделирование производилось на срок 60 рабочих дней (примерно 3 месяца работы предприятия), выходные дни не учитывались. Заказы при моделировании поступают произвольного объема, срок выполнения ограничен от 2 до 10 дней. График сравнения чистой прибыли приведен на рисунке 4.24. Красной линией обозначен график получения прибыли по заказам при планировании выполнения работ в MS Excel, синим – в системе jSIM. «Ломаность» графика связана с нелинейностью поступления денежных средств по результатам выполнения заказов.

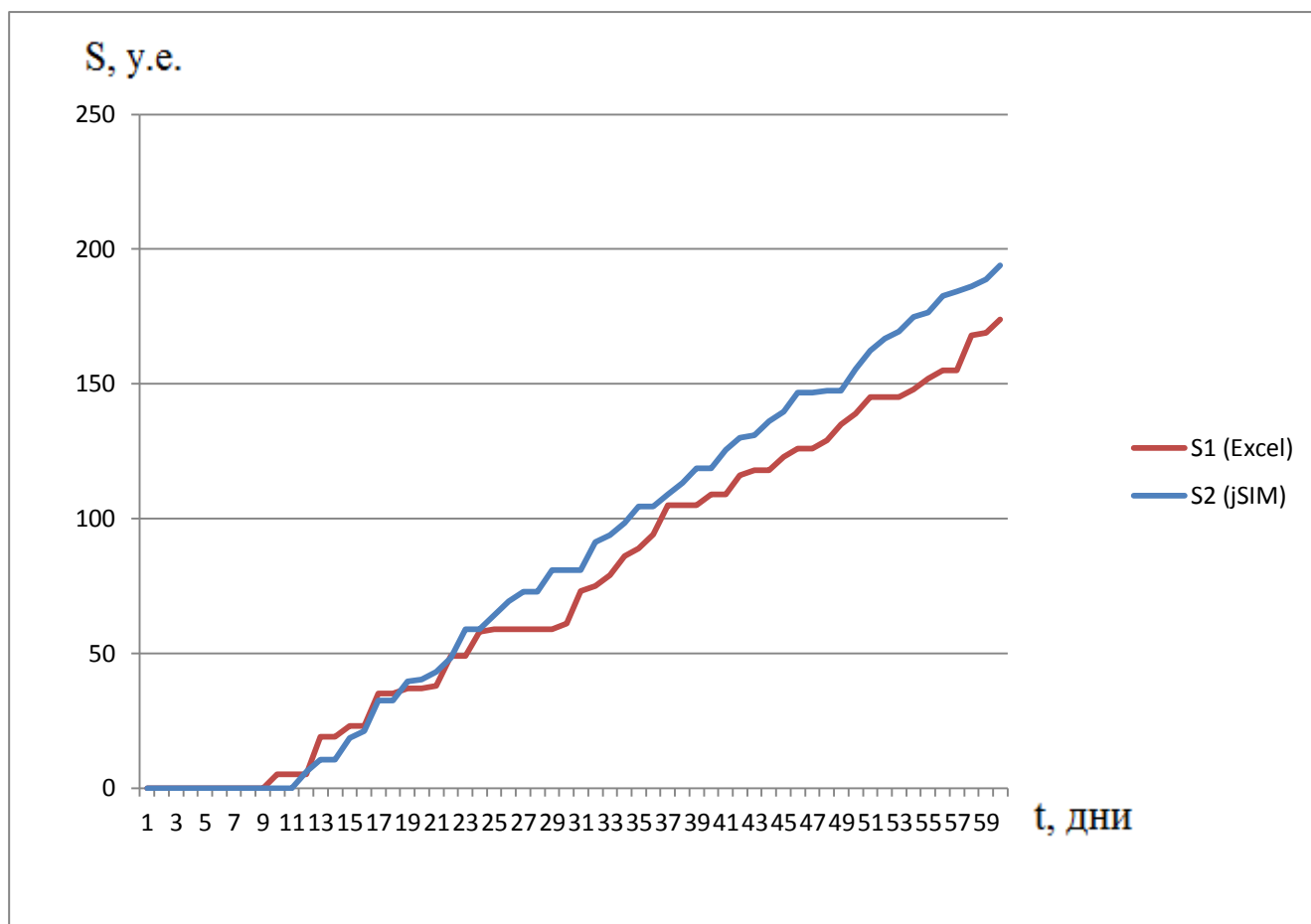


Рисунок 4.24 – График сравнения чистой прибыли

В результате проведения моделирования получено, что чистая прибыль предприятия через 60 дней работы при планировании выполнения заказов в MS Excel составила 174 у.е., а в системе jSIM – 194 у.е., что больше на 11,4%.

Таким образом, произведена оценка эффективности планирования выполнения заказов по производству ТП в системе jSIM относительно производящегося ранее планирования в MS Excel. В результате внедрения модели на базе системы jSIM чистая прибыль предприятия от деятельности по производству ТП выросла на 11,4%.

4.7 Оценка роста функциональных операций разработанной системы

Для оценки эффективности разработанной системы требуется провести соответствующие расчеты, используя систему показателей эффективности и методику их расчета из п. 1.4.4 данной работы. Рассчитаем относительную эффективность – эффективность работы системы jSIM относительно системы

BPsim2 (т.е. насколько jSIM изменяет эффективность использования BPsim2). В качестве основных свойств, определяющих эффективность, выберем **совокупность выполняемых функциональных операций**. Выделим 3 класса функциональных операций и их подклассы (см. таблицу 4.3):

Таблица 4.3. Классы функциональных операций.

Функции визуализации (I)	Функции взаимодействия и разрешения конфликтов (II)	Функции описания и работы МАС (III)
1. формирование диаграммы последовательности действий при проведении моделирования; 2. ведение истории действий активных объектов; 3. создание пользователем методов взаимодействий активных объектов.	1. разрешение конфликтов на основе стратегий взаимодействия активных объектов; 2. разрешение конфликтов на основе проведения аукционов между активными объектами; 3. использование языка обмена сообщениями, разработанного для предметной области процессов преобразования ресурсов на базе стандарта FIPA.	1. описание агентов гибридной архитектуры; 2. формирование коалиций; 3. составление оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени.

По формуле (1.1): $Q_{info} = \prod_{i=1}^G \eta_i^{1-p_i}$, $G = 3$ – количество классов функциональных операций.

Рассчитаем p_i – показатель важности i -го класса. Для этого по 10-ти балльной шкале оценим важность каждого из 3-х классов функциональных операций: $B_I = 2$, $B_{II} = 10$, $B_{III} = 8$.

Вычислим вес каждого из 3-х классов функциональных операций по формуле: $p_i = \frac{B_i}{\sum B}$

$$p_{t1} = 2/20 = 0,1$$

$$p_{t2} = 10/20 = 0,5$$

$$p_{t3} = 8/20 = 0,4$$

$$p_i = \frac{p_{ti}}{p_{\max}}$$

$$p_I = 0,1/0,5 = 0,2$$

$$p_{II} = 0,5/0,5 = 1$$

$$p_{III} = 0,4/0,5 = 0,8$$

Рассчитаем η_i по формуле (1.2):

$$\eta_i = \sum_{j=1}^{S^{(i)}} b_j^{(i)} \cdot q_j^{(i)},$$

где: $S^{(i)}$ – число подклассов i -го класса, $0 < q_j^{(i)} \leq 1$ – весомость j -го подкласса i -го класса, $b_j^{(i)}$ – балльность j -го подкласса i -го класса.

$$q_j = \frac{B_j^i}{\sum_{j=1}^{S^{(i)}} B_j^i}, \text{ для расчета } q_j \text{ установим важность по 10-ти балльной шкале } j\text{-го подкласса } i\text{-го класса функциональных операций.}$$

I класс операций:

$$S^I = 3;$$

$$B_1^I = 1, B_2^I = 3, B_3^I = 6;$$

$$q_1^I = 0,1, q_2^I = 0,3, q_3^I = 0,6;$$

$$b_j^I \in [0;1]$$

$$b_1^I = 0,1, b_2^I = 0,3, b_3^I = 0,6;$$

$$\eta_I = 0,1*0,1+0,3*0,3+0,6*0,6=\mathbf{0,46}$$

II класс операций:

$$S^{II} = 3;$$

$$B_1^{II} = 4, B_2^{II} = 10, B_3^{II} = 6;$$

$$q_1^{II} = 0,2, q_2^{II} = 0,5, q_3^{II} = 0,3;$$

$$b_j^{II} \in [0;1]$$

$$b_1^{II} = 0,4, b_2^{II} = 0,1, b_3^{II} = 0,6;$$

$$\eta_{II} = 0,2*0,4+0,5*0,1+0,3*0,6=\mathbf{0,31}$$

III класс операций:

$$S^{III} = 3;$$

$$B_1^{III} = 6, B_2^{III} = 10, B_3^{III} = 9;$$

$$q^{III}_1 = 0,24, q^{III}_2 = 0,4, q^{III}_3 = 0,36;$$

$$b^{III}_j \in [0;1]$$

$$b^{III}_1 = 0,6, b^{III}_2 = 0,1, b^{III}_3 = 0,9;$$

$$\eta_{III} = 0,24*0,6+0,4*0,1+0,36*0,9 = \mathbf{0,508}$$

Подставив полученные величины в формулу (1.1), рассчитаем $Q_{info} = \mathbf{0,47}$.

Для количественной оценки относительной эффективности систем используем формулу:

$$Q_c = \prod_{i=1}^S Q_i^{P_i},$$

$$Q_c = Q_{info} = 0,47.$$

Вывод: количество функциональных операций в системе jSIM больше чем в системе BPsim2 на 47%.

Выводы по главе 4

1. Приведено описание и схема работы теплового пункта (ТП). Разработана модель по производству ТП на промышленном предприятии «Альтернативные энергосистемы» в системе jSIM. *В результате внедрения данной модели на базе системы jSIM чистая прибыль предприятия от деятельности по производству ТП выросла на 11,4%.* В перспективе разработанные модель и систему целесообразно применять для имитации взаимодействия между конкурирующими производственными предприятиями.

2. На основе разработанной модели проведены расчеты планов выполнения работ агентами–руководителями проектов. С их помощью проведено сравнение работы алгоритмов: на основе теоремы Джонсона, на основе теоремы Джонсона с учетом ограничений по времени выполнения работ и Ю.А. Зака. *Алгоритм с учетом ограничений по времени выполнения работ (разработанный авторами данной работы) обеспечил оптимальное время выполнения работ, а также их выполнение с меньшим штрафом (в сравнении с алгоритмом на основе теоремы Джонсона).* Алгоритм Ю.А. Зака не обеспечил оптимальное время

выполнения работ, при этом обеспечив меньший штраф за превышение времени и меньшее количество работ со штрафом (в сравнении с алгоритмом, разработанным авторами данной работы). Это связано с тем, что изначально задача у Ю.А. Зака была поставлена иначе.

3. На основе разработанной модели проведен анализ стратегий взаимодействия агентов–руководителей проектов. Предприятие выполняет наибольшее количество проектов по производству ТП за фиксированное время с наименьшими простоями ресурсов и средств (т.е. получает максимальную прибыль), когда оба агента имеют стратегии конкуренции.

4. Проведен расчет количества функциональных операций, показавший, что в системе jSIM количество функциональных операций больше чем в системе BPsim2 на 47%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приводятся следующие основные результаты работы:

1. Проведен анализ процессов формирования коалиций при совместном выполнении агентами крупных заказов. Определено, что максимальный эффект применение коалиций дает в случае, когда заказ, полученный агентом–руководителем подразделения требует ресурсов и средств, превосходящих по объему имеющиеся у данного руководителя ресурсы и средства.

2. Проведен сравнительный анализ средств разработки мультиагентных моделей с точки зрения возможности их использования для создания моделей с коалициями. Рассмотрены системы AnyLogic 6, MagentA, BPsim2, RepastJ, Simplex3, Tecnomatix PlantSimulation. Сделан вывод о необходимости разработки нового программного средства – jSIM на базе системы BPsim2.

3. Разработана Коалиционная модель, включающая механизмы:

- обмена сообщениями между агентами, разработанного для предметной области коалиций на основе стандарта FIPA;
- разрешения конфликтов на основе стратегий взаимодействий и

организации аукционов;

- формирования коалиций;
- составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени, для производств, число переделов в которых допустимо объединить до 2–х;
- составления планов выполнения работ для производств, включающих более 2–х переделов.

4. Проведен анализ методов планирования выполнения работ. Для производств, число переделов в которых допустимо объединить до 2–х, разработан алгоритм составления оптимальных планов выполнения работ агентами (на основе теоремы Джонсона), учитывающий ограничения по времени выполнения каждой из работ. Для производств из большего количества переделов выбран метод случайного поиска, дающий приемлемое решение задачи составления планов выполнения работ.

5. Разработано расширение языка FIPA Semantic Language, обеспечившее его адаптацию к предметной области коалиций и возможность описания взаимодействий агентов в конфликтных ситуациях.

6. Разработана система распределения ресурсов и формирования коалиций jSIM. Система внедрена на ФГУП «Уралгеоинформ», в ООО АН «КИМ» и в ООО «Альтернативные энергосистемы». *В результате внедрения на предприятии «Альтернативные энергосистемы» чистая прибыль предприятия от деятельности по производству ТП выросла в среднем на 11,4%.*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Зраенко А.С. Конфликтные ситуации в интеллектуальных мультиагентных процессах преобразования ресурсов / А.С. Зраенко, К.А. Аксенов // Сборник трудов второй международной научно–практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2006. – Том №5. – С. 24–26.
- 2) Зраенко А.С. Сравнительный анализ мультиагентных моделей процессов преобразования ресурсов [Электронный ресурс] / Зраенко А.С., Аксенов К.А., Федотов В.П. // Современные проблемы науки и образования, 2013. – № 4. Режим доступа: <http://www.science–education.ru/110–9640>.
- 3) Зраенко А.С. Коалиции агентов в имитационном моделировании // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2010» в рамках VII Евро–Азиатского форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2010». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2010.
- 4) Аксёнов К.А. Конфликтные ситуации в мультиагентных процессах преобразования ресурсов / К.А. Аксёнов, А.С. Зраенко, Н.В. Гончарова, С.Ю. Долматов // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2006» в рамках III Евро–Азиатского международного форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2006». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2006. – С. 49–51.
- 5) Зраенко А.С. Коалиционная модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Ван Кай // Научно–технические ведомости СПбГУ. – СПб: Издательство политехнического университета, 2009. – №5. – С. 156–161.
- 6) Зраенко А.С. Разработка коалиционной системы поддержки принятия решений / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, В.П. Федотов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физ–мат науки. – Самара:

Издательство Самарский университет, 2013. – №2(31). – С. 72–79.

7) Зраенко А.С. Решение задач планирования в коалиционной модели / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, В.П. Федотов // Программные продукты и системы. – Тверь: ЗАО НИИ ЦПС, 2012. – №1. – С. 23–28.

8) Зраенко А.С. Разработка модели и языка общения для мультиагентной системы BPsim.MAS / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Е.М. Лазарев // VI международная научно–техническая конференция «Научное программное обеспечение в образовании и научных исследованиях»: Сборник материалов. – СПб.: Изд–во Политехнического университета, 2008.

9) Зраенко А.С. Применение механизмов коммуникации агентов в системе мультиагентного моделирования / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Е.М. Лазарев // IX международная научно–техническая конференция «Компьютерное моделирование 2008»: Сборник материалов. – СПб: Издательство Политехнического университета, 2008. – С. 7–11.

10) Зраенко А.С. Реализация механизма общения агентов в мультиагентной системе моделирования процессов преобразования ресурсов jSIM / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Е.М. Лазарев // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2008» в рамках V Евро–Азиатского международного форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2008». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2008. – С. 235–237.

11) Аксёнов К.А. Разработка языка коммуникации агентов для мультиагентной системы моделирования процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксёнов, А.С. Зраенко // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – Курск: ООО «Редакция журнала научных публикаций аспирантов и докторантов», 2008. – №5. – С. 134–136.

12) Зраенко А.С. Применение мультиагентного подхода в системах поддержки принятия решений / А.С. Зраенко, С.А. Коновалова, К.А. Аксёнов // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2007» в рамках 4–го Евро–Азиатского форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2007». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2007. – С. 214–217.

13) Зраенко А.С. Разработка системы поддержки принятия решений с использованием средств мультиагентного моделирования / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Е.М. Лазарев // XVI международная конференция молодых ученых: сборник статей. – Екатеринбург, УГТУ–УПИ, 2009.

14) Зраенко А.С. Разработка библиотеки сценариев взаимодействий агентов для СИМ BPsim2 / А.С. Зраенко, Е.М. Лазарев // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2009» в рамках VI Евро–Азиатского международного форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2009». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2009. – С. 157–159.

15) Диаграммы последовательности [Электронный ресурс]. Москва, 2003–2013. Режим доступа: http://www.business-process.ru/designing/methodology/uml/theory/sequence_diagram_theory.html.

16) Давенпорт Т. Реинжиниринг новой волны / Т. Давенпорт. – М.: Директор информационной службы, 2002. – № 11.

17) Подиновский В.В., Ногин В.Д., Парето–оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982.

18) Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка переговоров при согласовании управленческих решений / Э.А.Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 2003.

19) Ларичев О.И. Качественные методы принятия решений / О.И. Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Физматлит, 1996.

20) Коновалова С.А. Исследование применения аппарата СППР [Электронный ресурс] / С.А. Коновалова, А.С. Зраенко, К.А. Аксенов // Одиннадцатая Всероссийская студенческая научно–техническая Интернет–конференция "Информационные технологии и электроника". – Екатеринбург, 2006–2013. Режим доступа: <http://webconf.rtf.ustu.ru>.

21) Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 1998.

22) Трахтенгерц Э.А. Методы генерации, оценки и согласования решений в распределенных системах поддержки принятия решений / Э.А. Трахтенгерц. – М.: АиТ, 1995.

23) Трахтенгерц Э.А. Субъективность в компьютерной поддержке управленческих решений / Э.А. Трахтенгерц. – М.: СИНТЕГ, 2002.

24) Костинская А.Г. Зарубежные исследования группового принятия решений, связанных с риском [Электронный ресурс]. М., 2004–2013. Режим доступа: <http://psylist.net/hrestomati/00022.htm>.

25) Петровский А.Б. Поддержка принятия решений. Труды Института системного анализа РАН. Т.35 / А.Б. Петровский. – М.: ИСА РАН, 2008. – 128 с.

26) Трахтенгерц Э.А. Принятие решений на основе компьютерного анализа / Э.А. Трахтенгерц. – М.: Институт проблем управления РАН, 1996.

27) Kurt L. Group Decision and Social Change. Readings in Social Psychology by Theodore M. Newcomb and Eugene L. Hartley / L. Kurt // Quasi-Stationary Social Equilibria and the Problem of Permanent Change, 1947. – P. 340–440.

28) Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений: Учебник. Изд. третье / О.И. Ларичев. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 392 с.

29) Ларичев О.И. Метод организации работы коллективного органа, принимающего решения. Перспективное планирование научных исследований и разработок / О.И. Ларичев, А.Ю. Терехина, В.В. Павельев; под ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1974.

30) Аксенов К.А. Руководство пользователя системы динамического моделирования ситуаций BPsim2 / К.А. Аксенов. – Екатеринбург, 2006. – 34 с.

31) Аксенов К.А. Принципы построения системы имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов BPsim / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов // Материалы первой всероссийской научно–практической конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках». Сборник докладов. – Санкт–Петербург: ФГУП ЦНИИ Технологии судостроения, 2003. – Т.1. – С.36–40.

32) Аксенов К.А. Исследование и разработка средств имитационного моделирования дискретных процессов преобразования ресурсов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.13.18. / К.А. Аксенов.

– Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2003.

33) Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5/ Ю.Г. Карпов. – СПб.: БХВ–Петербург, 2005. – 400 с.

34) Андрейчиков А.В. Интеллектуальные информационные системы: Учебник / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.

35) Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем / М.Л. Цетлин. – М.: Наука, 1969.

36) Гусева И. Ю. Когнитивно–ситуационное моделирование риск–ориентированного управления муниципальной собственностью: дисс. ... канд. Экон. наук: 08.00.13 / И.Ю. Гусева; [Место защиты: Рост. гос. эконом. ун–т]. – Таганрог, 2008. – 154 с.

37) Борщев А.В. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты: [Электронный ресурс] / А.В. Борщёв. СПб, 2006–2013. Режим доступа: <http://www.xjtek.com/files/papers>.

38) Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А.В.Борщев // М.: Exponenta Pro. – 2004. – №3. – С. 32–49

39) Borshchev A. AnyLogic – Multi–Paradigm Simulation for Business, Engineering and Research [Электронный ресурс] / A. Borshchev, A. Filippov // The 6th IIE Annual Simulation Solutions Conference. – Orlando, 2004–2013. Режим доступа: <http://www.xjtek.com/files/papers/multiparadigmpresentationsimsol2004.pdf>.

40) Имитационное моделирование производственных систем / под общ. ред. А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1983. – 416 с.

41) Виттих В. А. Организация сложных систем / В.А. Виттих. – Самара: СамНЦ РАН, 2010. – 66 с.

42) Vittikh V. A. Multi–agent systems for modeling of self–organization and cooperation processes [Электронный ресурс]. 2006–2013. Режим доступа: <http://www.cs.brandeis.edu/dept/faculty/mataric>.

43) 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.

44) Виттих В.А. Эволюционное управление сложными системами / В.А. Виттих // Известия Самарского научного центра РАН. –Т.2, 2000. – № 1.–С. 53–65.

45) Гольдштейн С.Л. Введение в системологию и системотехнику / С.Л. Гольдштейн, Т.Я. Ткаченко. – Екатеринбург: ИРРО, 1994. – 198 с.

46) Городецкий В. И. Инструментальные средства для открытых сетей агентов / В. И. Городецкий, О. В. Карсаев, В. В. Самойлов, С.В. Серебряков // Известия РАН. Теория и Системы Управления. – М.: Наука, 2008. – С. 106–124.

47) Gorodetsky V. Agents and Data Mining Integration. Lecture Notes in Artificial Intelligence / V. Gorodetsky et al. (co-Editor) // vol. 5980, Springer, 2010.

48) Городецкий В.И. Многоагентная технология принятия решений в задачах объединения данных / В.И. Городецкий, Карсаев О.В., Самойлов В.В. // Труды СПИИРАН. – Спб.: Издательство СПИИРАН, 2002. – №1. – С. 12–37.

49) Емельянов С.В. Технология системного моделирования / С.В. Емельянов, В.В. Калашников, М. Франк, А. Явор, Е.Ф.Аврамчук, А.А. Вавилов и др. // М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.

50) Клыков Ю.И. Банки данных для принятия решений / Ю.И. Клыков, Л.Н. Горьков. – М.: Сов. радио, 1980. – 155 с.

51) Кобелев Н.Б. Качественная теория больших систем и их имитационное моделирование. Пособие для разработчиков имитационных моделей и пользователей / Н.Б. Кобелев. – М.: ООО «Принт-сервис», 2009.

52) Попов Э.В. Статические и динамические экспертные системы: Учеб. пособие / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот. – М.: Финансы и статистика, 1996. – 320 с.

53) Поспелов Д.А. Многоагентные системы – настоящее и будущее / Д.А. Поспелов // Информационные технологии и вычислительные системы. – 1998. – №1. – С. 49–56.

54) Поспелов Г.С. Программно-целевое планирование и управление / Г.С. Поспелов, В.А. Ириков. – М.: Советское радио, 1976.

55) Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 646 с.

56) Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш.шк., 2001. – 343 с.

57) Скобелев П.О. Мультиагентный подход к построению интеллектуальной системы согласованного управления агропредприятиями [Электронный ресурс]. Самара, 2006–2013. Режим доступа: www.kg.ru/Publish/ma.stm.

58) Скобелев П.О. Виртуальные миры и интеллектуальные агенты для моделирования деятельности компаний [Электронный ресурс]. Самара, 2006–2013. Режим доступа: www.kg.ru/Publish/vm.stm.

59) Скобелев П.О. Самоорганизация и эволюция в открытых мультиагентных системах для холонических предприятий [Электронный ресурс]. Самара, 2006–2013. Режим доступа: www.kg.ru/Publish/artic35.htm.

60) Ивкушкин К.В. Мультиагентная система для решения задач логистики / К.В. Ивкушкин, И.А. Минаков, Г.А. Ржевский, П.О. Скобелев // Тр. VII Национальной конф. ИИ–2000. – М.: 2000. – Т. 2. – С. 789–798.

61) Батищев С.В. Разработка пакета программ для построения мультиагентных приложений в сети Интернет / С.В. Батищев, О.И. Лахин, И.А. Минаков, Г.А. Ржевский, П.О. Скобелев // Тр. СНЦ РАН. – Самара, 2001.

62) Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений: дисс. ... д-ра. техн. наук: 05.13.01 / П.О. Скобелев: СамГТУ. – М.: РГБ, 2003. – 418 с.

63) Виттих В.А. Онтологический подход к построению информационно-логических моделей в процессах управления социальными системами / В.А. Виттих, П.В. Ситников, С.В. Смирнов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 5. – С. 45–53.

64) Смирнов С.В. Онтологический анализ в системах компьютерного моделирования: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.01 / С.В. Смирнов; СамГТУ. – М.: РГБ, 2002. – 348 с.

65) Смирнов С.В. Онтологический подход к формированию гетерогенных сред моделирования / С.В. Смирнов // Вестник СамГТУ, сер. «Технические науки». – Самара: СамГТУ, 2011. – № 4 (32). – С. 50–62.

66) Стефанюк В.Л. Локальная организация интеллектуальных систем / В.Л. Стефанюк. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 328 с.

67) Соколов Б.В. Анализ влияния информатики и информационных технологий на развитие теории и систем управления сложными объектами / Б.В. Соколов, Е.Г. Цивирко, Р.М. Юсупов // Труды СПИИРАН, 2009, Вып.11.–С.11–51.

68) Плотников А.М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в Российской Федерации (по материалам конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)) / А.М. Плотников, Ю.И. Рыжиков, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Тр. СПИИРАН, 25 (2013). – С. 42–112.

69) Охтилев М.Ю. Перспективные направления развития информационных технологий мониторинга и управления состояниями сложных технических объектов в реальном масштабе времени / М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов // Тр. СПИИРАН, 22 (2005). – С. 249–265.

70) Хорошевский В.Ф. Семантические технологии: ожидания и тренды / В.Ф. Хорошевский // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. Материалы II международной научно–технической конференции. – Минск: БГУИР, 2012. – С. 143–158.

71) Швецов А.Н. Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений: дисс. докт. техн. наук: 05.13.01 / А.Н. Швецов. – Санкт–Петербург, 2004. – 461 с.

72) Яковлев С.А. Архитектура баз знаний в распределенных интеллектуальных информационных системах / С.А. Яковлев, А.Н. Швецов // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД, САПР, АСНИ и систем искусственного интеллекта: науч.–техн.конф. – Вологда, ВоГТУ, 2001. – С.124–128.

73) Шеер А.В. Моделирование бизнес–процессов / А.В. Шеер. – М.:

Весть–Метатехнология, 2000. – 205 с.

74) Шееп А.В. Бизнес–процессы. Основные понятия. Теория. Методы / А.В. Шееп. – М.: Весть–Метатехнология, 1999. – 182 с.

75) Conway J.H. Regular algebra and finite machines / J.H. Conway. – Chapman and Hall, 1971.

76) Epstein J. M. Remarks on the foundations of agent–based generative social science. Handbook on Computational Economics / J. M. Epstein. – K. Judd and L. Tesfatsion, eds. // North Holland Press, 2005. – Vol. II.

77) Wooldridge M. Intelligent Agent: Theory and Practice / M. Wooldridge, N. Jennings // Knowledge Engineering Review, 1995. – № 10 (2). – P. 115–152.

78) Greenwald A. Guest Editors' Introduction: Agents and Markets / A. Greenwald, N. Jennings, P. Stone // Intelligent Systems, 2003. – Vol.18. –P. 12–14.

79) Dash R. Computational–Mechanism Design: A Call to Arms / R. Dash, D. Parkes, N. Jennings // Intelligent Systems, 2003. – Vol.18. – P. 40–47.

80) McCarthy J. Actions and other events in situation calculus / J. McCarthy, D. Fensel, F. Giunchiglia, D. McGuinness, M. Williams // Proceedings of KR–2002, 2002. – P. 615–628.

81) Minsky M. A framework for Representing Knowledge in The Psychology of Computer Vision / Minsky M. – McGraw–Hill, 1975.

82) Newell A. Unified Theories of Cognition / A. Newell // Harvard University Press; Reprint edition, 1994.

83) Nilsson N. Artificial Intelligence: A New Synthesis / N. Nilsson. – Morgan Kaufmann Publishers, 1998.

84) Russell S. J. Artificial Intelligence: A Modern Approach (2nd ed.) / S. J. Russell, P. Norvig. – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2003.

85) Simon H. A. Reply: Surrogates for Uncertain Decision Problems / H.A. Simon // Models of Bounded Rationality. – Cambridge: Economic Analysis and Public Policy, Mass., MIT Press, 1982. – Volume 1. – P. 235–244.

86) Bordini R. Model Checking Rational Agents / R. Bordini, M. Fisher, W. Visser, M. Wooldridge // Intelligent Systems, 2003. – Vol.18. – P. 40–47.

- 87) Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems / M. Wooldridge. – Wiley, 2009.
- 88) AnyLogic. Учебное пособие по агентному моделированию: [Электронный ресурс]. СПб, 2006–2013. Режим доступа: www.xjtek.com.
- 89) Черняховская Л.Р. Моделирование систем. Конспект лекций / Л.Р. Черняховская. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2007. – 81 с.
- 90) Cassady R. Auctions and Auctioneering / R. Cassady. – Berkeley: University of California Press, 1967.
- 91) Kowalski M., Zelewski S., Bergenrodt D., Klupfel H. Application of new techniques of artificial intelligence in logistics: an ontology-driven case-based reasoning approach // Proceedings of ESM'2012 (ESM – European Simulation and Modelling Conference) October 22–24, 2012, FOM University of Applied Sciences. — Essen, Germany. — P. 323–328.
- 92) Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1971. – 418 с.
- 93) Люггер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Дж.Ф. Люггер; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2003. – 864 с.
- 94) Берг Д.Б. Эволюционные модели роста в условиях ограниченных ресурсов / Д. Б. Берг // Эволюционная экономика и «мэйнстрим»; под ред. Л.И. Абалкина. – М.: Наука. – 2000. – С. 163–179.
- 95) Филиппович А.Ю. Интеграция ситуационного, имитационного и экспертного моделирования в полиграфии / А.Ю. Филиппович. – М.: ООО Эликс+, 2003. – 310 с.
- 96) Klemperer P. Auction Theory: A Guide to the Literature, Journal of Economic Surveys, №13–3, 1999.
- 97) Майкевич Н. Мультиагентные поисковые системы [Электронный ресурс] / Н. Майкевич. М.: Лаборатория, 2007–2012. – Режим доступа: <http://www.mailabs.ru/ai/nut/theory.php>.

98) Бурков В.Н. Введение в теорию активных систем / В.Н. Бурков, В.А. Новиков. – М.: ИПУ, 1996.

99) Бурков В.Н. Механизмы функционирования социально–экономических систем с сообщением информации / В.Н. Бурков, А.К. Еналеев, Д.А. Новиков // М.: АиТ, 1996. – №3.

100) Birkin M. MOSES: Modelling and Simulation for e–Social Science [Электронный ресурс] / M.Birkin [and other]. Режим доступа: www.allhands.org.uk/2005/proceedings/papers/341.pdf.

101) Gordon G. A general purpose systems simulator / G. Gordon. – IBM Syst. J., 1962.

102) Иванов А. Агенты и мультиагентные системы [Электронный ресурс] / А. Иванов. – М.: Блогпост, 2007–2013. Режим доступа: <http://aivanoff.blogspot.com>.

103) Sen S. Learning in Multiagent Systems / S. Sen, G. Weiss // Multiagent Systems, 2001. – P. 259–299.

104) Huhns M.N. Multiagent Systems and Societies of Agents / M.N. Huhns, L.M. Stephens // Multiagent Systems, 2001. – P. 79–121.

105) Маслобоев А.В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом / А.В. Маслобоев // Вестник МГТУ. – Мурманск: МГТУ, 2009. – том 12. – №1. – С. 113–124

106) Маслобоев А.В. Мультиагентная система интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций / А.В. Маслобоев, М.Г. Шишаев // Программные продукты и системы. – Тверь: ЗАО НИИ ЦПС, 2007. – №4. – С. 30–32.

107) Швецов А.Н. Агентно–ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям / А.Н. Швецов // Всероссийский конкурсный отбор обзорно аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно телекоммуникационные системы», 2008. – 101 с.

108) Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

109) Genesereth M.R. Logical Foundations of Artificial Intelligence / M. R. Genesereth, N. Nilsson. – Los Altos: Morgan Kaufmann, 1987. – 405 p.

110) Соколов Г.В. Формальные модели программных агентов в задаче семантического индексирования документов / Г.В Соколов, В.В. Ланин. – Пермь: ПГНИУ, 2011. – 9 с.

111) Ferguson I. A. TouringMachines: An Architecture for Dynamics, Rational, Mobile Agents / I. A. Ferguson. – Cambridge, 1992. – 205 p.

112) Vlassis N. A concise introduction to multiagent systems and distributed AI / N. Vlassis. – Informatics Institute, University of Amsterdam, 2003.

113) B. Moulin. An Overview of Distributed Artificial Intelligence / Moulin B., Chaib-draa B. // G. M. P. O'Hare, N. R. Jennings (eds), Foundations of Distributed Artificial Intelligence, John Wiley & Sons, 1996. – PP. 3–56.

114) Bordini R.H. Multi-Agent Programming: Languages, Tools and Applications / R.H. Bordini, M. Dastani, J. Dix, A. Seghrouchni. – Springer, 2009.

115) The Foundation for Intelligent Physical Agents [Электронный ресурс]. 2010–2013. Режим доступа: <http://www.fipa.org>.

116) Knowledge Query and Manipulation Language [Электронный ресурс]. 2010–2013. Режим доступа: <http://www.cs.umbc.edu/kqml>.

117) Mayfield J. Desiderata for Agent Communication Languages [Электронный ресурс] / J. Mayfield, Y. Labrou, T. Finin // Baltimore: Computer Science and Electrical Engineering Department, 2006–2012. Режим доступа: <http://www.cs.umbc.edu/kqml/papers/desiderata-acl/subsection3.5.7.html>.

118) NEXT-LINK [Электронный ресурс]. 2010–2013. Режим доступа: <http://cdr.stanford.edu/html/NextLink/NextLink.html>.

119) Logic Centered Design [Электронный ресурс]. 2010–2012. Режим доступа: <http://hitchhiker.space.lockheed.com/aic/kcd/README.html>.

120) Concur [Электронный ресурс]. 2010–2012. Режим доступа: <http://piano.stanford.edu/concur/index.html>.

121) National Oceanographic Datacenter [Электронный ресурс]. 2010–2012. Режим доступа: <http://www.nodc.noaa.gov/~disaac>.

122) Гаврилова Т.А. От инженерии знаний к онтологическому инжинирингу [Электронный ресурс] / Т.А. Гаврилова. – Обнинск, 2010–2012. Режим доступа: <http://posp.raai.org/data/posp2005/gavrilova/gavrilova.html>.

123) Гаврилова Т.А. Онтологический инжиниринг [Электронный ресурс] / Т.А. Гаврилова. – СПб.: Ассоциация Бизнес Сервис, 2004–2013. Режим доступа: http://kmttec.ru/publications/library/authors/ontolog_engeneering.shtml.

124) Java agent Development Framework [Электронный ресурс]. Rome, 2006–2013. Режим доступа: <http://jade.tilab.com>.

125) Губко М.В. Управление организационными системами с коалиционным взаимодействием участников. / М.В. Губко. – М.: ИПУ РАН, 2003. – 140 с.

126) Губко М.В. Исследование механизмов распределения ресурса с учетом коалиционного взаимодействия активных элементов / М.В. Губко // Труды юбилейной международной научно–практической конференции «Теория активных систем». М.: Синтег, 1999. – С. 147 – 148.

127) Губко М.В. Модели коалиционного взаимодействия активных элементов в механизмах распределения ресурса и активной экспертизы / М.В. Губко // Тезисы докладов XLII научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных наук». Долгопрудный, 1999. – С. 46.

128) Губко М.В. Коалиционные взаимодействия активных элементов в задачах формирования состава активной системы / М.В. Губко, Ю.В. Дольженко // Тезисы докладов XLIV научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных наук». Долгопрудный, 2001. – С. 20.

129) Борисов В.В. Нечеткие когнитивные модели для выявления коалиций в мультиагентных системах / В.В. Борисов, Е.С. Устиненков // Математическая морфология. Электронный математический и медико–биологический журнал, 2010 – Т. 9. – Вып. 1.

130) Васин А.А. Коалиционные ситуации равновесия в метаиграх / А.А. Васин, В.А. Гурвич // Вестник МГУ. Вычислительная математика и кибернетика, 1980. – № 3. – С. 38 – 44.

131) Vidal J. Fundamentals of Multiagent Systems With NetLogo Examples / J. Vidal. – 2007.

132) Shoham Y., Leyton–Brown K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game–Theoretic, and Logical Foundations / Y. Shoham, K. Leyton–Brown. – Cambridge University Press, 2008.

133) Binmore K. Playing for Real: A Text on Game Theory / K. Binmore. – Oxford University Press, USA, 2007.

134) Russell S. Artificial Intelligence: A Modern Approach (Second Edition) [Электронный ресурс] / S. Russell, P. Norvig // Berkley: Artificial Intelligence, 2007–2013. Режим доступа: <http://aima.cs.berkeley.edu>.

135) Чепасов В.И. Алгоритмическая и программная реализация задачи о расписании: учеб. пособ. / В.И. Чепасов, С.К. Кулов, Ф.Ф. Раимов. – Оренбург: Оренбург. гос. ун–т, 1999. – 192 с.

136) Шахбазян К. В. Обзор методов составления расписаний для многопроцессорных систем / К. В. Шахбазян, Т. А. Тушкина. – Ленинград: Наука, 1975. – С. 229–258.

137) Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. –М.: Радио и связь, 1993.

138) Береговых Ю.В. Алгоритм составления расписания занятий / Ю.В. Береговых, Б.А. Васильев, Н.А. Володин. – Донецк: Искусственный интеллект, №2, 2009. – с. 50–56.

139) Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест // МЦНМО. – Москва, 2000. – С. 960–967.

140) Галузин К.С. Разработка модуля для автоматизации составления оптимального учебного расписания в рамках единой информационной системы образовательного учреждения / К.С. Галузин, Столбов В.Ю. // Известия Белорусской инженерной академии. – Минск, 2003. – № 1 (15).

141) Конференция iXBT.com [Электронный ресурс]. – Москва, 2006–2013. Режим доступа: <http://forum.ixbt.com/topic.cgi?id=40:377>.

142) Конвей Р.В. Теория расписаний / Р.В. Конвей, В.Л. Максвелл, Л.В.

Миллер. – М.: Наука, 1975. – 360 с.

143) Ларичев О.И. Некоторые проблемы искусственного интеллекта / О.И. Ларичев // Сборник трудов ВНИИС, 1990. – №10. – С. 3–9.

144) Ларичев О.И. Объективные модели и субъективные решения / О.И. Ларичев. – М.: Наука, 1987.

145) Гаскаров Д.В. Интеллектуальные информационные системы. Учеб. для вузов / Д.В. Гаскаров. – М.: Высш. шк.. – 2003. – 431 с.

146) Archibald R. O. Managing of High–Technology Programs and Projects. 2th ed. / Archibald R. O. – John Wiley & Sons Inc., 1992.

147) Nenonen L.K. Industrial applications of interactive computer models: a decade of experience / L.K. Nenonen, P.W.U. Graefe, A.W. Chan // Appl. Comput. and Math. Miner. Ind. Pap. Int. Symp. – London, 1984. – P. 713–722.

148) Кальченко Д.А. Агенты приходят на помощь. Эволюция World Wide Web [Электронный ресурс] / Д.А. Кальченко. – М.: КомпьютерПресс, 2005–2013. Режим доступа: <http://www.compress.ru/Article.aspx?id=14688>.

149) Иванов Д. А. Развитие методологических основ гибких организационных форм кооперации промышленных предприятий на основе управления цепями поставок: автореф. дисс. ... докт. экон. наук / Д. А. Иванов. – СПб, 2008.

150) Система имитационного моделирования MagentA. Самара, 2005–2013. Режим доступа: <http://www.magenta-technology.ru>.

151) Файнберг Д. В. Разработка системы поддержки принятия решений для оптимизации управления финансовыми потоками группы предприятий: автореф. дисс. ... канд. тех. наук / Д. В. Файнберг. – Самара, 2007.

152) Заходякин Г.В. Логистическое управление цепями поставок нефтеперерабатывающих предприятий с использованием мультиагентных имитационных моделей / Г.В. Заходякин, В.П. Мешалкин. – М.: Российский химико–технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2003.

153) Ивкушкин К.В. Мультиагентная система для решения задач логистики [Электронный ресурс] / К.В. Ивкушкин, И.А. Минаков, Г.А. Ржевский,

П.О. Скобелев. – Донецк: ДонНТУ, 2004–2013. Режим доступа: <http://www2ters.donntu.edu.ua/2004/fem/adamovich/library/artikl5.htm>.

154) Виттих В.А. Результаты внедрения в Самарской области первой очереди системы управления регионом с применением мультиагентных технологий в рамках ФЦП «Электронная Россия» 2002–2010 г.г. [Электронный ресурс] / В.А. Виттих, П.О. Скобелев, Г.Д. Светкина, Е.А. Гриценко, О.Л. Сурнин, Д.В. Волхонцев. – Самара, 2010–2013. Режим доступа: http://www.kg.ru/?page_id=158.

155) Березняцкий А. В. Интеллектуализация конструирования информационных систем на базе адаптивных агентных моделей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / А.В. Березняцкий; ТПУ. – Томск, 2004. – 148 с.

156) Дианов С.В. Мультиагентная информационная технология решения задач управления и принятия решений в организационных системах: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.10 / С.В. Дианов; ВоГТУ. – Вологда, 2004. – 220 с.

157) Аксенов К.А. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов: монография / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 311 с.

158) Система имитационного моделирования BPsim [Электронный ресурс]. Екатеринбург, 2005–2013. Режим доступа: <http://www.bpsim.ru>.

159) Аксенов К.А. Развитие аппарата прерываний процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксенов // На передовых рубежах науки и инженерного творчества: Труды третьей международной научно – практической конференции Регионального Уральского отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Вестник УГТУ–УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – №15 (45). – Ч.1. – С. 187–190.

160) Аксенов К.А. Система имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов // Научные труды IV отчетной конф. молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ–УПИ: сборник статей. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2003. – Ч.1. – С. 135–136.

161) Аксенов К.А. Разработка и применение средств имитационного

моделирования процессов преобразования ресурсов VPsim [Электронный ресурс] / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов // 7-я Московская международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых. М.: МИФИ, 2003–2013. Режим доступа: <http://molod.mephi.ru/Data/358.htm>.

162) Аксенов К.А. Проблемно–ориентированная система имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов, Е.Ф. Смолий // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2004» в рамках 1–го Евро–Азиатского международного форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2004». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2004. – С. 40–51.

163) Аксенов К.А. Проблемно–ориентированная система имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов, Е.Ф. Смолий // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2004» в рамках 1–го Евро–Азиатского международного форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2004». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2004. – С. 40–51.

164) Аксенов К.А. Создание системы имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов VPsim / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов // Проектирование и анализ радиотехнических и информационных систем: Серия радиотехническая // Вестник УГТУ–УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – № 18 (48). – С. 174–182.

165) Аксенов К.А. Проблемно–ориентированная система имитационного моделирования процессов преобразования ресурсов: Информационные системы в технике и образовании: Серия радиотехническая / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов, Е.Ф. Смолий // Вестник УГТУ–УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – № 19 (49). – С. 20–32.

166) Система RepastJ [Электронный ресурс]. Аргонна, 2010–2012. Режим доступа: <http://repast.sourceforge.net/index.html>.

167) Система Simplex3 [Электронный ресурс]. Москва, 2008–2012. Режим доступа: <http://ivashkin.lgb.ru/Simplex3.html>.

168) Система Tecnomatix Plant Simulation [Электронный ресурс]. Москва, 2010–2013. Режим доступа: http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml.

169) Пешков В.И. Толковый словарь по информатике / В.И. Пешков, В.М. Савинков. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 534 с.

170) Клебанов Б.И. Модель активного преобразователя ресурсов / Б.И. Клебанов, И.М. Москалев // Научные труды международной научно–практической конференции «СВЯЗЬ–ПРОМ 2006» в рамках III Евро–Азиатского международного форума «СВЯЗЬ–ПРОМЭКСПО 2006». – Екатеринбург: ЗАО «Компания Реал–Медиа», 2006. – С. 20–28.

171) Москалев И.М. Система анализа и оптимизации процессов преобразования ресурсов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / И.М. Москалев; УГТУ–УПИ. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 161 с.

172) Бугайченко Д.Ю. Математическая модель и спецификация интеллектуальных агентных систем / Д.Ю. Бугайченко // Системное программирование, 2006. – №2. – С. 94–115.

173) Бугайченко Д.Ю. Разработка и реализация методов формально–логической спецификации самонастраивающихся мультиагентных систем с временными ограничениями: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.11 / Д.Ю. Бугайченко; СПбГУ. – М.: РГБ, 2007. – 259 с.

174) Аксенов К.А. Система динамического моделирования ситуаций и мультиагентный подход / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова, Е.Ф. Смолий // Международная НПК «Новые образовательные технологии в вузе». НОТВ–2005. – Екатеринбург, 2005. – С. 198–199.

175) Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А.В. Борщев // Вторая Всероссийская научно–практическая конференция ИММОД–2005. «Имитационное моделирование. Теория и практика». – СПб.: Exponenta PRO, 2004. – №3–4 (7–8). – С. 38–47.

176) Борщев А.В. Моделирование и анализ параллельных систем реального времени: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.13 / А.В. Борщев. – СПб.:

РГБ, 1994.

177) Бородин А. А. Электронные аукционы в мультиагентной системе для управления телекоммуникационными ресурсами: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.01 / А. А. Бородин; КГТУ. – Краснодар, ГОУ ВПО КГТУ, 2006. – 156 с.

178) Milgrom P. Theory of Auctions and Competitive Bidding / P. Milgrom, R. Weber. – Econometrica, № 50, 1982.

179) Klemperer P. Auctions: Theory and Practice / P. Klemperer. – Princeton: Princeton University Press, 2004.

180) Land A.H. An automatic method of solving discrete programming problems / A.H. Land, A.G. Doig // Econometrica. – 1960. – v. 28. – PP. 497–520.

181) Метод ветвей и границ [Электронный ресурс]. М.: Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, 2006–2013. Режим доступа: http://math.nsc.ru/AP/benchmarks/UFLP/uflp_bb.html.

182) Little J.D.C. An algorithm for the traveling salesman problem / J.D.C. Little, K.G. Murty, D.W. Sweeney, C. Karel // Operations Research, 1963. – v. 11. – PP. 972–989.

183) Бурков В.Н. Теория графов в управлении организационными системами / В.Н. Бурков, А.Ю. Заложнев, Д.А. Новиков. – М.: Синтез, 2001. – 124 с.

184) Задачи оптимизации [Электронный ресурс]. М.: 2011–2013. Режим доступа: <http://uchimatchast.ru>.

185) Johnson S. M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included / S. M. Johnson. – Santa Monica, California: The Rand Corp., 1953. – 402 p.

186) McMahon G.B. Optimal production schedules for flow shops / G.B. McMahon // Canadian operations research society journal, 1969. – №7. – P. 141–151.

187) Lageweg B.J. A general bounding scheme for the permutation flow-shop problem / B.J. Lageweg, J.K. Lenstra, A.H.G. Rinnooy Kann // Operations research, 1978. – Vol. 26. – P. 53–67.

188) Shamma J. Cooperative Control of Distributed Multi-Agent Systems / J.

Shamma. – John Wiley & Sons, 2008.

189) Carlier J. Two branch and bound algorithms for the permutation flow-shop problem / J. Carlier, I. Rebai // European journal of operational research, 1996. – Vol.90. – P. 238–251.

190) Зак Ю.А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч. 1. / Ю.А. Зак // Проблемы управления, 2010. – №3. – С. 17–27.

191) Зак Ю.А. Решение обобщенной задачи Джонсона с ограничениями на сроки выполнения заданий и времена работы машин. Ч. 2. / Ю.А. Зак // Проблемы управления, 2010. – №4. – С. 12–19.

192) Зраенко А.С. Разработка комплекса имитационного моделирования коалиций агентов BPsim.KIT / А.С. Зраенко, К.А. Аксенов // Сборник докладов IV Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика». – СПб: ОАО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2009. Том 1. – С. 262–266.

193) Зраенко А.С. Архитектура мультиагентной системы поддержки согласованной работы [Электронный ресурс] / А.С. Зраенко, К.А. Аксенов // Десятая Всероссийская студенческая научно-техническая Интернет-конференция «Информационные технологии и электроника». – Екатеринбург, 2005. Режим доступа: <http://webconf.rtf.ustu.ru/>.

194) Зраенко А.С. Разработка мультиагентной системы моделирования процессов преобразования ресурсов jSIM / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Е.М. Лазарев // XIV отчетная конференция молодых ученых УГТУ–УПИ. – Екатеринбург, УГТУ–УПИ, 2008. Ч.1. – С.155–158.

195) Зраенко А.С. Разработка систем агентного моделирования процессов преобразования ресурсов с использованием стандартов взаимодействия агентов FIPA и KQML / А.С. Зраенко, К.А. Аксёнов, Е.М. Лазарев, А.С. Мишуринов // Научные труды областного конкурса работ: сборник статей. – Екатеринбург, УГТУ–УПИ, 2008.

196) Зраенко А.С. Использование мультиагентной системы моделирования jMAS для поддержки принятия решений в бизнесе [Электронный ресурс] / А.С. Зраенко, К.А. Аксенов, Е.М. Лазарев // Одиннадцатая Всероссийская студенческая научно-техническая Интернет-конференция "Информационные технологии и электроника". – Екатеринбург, 2008. Режим доступа: <http://webconf.rtf.ustu.ru>.

197) Зраенко А.С. Защита информации в распределенных системах поддержки принятия решений / А.С. Зраенко, К.А. Аксенов // «Безопасность информационного пространства»: материалы международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: Издательство ГОУ ВПО УрГУПС, 2006. – С. 58–64.

198) Зраенко А.С. Архитектура мультиагентной системы поддержки согласованной работы [Электронный ресурс] / А.С. Зраенко, К.А. Аксенов // Десятая Всероссийская студенческая научно-техническая Интернет-конференция "Информационные технологии и электроника". – Екатеринбург, 2005–2013. Режим доступа: <http://webconf.rtf.ustu.ru/>

199) Проектирование тепловых пунктов [Электронный ресурс]. М., 2003–2013. Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=236.

200) Виды тепловых пунктов [Электронный ресурс]. Новосибирск, 2007–2013. Режим доступа: <http://ingenerseti.ru/index.php/Vidy-teplovyyh-punktov.html>.

201) Теплообменники [Электронный ресурс]. Екатеринбург, 2011–2013. Режим доступа: <http://www.apparats.narod.ru/teploob.htm>.

202) Разработка, производство и поставка пластинчатых теплообменных аппаратов и генераторов пресной воды. [Электронный ресурс]. Киев, 1996–2013. Режим доступа: <http://www.sondex.com.ua/index.php/equipment-uses-mn>.

203) Альтернативные энергосистемы. [Электронный ресурс]. Екатеринбург, 2006–2012. Режим доступа: <http://www.aesm.ru>.

204) Сбалансированная система показателей [Электронный ресурс]. – Москва: ВКГ, 2003–2013. Режим доступа: <http://www.balancedscorecard.ru>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЕВ СРАВНЕНИЯ

Для последующего проведения сравнительного анализа математических моделей, определим критерии сравнения (таблица П.1).

Таблица П.1. Критерии сравнения моделей.

№	Критерии
1	Ориентация модели на описание ППР
1.1	Наличие ресурсов, средств, преобразователей, условий запуска
1.2	Иерархическая модель процесса
1.3	Наличие механизма составления расписания
2	Ориентация модели на описание МАС
2.1	Возможность описания агентов
2.2	Возможность описания коалиций
2.2.1	Наличие встроенного механизма формирования коалиций
2.3	Возможность определения целей агента
2.4	Возможность формирования базы знаний агента
2.4.1	– реляционного типа
2.4.2	– инфологического типа (на ограниченном естественном языке)
2.4.3	– сетевого типа (в виде онтологии)
2.5	Наличие языка обмена сообщениями между агентами
2.5.1	– не соответствующего стандарту взаимодействия агентов
2.5.2	– соответствующего стандарту взаимодействия агентов
2.5.3	– разработанного для предметной области МППР на основе стандарта взаимодействия агентов
2.6	Наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени
2.7	Наличие встроенного механизма разрешения конфликтов
2.7.1	– на основе использования стратегий взаимодействия
2.7.2	– на основе организации аукционов

Для последующего проведения сравнительного анализа систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций, определим критерии сравнения (таблица П.2).

Таблица П.2. Критерии сравнения систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций.

№	Критерии
1	Наличие средств проектирования концептуальной модели предметной области
2	Возможности при описании ППР
2.1	Описание ресурсов, средств, преобразователей, условий запуска
2.2	Иерархическая модель процесса
3	Возможности при построении МАС
3.1	Возможность описания агентов

3.2	Возможность описания коалиций
3.3	Возможность определения целей агента
3.4	Возможность формирования базы знаний агента
3.4.1	– реляционного типа
3.4.2	– инфологического типа (на ограниченном естественном языке)
3.4.3	– сетевого типа (в виде онтологии)
3.5	Наличие языка обмена сообщениями между агентами
3.5.1	– не соответствующего стандарту взаимодействия агентов
3.5.2	– соответствующего стандарту взаимодействия агентов
3.5.3	– разработанного для предметной области МППР на основе стандарта взаимодействия агентов
3.6	Наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени
3.7	Наличие встроенного механизма разрешения конфликтов
3.7.1	– на основе использования стратегий взаимодействий
3.7.2	– на основе организации аукционов
3.8	Оптимизация на основе генетических алгоритмов
4	Возможности среды моделирования
4.1	Импорт/экспорт из баз знаний агентов
4.2	Наличие встроенного механизма формирования коалиций в МАС
4.3	Возможность формирования UML–диаграммы последовательности действий при проведении моделирования
4.4	Возможность использования языка высокого уровня (ЯВУ)
4.5	Работа системы с внешними программными комплексами
4.6	Возможность изменения параметров модели во время эксперимента
4.7	Возможность 3D– визуализации моделей
4.8	Наличие встроенных библиотек различных видов агентов
5	Стоимость системы в тыс. у.е. (индекс)

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ

Результаты сравнительного анализа существующих математических моделей, позволяющих описывать МППР, и коалиционной модели МППР приведены в таблице П.3. Каждому из параметров сравнения в таблице П.3 соответствует индекс, определяющий значимость данного параметра. Используются следующие индексы: А, В, С, с числовыми значениями, соответственно: 8, 4, 2. При знаке «+/-» числовому значению индекса по данному параметру присваивается половина соответствующего значения. Строки таблицы, выделенные цветом, определяют «нишу» разработанной коалиционной модели МППР.

Таблица П.3. Сравнительный анализ существующих математических моделей и коалиционной модели МППР.

№	Критерии	Модель управления ППР (Б.И. Клебанова и И.М. Москалева)	Модель открытой МАС (В.А. Виттиха и П.О. Скобелева)	Модель мультиагентного процесса (И.П. Соловьева и Д.Ю. Бугайченко)	Ситуационная модель МППР (К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой)	Модель А.В. Борщева и Ю.Г. Карпова	Коалиционная модель МППР	Индекс
1	Ориентация модели на описание ППР							
1.1	Наличие ресурсов, средств, преобразователей, условий запуска	+	+	+	+	+	+	А
1.2	Иерархическая модель процесса	+	+	+	+	+	+	В
1.3	Наличие механизма составления расписания	+	+	-	-	+	+	В
2	Ориентация модели на описание МАС							
2.1	Возможность описания агентов	+	+	+	+	+	+	А
2.2	Возможность описания коалиций	+	+	+	+	+	+	А
2.2.1	Наличие встроенного механизма формирования коалиций	-	-	-	-	-	+	В
2.3	Возможность определения целей агента	+	+	+	+	+	+	А
2.4	Возможность формирования базы знаний							

№	Критерии	Модель управления ППР (Б.И. Клебанова и И.М. Москалева)	Модель открытой МАС (В.А. Виттиха и П.О. Скобелева)	Модель мультиагентного процесса (И.П. Соловьева и Д.Ю. Бугайченко)	Ситуационная модель МППР (К.А. Аксенова и Н.В. Гончаровой)	Модель А.В. Борщева и Ю.Г. Карпова	Коалиционная модель МППР	Индекс
	агента							
2.4.1	- реляционного типа	+	+	+	+	+	+	С
2.4.2	- инфологического типа (на ограниченном естественном языке)	-	-	-	+	-	+	С
2.4.3	- сетевого типа (в виде онтологии)	+	+	-	-	-	-	А
2.5	Наличие языка обмена сообщениями между агентами							
2.5.1	- не соответствующего стандарту взаимодействия агентов	+	-	-	+	-	-	В
2.5.2	- соответствующего стандарту взаимодействия агентов	-	+	-	-	-	-	А
2.5.3	- разработанного для предметной области МППР на основе стандарта взаимодействия агентов	-	-	-	-	-	+	А
2.6	Наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени	-	-	-	-	-	+	В
2.7	Наличие встроенного механизма разрешения конфликтов							
2.7.1	- на основе использования стратегий взаимодействия	+	+	-	+	+	+	А
2.7.2	- на основе организации аукционов	-	-	-	-	-	+	С
	Сумма значений индексов	62	66	38	52	50	70	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ СИСТЕМ

Результаты сравнения функциональных возможностей систем, близких по функциональности к системам распределения ресурсов и формирования коалиций, и системы jSIM представлены в таблице П.4. Строки таблицы, выделенные цветом, определяют «нишу» разработанной системы jSIM.

Таблица П.4. Сравнительный анализ систем.

№	Параметр	AnyLogic	BPsim2	MagentA	RepastJ	Simplex3	TPS	jSIM	Индекс
1	Наличие средств проектирования концептуальной модели предметной области	-	+	+	-	+	+	+	A
2	Возможности при описании ППР								
2.1	Описание ресурсов, средств, преобразователей, условий запуска	+	+	+	+	+	+	+	A
2.2	Иерархическая модель процесса	+	+	+	+	+	+	+	B
3	Возможности при построении MAC								
3.1	Возможность описания агентов	+	+	+	+	+	+	+	A
3.2	Возможность описания коалиций	+	+	+	+	+	+	+	A
3.3	Возможность определения целей агента	+	+	+	+	+	+	+	A
3.4	Возможность формирования базы знаний агента								
3.4.1	- реляционного типа	+	+	+	+	+	+	+	C
3.4.2	- инфологического типа (на ограниченном естественном языке)	-	+	-	-	-	-	+	C
3.4.3	- сетевого типа (в виде онтологии)	-	-	+	-	-	-	-	A
3.5	Наличие языка обмена сообщениями между агентами								
3.5.1	- не соответствующего стандарту взаимодействия агентов	-	+	-	-	-	-	-	C
3.5.2	- соответствующего стандарту взаимодействия агентов	-	-	+	-	-	-	-	A

№	Параметр	AnyLogic	BPsim2	MagentA	RepastJ	Simplex3	TPS	jSIM	Индекс
3.5.3	- разработанного для предметной области МППР на основе стандарта взаимодействия агентов	-	-	-	-	-	-	+	A
3.6	Наличие встроенного механизма составления оптимальных планов выполнения работ агентами с учетом ограничений по времени	-	-	-	-	-	-	+	B
3.7	Наличие встроенного механизма разрешения конфликтов								
3.7.1	- на основе использования стратегий взаимодействий	+	-	+	-	-	-	+	C
3.7.2	- на основе организации аукционов	-	-	-	-	-	-	+	B
3.8	Оптимизация на основе генетических алгоритмов	-	-	-	-	-	+	-	B
4	Возможности среды моделирования								
4.1	Импорт/экспорт из баз знаний агентов	+/-	+/+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/+	B
4.2	Наличие встроенного механизма формирования коалиций в МАС	-	-	-	-	-	-	+	B
4.3	Возможность формирования UML-диаграммы последовательности действий при проведении моделирования	-	-	-	-	-	-	+	C
4.4	Возможность использования языка высокого уровня (ЯВУ)	+	-	-	+	+	-	-	B
4.5	Работа системы с внешними программными комплексами	+	-	+	+	-	-	-	B
4.6	Возможность изменения параметров модели во время эксперимента	+	+	+	+	+	+	+	B
4.7	Возможность 3D- визуализации моделей	+	-	-	+	-	+	-	B
4.8	Наличие встроенных библиотек различных видов агентов	+	-	-	+	-	-	-	A
5	Стоимость системы в тыс. у.е. (индекс)	5 (C)	3 (B)	1,3 (A)	0 (A)	3 (B)	10 (C)	5 (C)	
	Сумма значений индексов	68	62	82	72	60	62	82	

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «Альтернативные
энергосистемы»

А.Ю. Толмачев

« 19 » _____ марта _____ 2013 г.

АКТ

Внедрения результатов научно-исследовательской работы аспиранта Зраенко А.С., д.т.н., профессора Федотова В.П., к.т.н., докторанта Аксенова К.А. в ООО «Альтернативные энергосистемы».

С помощью мультиагентной системы поддержки принятия решений (МСППР) «jSIM», в период с июня 2012 года по февраль 2013 года, была спроектирована динамическая мультиагентная модель производства индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) в ООО «Альтернативные энергосистемы».

Использование системы «jSIM» позволило:

1. Повысить скорость выполнения заказов и эффективность использования имеющихся ресурсов и средств при производстве индивидуальных тепловых пунктов.
2. Провести исследование влияния стратегий взаимодействия менеджеров проектов на финансовые показатели компании и выработку наиболее выгодной организационной схемы производства индивидуальных тепловых пунктов.

В результате применения МСППР «jSIM» чистая прибыль ООО «Альтернативные энергосистемы» от деятельности по производству ИТП выросла на 27%.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Генеральный директор
 ФГУП «Уралгеоинформ»

А.А. Алябьев

2008 г.



АКТ

Внедрения результатов научно-исследовательской работы к.т.н., докторанта Аксенова К.А., аспиранта Зраенко А.С., студента Лазарева Е.М. на ФГУП «Уралгеоинформ».

С помощью мультиагентной системы моделирования процессов преобразования ресурсов «jSIM» в период с октября 2007 года по апрель 2008 года была спроектирована динамическая мультиагентная модель поступления заказов на разработку геоинформационных систем на ФГУП «Уралгеоинформ».

Использование данной системы позволило:

1. Определить (спрогнозировать) динамику поступления заказов, издержек и прибыли предприятия, определить возможность увеличения числа заказов.
2. Определить наиболее эффективную стратегию для главного инженера проектов (лица, принимающего решение), позволяющую наиболее эффективно управлять имеющимися кадровыми ресурсами, и, как следствие, выполнять наибольшее число заказов в единицу времени.
3. Повысить эффективность работы производственных подразделений предприятия вследствие наличия возможности прогнозирования наиболее эффективного распределения кадровых ресурсов между поступающими заказами.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО Агентство недвижимости «КИМ»

Л.К. Меньщикова

2008 г.



АКТ

Внедрения результатов научно-исследовательской работы к.т.н., докторанта Аксенова К.А., аспиранта Зраенко А.С., студента Лазарева Е.М. в ООО Агентство недвижимости «КИМ».

С помощью мультиагентной системы моделирования процессов преобразования ресурсов «jSIM» в период с декабря 2007 года по май 2008 года была спроектирована динамическая мультиагентная модель поступления заявок на приобретение и продажу недвижимости в ООО Агентство недвижимости «КИМ».

Использование данной системы позволило:

1. Определить наиболее вероятную динамику поступления заявок, издержек и прибыли агентства недвижимости, определить возможности увеличения числа заявок.
2. Определить стратегию деятельности генерального директора, позволяющую наиболее эффективно управлять имеющимися кадровыми ресурсами, и, как следствие, выполнять наибольшее число заявок в единицу времени.
3. Повысить эффективность работы агентства недвижимости, вследствие наличия возможности прогнозирования наиболее эффективного распределения кадровых ресурсов между поступающими заявками.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ ПЛАНА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО АЛГОРИТМУ ДЖОНСОНА

1 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
1	a	5	2
2	b	2	3
3	c	0	6
4	d	8	1
5	e	3	2
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
10	j	3	15
11	k	5	12
12	l	4	16
13	m	3	5
14	n	7	16
15	o	3	11

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 0$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 1$$

$$A - B = -1$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

с (c

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

)

2 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
1	a	5	2
2	b	2	3
4	d	8	1
5	e	3	2
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
10	j	3	15
11	k	5	12
12	l	4	16
13	m	3	5
14	n	7	16
15	o	3	11

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 2$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 1$$

$$A - B = 1$$

$A - B > 0$ выбор работы из B
 размещение работы $S^* =$ (c

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 d)

3 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
1	a	5	2
2	b	2	3
5	e	3	2
6	f	6	6

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 2$$

$$A - B = 1$$

$A - B > 0$ выбор работы из B
 размещение работы $S^* =$ (c b a d)

5 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
5	e	3	2
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
10	j	3	15
11	k	5	12
12	l	4	16
13	m	3	5
14	n	7	16
15	o	3	11

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 3$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 2$$

$$A - B = 1$$

$A - B > 0$ выбор работы из B
 размещение работы $S^* =$ (c b e a d)

6 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы
---	--------------------	-----------------------------------	-------------------------

			(B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
10	j	3	15
11	k	5	12
12	l	4	16
13	m	3	5
14	n	7	16
15	o	3	11

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 3$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 5$$

$$A - B = -2$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

j
(c b j e a d)

7 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
11	k	5	12
12	l	4	16
13	m	3	5
14	n	7	16
15	o	3	11

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 3$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 5$$

$$A - B = -2$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A размещение работы $S^* =$ m (c b j m e a d)

7 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
11	k	5	12
12	l	4	16
14	n	7	16
15	o	3	11

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 3$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 6$$

$$A - B = -3$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A размещение работы $S^* =$ o (c b j m o e a d)

8 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6

7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
11	k	5	12
12	l	4	16
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 4$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 6$$

$$A - B = -2$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

l
(c b j m o l e a d)

9 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
8	h	5	16
9	i	5	12
11	k	5	12
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 5$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 6$$

$$A - B = -1$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

h
(c b j m o l h e a d)

10 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
9	i	5	12
11	k	5	12
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 5$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 6$$

$$A - B = -1$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

i
(c b j m o l h i e a d)

11 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
11	k	5	12
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 5$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 6$$

$$A - B = -1$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

k
(c b j m o l h i k e a d)

12 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
6	f	6	6
7	g	7	7
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 6$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 6$$

$$A - B = 0$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A f
 размещение работы $S^* =$ (c b j m o l h i k f e a d)

13 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
7	g	7	7
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 7$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 7$$

$$A - B = 0$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A g
 размещение работы $S^* =$ (c b j m o l h i k f g e a d)

14 проход цикла

№	Обозначение работы	Время 1-го этапа работы (A_i)	Время 2-го этапа работы (B_i)
14	n	7	16

$$A = \min \{A_i, i=1, n\} = 7$$

$$B = \min \{B_i, i=1, n\} = 16$$

$$A - B = -9$$

$A - B \leq 0$ выбор работы из A
размещение работы $S^* =$

g
(c b j m o l h i k f g n e a d)

Результаты

Оптимальное расписание:

$S^*=$

(c b j m o l h i k f g n e a d)

Штраф за превышение времени: 28

Затраченное время: 130

t, дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
A	b		j			m			o			l			h			i					k				f					
B	c						b			j											m				o							
T						15			19															120					100			
Q																																

33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65		
f				g					n							e			a				d											
o								l														h												
							140																70											

66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
d																																
h							i										k										f					
						60											130													150		
						7																										

99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
f				g							n													e		a		d			
			130							50																160		6		10	29
										8																		2		3	8

28

28

		A	B	T	Q	штраф
1	a	5	2	10	3	3
2	b	2	3	19	1	
3	c	0	6	15	3	
4	d	8	1	29	8	8
5	e	3	2	6	2	2
6	f	6	6	130	4	
7	g	7	7	50	8	8
8	h	5	16	60	7	7
9	i	5	12	130	5	
10	j	3	15	120	5	
11	k	5	12	150	6	
12	l	4	16	70	3	
13	m	3	5	100	2	
14	n	7	16	160	5	
15	o	3	11	140	5	

ИТОГО штраф: 28

ПРИЛОЖЕНИЕ 6. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ ПЛАНА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО ВРЕМЕНИ

Пример построения оптимального расписания S^{**} на основе расписания Джонсона.
Размещение работы

$S^* = (\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline \text{с} & \text{b} & \text{j} & \text{m} & \text{o} & \text{l} & \text{h} & \text{i} & \text{k} & \text{f} & \text{g} & \text{n} & \text{e} & \text{a} & \text{d} \\ \hline \end{array})$

по алгоритму Джонсона – оно оптимальное.

Определим $X^* = \sum_{i=1}^J X_i$ при оптимальном размещении Джонсона, в нашем случае оно равно 0.

Согласно теории, это время простоя при оптимальном размещении работ, при нашем размещении нельзя допустить превышения X^* , т.е. $\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$.

1 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

Пересортируем в соответствии с расписанием

№	работы	(A_i)	(B_i)	(T_i)	(Q_i)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
14	n	7	16	160	5
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18

Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	43	102	-59
Y12	50	109	-59
Y13	53	125	-72
Y14	58	127	-69
Y15	66	129	-63

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
15	0
14	0
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

15 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$130+0 \leq 29$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

2 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент а.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
14	n	7	16	160	5
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	43	102	-59
Y12	50	109	-59
Y13	53	125	-72
Y14	61	127	-66
Y15	66	128	-62

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
15	0
14	0
13	0

12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

15 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$130+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

3 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е.

№	работы	(A_i)	(B_i)	(T_i)	(Q_i)
3	с	0	6	15	3
2	б	2	3	19	1
10	ж	3	15	120	5
13	м	3	5	100	2
15	о	3	11	140	5
12	л	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
14	n	7	16	160	5
1	a	5	2	10	3

4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	43	102	-59
Y12	50	109	-59
Y13	55	125	-70
Y14	63	127	-64
Y15	66	128	-62

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
15	0
14	0
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

15 работа e

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad \text{выполняется}$$

130+0≤6 не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

4 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент n.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
14	n	7	16	160	5

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	43	102	-59
Y12	46	109	-63
Y13	51	111	-60
Y14	59	113	-54
Y15	66	114	-48

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	43	102	-59
Y12	46	109	-63
Y13	54	111	-57
Y14	59	112	-53

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
14	0
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0

5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

14 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$114+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

6 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18

Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	43	102	-59
Y12	48	109	-61
Y13	56	111	-55
Y14	59	112	-53

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
14	0
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

14 работа е

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$114+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

7 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
6	f	6	6	130	4
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	36	96	-60
Y11	39	102	-63
Y12	44	104	-60
Y13	52	106	-54
Y14	59	107	-48

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
14	0
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0

5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

14 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$114+0 \leq 50$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

8 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент f.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
6	f	6	6	130	4

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18

Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	37	96	-59
Y11	40	103	-63
Y12	45	105	-60
Y13	53	107	-54
Y14	59	108	-49

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
14	0
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

14 работа f

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$114+0 \leq 130$$

выполняется

Значит, целевое расписание , $S^{**}=(, , , , , , , , , , f, n)$

2 проход цикла 2

J

13 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

108+0<=29

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

9 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент а.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	37	96	-59
Y11	40	103	-63
Y12	48	105	-57
Y13	53	106	-53

время простоя по работам

J	$\sum_{j=1}^J x_j$
13	0
12	0
11	0

10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

13 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$108+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

10 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е.

№	работы	(A_i)	(B_i)	(T_i)	(Q_i)
3	с	0	6	15	3
2	б	2	3	19	1
10	ж	3	15	120	5
13	м	3	5	100	2
15	о	3	11	140	5
12	л	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0

Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	37	96	-59
Y11	42	103	-61
Y12	50	105	-55
Y13	53	106	-53

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J 13 работа е

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^* выполняется

$$108+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

11 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
11	k	5	12	150	6
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	30	84	-54
Y10	33	96	-63
Y11	38	98	-60
Y12	46	100	-54
Y13	53	101	-48

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0

2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

13 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$108+0 \leq 50$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

12 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент k.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
11	k	5	12	150	6

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	32	84	-52
Y10	35	91	-56

Y11	40	93	-53
Y12	48	95	-47
Y13	53	96	-43

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
13	0
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

13 работа k

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$$

108+0<=150 выполняется

Значит, целевое расписание , $S^{**}=(, , , , , , , , , , k, f, n)$

2 проход цикла 2

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

12 работа d

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$$

96+0<=29 не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

13 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент а.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	32	84	-52
Y10	35	91	-56
Y11	43	93	-50
Y12	48	94	-46

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0

1	0
---	---

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

12 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$96+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

14 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е.

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	о	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	32	84	-52
Y10	37	91	-54
Y11	45	93	-48
Y12	48	94	-46

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

12 работа е

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$96+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

15 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g.

№	работы	(A_i)	(B_i)	(T_i)	(Q_i)
3	с	0	6	15	3
2	б	2	3	19	1
10	ж	3	15	120	5
13	м	3	5	100	2
15	о	3	11	140	5
12	л	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
9	i	5	12	130	5
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8

7	g	7	7	50	3
---	---	---	---	----	---

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	25	72	-47
Y9	28	84	-56
Y10	33	86	-53
Y11	41	88	-47
Y12	48	89	-41

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

12 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

<=

X*

выполняется

$$96+0 \leq 50$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

16 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент i .

№	работы	(A_i)	(B_i)	(T_i)	(Q_i)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
9	i	5	12	130	5

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	27	72	-45
Y9	30	79	-49
Y10	35	81	-46
Y11	43	83	-40
Y12	48	84	-36

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^n x_i$
12	0
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0

2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

12 работа i

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$96+0 \leq 130$$

выполняется

Значит, целевое расписание , $S^{**}=(, , , , , , , , , i, k, f, n)$

2 проход цикла 2

J

11 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$84 \leq 29$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

17 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент a

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4

Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	27	72	-45
Y9	30	79	-49
Y10	38	81	-43
Y11	43	82	-39

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

11 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$84+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

18 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	б	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	м	3	5	100	2

15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	27	72	-45
Y9	32	79	-47
Y10	40	81	-41
Y11	43	82	-39

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

11 работа е

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$84+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

19 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	20	56	-36
Y8	23	72	-49
Y9	28	74	-46
Y10	36	76	-40
Y11	43	77	-34

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0

3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

11 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$84+0 \leq 50$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

20 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент h

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
12	l	4	16	70	3
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
8	h	5	16	60	7

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	15	40	-25
Y7	22	56	-34
Y8	25	63	-38
Y9	30	65	-35
Y10	38	67	-29

Y11	43	68	-25
-----	----	----	-----

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

11 работа h

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$84+0 \leq 60$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

21 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент 1

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
15	o	3	11	140	5
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
12	l	4	16	70	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	11	29	-18
Y6	16	40	-24
Y7	23	56	-33
Y8	26	63	-37
Y9	31	65	-34
Y10	39	67	-28
Y11	43	68	-25

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

11 работа 1

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

$\leq$

X^*

выполняется

$$84+0 \leq 70$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

22 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент о

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
15	o	3	11	140	5

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	12	29	-17
Y6	17	45	-28
Y7	24	61	-37
Y8	27	68	-41
Y9	32	70	-38
Y10	40	72	-32
Y11	43	73	-30

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
11	0
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

11 работа о

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$84+0 \leq 140$$

выполняется

Значит, целевое расписание, $S^{**} = (, , , , , , , , , o, i, k, f, n)$

2 проход цикла 2

J

10 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$73+0 \leq 29$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

23 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент a

№	работы	(A _i)	(B _i)	(T _i)	(Q _i)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	12	29	-17
Y6	17	45	-28
Y7	24	61	-37
Y8	27	68	-41
Y9	35	70	-35
Y10	40	71	-31

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста
1 проход цикла 2

J

10 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$73+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

24 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4

Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	12	29	-17
Y6	17	45	-28
Y7	24	61	-37
Y8	29	68	-39
Y9	37	70	-33
Y10	40	71	-31

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

10 работа е

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$73+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

25 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7

5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	12	29	-17
Y6	17	45	-28
Y7	20	61	-41
Y8	25	63	-38
Y9	33	65	-32
Y10	40	66	-26

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

10 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$73+0 \leq 50$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

26 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент h

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
12	l	4	16	70	3
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
8	h	5	16	60	7

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	12	29	-17
Y6	19	45	-26
Y7	22	52	-30
Y8	27	54	-27
Y9	35	56	-21
Y10	40	57	-17

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

10 работа h

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad \text{выполняется}$$

73+0≤60 не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

27 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент 1

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
13	m	3	5	100	2
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
12	l	4	16	70	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	13	29	-16
Y6	20	45	-25
Y7	23	52	-29
Y8	28	54	-26
Y9	36	56	-20
Y10	40	57	-17

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0

3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

10 работа 1

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$73+0 \leq 70$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

28 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент m

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
13	m	3	5	100	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	9	24	-15
Y5	14	40	-26
Y6	21	56	-35
Y7	24	63	-39
Y8	29	65	-36
Y9	37	67	-30
Y10	40	68	-28

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J X_i$
-----	--------------------

10	0
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

10 работа m

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$73+0 \leq 100$$

выполняется

Значит, целевое расписание , $S^{**}=(, , , , , , , , m, o, i, k, f, n)$

2 проход цикла 2

J

9 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$68+0 \leq 29$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

29 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент a

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	3

4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	9	24	-15
Y5	14	40	-26
Y6	21	56	-35
Y7	24	63	-39
Y8	32	65	-33
Y9	37	66	-29

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

9 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$68+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

30 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3

2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	9	24	-15
Y5	14	40	-26
Y6	21	56	-35
Y7	26	63	-37
Y8	34	65	-31
Y9	37	66	-29

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

9 работа e

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$68+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

31 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
12	l	4	16	70	3
8	h	5	16	60	7
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	9	24	-15
Y5	14	40	-26
Y6	17	56	-39
Y7	22	58	-36
Y8	30	60	-30
Y9	37	61	-24

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

9 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i$$

<= X* выполняется

68+0<=50

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

32 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент h

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
12	l	4	16	70	3
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
8	h	5	16	60	7

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	9	24	-15
Y5	16	40	-24
Y6	19	47	-28
Y7	24	49	-25
Y8	32	51	-19
Y9	37	52	-15

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
9	0
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

9 работа h

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$68+0 \leq 60$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

33 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент 1

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
12	l	4	16	70	3

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	10	24	-14
Y5	17	40	-23
Y6	20	47	-27
Y7	25	49	-24
Y8	33	51	-18
Y9	37	52	-15

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
9	0
8	0
7	0
6	0

5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

9 работа l

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$$

68+0<=70 выполняется

Значит, целевое расписание , S**=(, , , , , , , l, m, o, i, k, f, n)

2 проход цикла 2

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

8 работа d

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^*$$

52+0<=29 не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

34 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент a

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4

Y3	5	9	-4
Y4	10	24	-14
Y5	17	40	-23
Y6	20	47	-27
Y7	28	49	-21
Y8	33	50	-17

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

8 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$52+0 \leq 10$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

35 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент е

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	б	2	3	19	1
10	ж	3	15	120	5
8	h	5	16	60	7
7	g	7	7	50	8
1	а	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	10	24	-14
Y5	17	40	-23
Y6	22	47	-25
Y7	30	49	-19
Y8	33	50	-17

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

8 работа e

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$52+0 \leq 6$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

36 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g

№	работы	(A _i)	(B _i)	(T _i)	(Q _i)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
8	h	5	16	60	7
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3

4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	10	24	-14
Y5	13	40	-27
Y6	18	42	-24
Y7	26	44	-18
Y8	33	45	-12

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

8 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$52+0 \leq 50$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

37 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент h

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5

7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
8	h	5	16	60	7

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	12	24	-12
Y5	15	31	-16
Y6	20	33	-13
Y7	28	35	-7
Y8	33	36	-3

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
8	0
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

8 работа h

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$52+0 \leq 60$$

выполняется

Значит, целевое расписание , $S^{**}=(, , , , , , h, l, m, o, i, k, f, n)$

2 проход цикла 2

J

7 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X^*

выполняется

$$36+0 \leq 29$$

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

38 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент а

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
7	g	7	7	50	8
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	12	24	-12
Y5	15	31	-16
Y6	23	33	-10
Y7	28	34	-6

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста
1 проход цикла 2

J

7 работа а

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$36+0 \leq 10$$

не выполняется

39 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент e

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
7	g	7	7	50	8
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	12	24	-12
Y5	17	31	-14
Y6	25	33	-8
Y7	28	34	-6

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

7 работа e

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$36+0 \leq 6$$

не выполняется

40 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент g

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	13	26	-13
Y6	21	28	-7
Y7	28	29	-1

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
7	0
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

7 работа g

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

выполняется

$$36+0 \leq 50$$

выполняется

Значит, целевое расписание , S**=(, , , , , g, h, l, m, o, i, k, f, n)

2 проход цикла 2

 J

6 работа d

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

29+0<=29

не выполняется

Раз неравенство не выполнилось, выходим из цикла 2

41 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент a

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
5	e	3	2	6	2
4	d	8	1	29	8
1	a	5	2	10	3

	сумма A	сумма B	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	8	24	-16
Y5	16	26	-10
Y6	21	27	-6

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

 J

6 работа a

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad \text{выполняется}$$

29+0≤10 не выполняется

42 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент e

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
5	e	3	2	6	2

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	10	24	-14
Y5	18	26	-8
Y6	21	27	-6

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

6 работа e

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad \text{выполняется}$$

29+0≤6 не выполняется

43 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент j

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
3	с	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
10	j	3	15	120	5

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	2	6	-4
Y3	5	9	-4
Y4	10	11	-1
Y5	18	13	5
Y6	21	14	7

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
6	7
5	5
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

J

6 работа j

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq$$

X*

не выполняется

$$29 + 7 \leq 120$$

выполняется

т.е. максимальное время простоя $7 \leq 0$ не выполняется

значит определение этой работы в расписание ухудшит временные характеристики и приведет к задержке выполнения всех работ - не

будем определять в целевое расписание

44 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент j

№	работы	(A _i)	(B _i)	(T _i)	(Q _i)
3	с	0	6	15	3
10	j	3	15	120	5
5	е	3	2	6	2
1	а	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
2	b	2	3	19	1

	сумма А	сумма В	разница
Y1	0		0
Y2	3	6	-3
Y3	6	21	-15
Y4	11	23	-12
Y5	19	25	-6
Y6	21	26	-5

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
6	0
5	0
4	0
3	0
2	0
1	0

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

$$\sum_{i=1}^J B_i + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i \quad 6 \text{ работа b}$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad \begin{array}{l} \text{выполняется} \\ \text{не выполняется} \end{array}$$

29 + 0 <= 19

45 проход цикла 1

Рассчитаем:

$$Y_J = \sum_{i=1}^J A_i - \sum_{i=1}^{J-1} B_i$$

переставляем последним предыдущий с хвоста элемент j

№	работы	(Ai)	(Bi)	(Ti)	(Qi)
2	b	2	3	19	1
10	j	3	15	120	5
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
4	d	8	1	29	8
3	c	0	6	15	3

	сумма A	сумма B	разница
Y1	2		2
Y2	5	3	2
Y3	8	18	-10
Y4	13	20	-7
Y5	21	22	-1
Y6	21	23	-2

время простоя по работам

J	$\sum_{i=1}^J x_i$
6	2
5	2
4	2
3	2
2	2
1	2

Цикл 2 по номеру работы в расписании с хвоста

1 проход цикла 2

$$\sum_{i=1}^J B_i^J + \sum_{i=1}^J X_i \leq T_i \quad 6 \text{ работа b}$$

$$\sum_{i=1}^J X_i \leq X^* \quad \text{не выполняется}$$

29 + 2 <= 15 не выполняется

Результаты

Таким образом, мы рассмотрели все варианты для оставшихся шести работ. Поэтому оставляем эти шесть работ в порядке, определенном по алгоритму Джонсона.

Таким образом, целевое расписание: $S^{**} = (c, b, j, e, a, d, g, h, l, m, o, i, k, f, n)$.

Оптимальное расписание с учетом ограничения по времени:

$$S^{**} = (\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline c & b & j & e & a & d & g & h & l & m & o & i & k & f & n \\ \hline \end{array})$$

Штраф за превышение времени: 5.

Затраченное время равно оптимальному времени по алгоритму Джонсона: 130.

t, дни	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
A	b		j			e			a					d							g							h				
B	c					b			j															e		a		d	g			
T						15			19															120		6		10	29			
Q																										2		3				

[illegible][illegible]

99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
k										f						n															
									150						130																160

5

		A	B	T	Q	штраф
1	a	5	2	10	3	3
2	b	2	3	19	1	
3	c	0	6	15	3	
4	d	8	1	29	8	
5	e	3	2	6	2	2
6	f	6	6	130	4	
7	g	7	7	50	8	
8	h	5	16	60	7	
9	i	5	12	130	5	
10	j	3	15	120	5	
11	k	5	12	150	6	
12	l	4	16	70	3	
13	m	3	5	100	2	
14	n	7	16	160	5	
15	o	3	11	140	5	

ИТОГО штраф: 5

ПРИЛОЖЕНИЕ 7. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОСТАВЛЕНИЯ ПЛАНА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО АЛГОРИТМУ Ю.А. ЗАКА

Отсортируем ограничения по времени (представленные в таблице 4.1) в соответствии с алгоритмом Ю.А. Зака.

№	Обозначение работы	Время на выполнение 1–го этапа работы 1–ым множеством ресурсов и средств (A_i)	Время на выполнение 2–го этапа работы 2–ым множеством ресурсов и средств (B_i)	Ограничение по времени выполнения работ (T_i)	Сумма штрафа за превышение времени выполнения работ (Q_i)
5	e	3	2	6	2
1	a	5	2	10	3
3	c	0	6	15	3
2	b	2	3	19	1
4	d	8	1	29	8
7	g	7	7	50	8
8	h	5	16	60	7
12	l	4	16	70	3
13	m	3	5	100	2
10	j	3	15	120	5
6	f	6	6	130	4
9	i	5	12	130	5
15	o	3	11	140	5
11	k	5	12	150	6
14	n	7	16	160	5

Результаты

Оптимальное расписание по алгоритму Ю.А. Зака с учетом ограничения по времени:

$$S^{**} = (\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline e & a & c & b & d & g & h & l & m & j & f & i & o & k & n \\ \hline \end{array})$$

Штраф за превышение времени: 3.

Затраченное время (равно оптимальному времени по Джонсону): 136.

[illegible][illegible][illegible]

105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136
o				k												n															
			140												150																160

3

		A	B	T	Q	штраф
5	e	3	2	6	2	
1	a	5	2	10	3	
3	c	0	6	15	3	3
2	b	2	3	19	1	
4	d	8	1	29	8	
7	g	7	7	50	8	
8	h	5	16	60	7	
12	l	4	16	70	3	
13	m	3	5	100	2	
10	j	3	15	120	5	
6	f	6	6	130	4	
9	i	5	12	130	5	
15	o	3	11	140	5	
11	k	5	12	150	6	
14	n	7	16	160	5	

ИТОГО штраф: 3