

**Российская  
академия  
наук**

**Институт  
проблем  
информатики**

**А.В. Колесников, И.А. Кириков, С.В. Листопад**

**ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
С САМООРГАНИЗАЦИЕЙ:  
КООРДИНАЦИЯ, СОГЛАСОВАННОСТЬ, СПОР**



**2014**



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем информатики  
Российской академии наук

**А.В. Колесников, И.А. Кириков, С.В. Листопад**

**ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
С САМООРГАНИЗАЦИЕЙ:  
КООРДИНАЦИЯ, СОГЛАСОВАННОСТЬ, СПОР**

Москва  
2014

УДК 004.83

**Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В.**  
**ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ С САМООРГАНИЗАЦИЕЙ: КООРДИНАЦИЯ, СОГЛАСОВАННОСТЬ, СПОР**  
– М.: ИПИ РАН, 2014. – 189 с., ил. – ISBN 978-5-91993-032-2

В книге рассматриваются вопросы моделирования самоорганизации и коллективных эффектов в системах поддержки принятия решений: координации, согласованности и спора. Описываются функциональные гибридные интеллектуальные системы моделирования рассуждений экспертов и лиц, принимающих решения в системах поддержки принятия решений. Предлагаемые модели апробированы на сложных задачах планирования производства и транспортной логистики.

Издание предназначено для специалистов в области автоматизированного решения задач обработки информации и управления. Книга также будет полезна студентам и аспирантам, изучающим информатику и системы искусственного интеллекта.

**Рецензент:**

доктор технических наук В.М. Ченцов

© Колесников А.В., Кириков И.А.,  
Листопад С.В., 2014

© Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем  
информатики Российской академии наук, 2014

ISBN 978-5-91993-032-2

## СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....	5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 САМООРГАНИЗАЦИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ .....	10
1.1 Актуальность самоорганизующихся интеллектуальных систем управления .....	10
1.2 Основные подходы к объяснению самоорганизации .....	16
1.3 Компьютерное моделирование самоорганизации .....	20
1.4 Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией .....	26
2 СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ: КОЛЛЕКТИВНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИЯХ ...	29
2.1 Особенности коллективного принятия решений .....	29
2.2 Концептуальная модель системы поддержки принятия решений .....	37
2.3 Самоорганизация в системах поддержки принятия решений .....	47
2.4 Исследование самоорганизации, координации, согласованности и спора в системах поддержки принятия решений .....	52
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ КООРДИНАЦИИ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ .....	57
3.1 Модель «Сложная задача с координацией» .....	57
3.2 Концептуальная модель координации в системах поддержки принятия решений .....	64
3.3 Алгоритм координации в системах поддержки принятия решений .....	71
3.4 Модель функциональной гибридной интеллектуальной системы с координацией .....	76
3.5 Решение сложной задачи оперативно-производственного планирования с координацией в инструментальной среде «Гибридная система планирования» .....	86
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СОГЛАСОВАННОСТИ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ .....	98
4.1 Концептуальная модель согласованности в системах поддержки принятия решений .....	98

4.2 Модель гибридной интеллектуальной многоагентной системы с самоорганизацией на основе анализа согласованности целей агентов .....	105
4.3 Архитектура гибридной интеллектуальной многоагентной системы для решения сложной транспортно-логистической задачи.....	119
4.4. Результаты вычислительных экспериментов по решению сложной транспортно-логистической задачи с использованием гибридной интеллектуальной многоагентной системы .....	127
<b>5 МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОРА В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>136</b>
5.1 Понятие спора в психологии, лингвистике, философии, математике, искусственном интеллекте и системном анализе .....	136
5.2 Спор в системах поддержки принятия решений .....	140
5.3 Нечеткая система спора моделей в функциональной гибридной интеллектуальной системе .....	147
5.4 Решение сложной логистической задачи методом организации спора моделей.....	162
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>176</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>178</b>

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$X$  – множество концептов

$R$  – множество отношений

$RES = X^{res} \subseteq X$  – множество ресурсов (англ. resource)

$PR = X^{pr} \subseteq X$  – множество свойств

$ACT = X^{act} \subseteq X$  – множество действий

$VAL = X^{val} \subseteq X$  – множество значений

$ST = X^{st} \subseteq X$  – множество состояний

$PRB = X^{prb} \subseteq X$  – множество задач

$MET = X^{met} \subseteq X$  – множество методов

$MOD = X^{mod} \subseteq X$  – множество моделей

$R^{\alpha\beta} \subseteq R$  – множество отношений между концептами из множества  $X^\alpha$  и множества  $X^\beta$ , где  $\alpha, \beta \in \{ "res", "pr", "act", "val", "st", "prb", "met", "mod" \}$

$\widetilde{dss}$  – микроуровневая модель СППР

$\widehat{dss}$  – макроуровневая модель СППР

$PRT \subseteq RES$  – множество участников СППР

$\widetilde{DSS}$  – множество моделей СППР на микроуровне

$\widetilde{DSS}_{coord} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР с координацией

$\widetilde{DSS}_{coord}^{\neg} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР без координации

$\widetilde{DSS}_{coop} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР с сотрудничеством

$\widetilde{DSS}_{neut} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР с нейтралитетом

$\widetilde{DSS}_{comp} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР с конкуренцией

$\widetilde{DSS}_{disp} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР со спором

$\widetilde{DSS}_{disp}^{\neg} \subseteq \widetilde{DSS}$  – множество микроуровневых моделей СППР без спора

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЛГЕУР – алгебраические уравнения  
АПР – агент, принимающий решения  
БД – база данных  
ГА – генетический алгоритм  
ГиИС – гибридная интеллектуальная система  
ГиИМАС – гибридная интеллектуальная многоагентная система  
ГСМ – горюче-смазочные материалы  
ГСП – гибридная система планирования  
ДСМ-метод – метод Джона Стюарта Милля  
ИИ – искусственный интеллект  
ИТР – инженерно-технический работник  
КД – конструкторская документация  
КСППР – компьютерная система поддержки принятия решений  
КТПИ1 – анализ соответствия имеющихся ресурсов требованиям конструкторской документации  
КТПИ2 – анализ соответствия имеющихся ресурсов требованиям технологической документации  
ЛИНГВИСТИЧ – лингвистические рассуждения  
ЛОГИЧ – логические рассуждения  
ЛПР – лицо, принимающее решения  
МАС – многоагентная система  
МФПС – метод формализованного представления систем  
НС – нейронная сеть  
ОГК – отдел главного конструктора  
ОМТС – отдела материально-технического снабжения  
ОПП – оперативно-производственное планирование  
ОУ – объект управления  
ПИ1 – прогнозирования результатов выполнения оперативного графика  
ПИ2 – оптимизации количества выпускаемой продукции  
ПИ3 – планирования и контроля выполнения ремонтных работ  
ПИ4 – задача координации  
ПИ5 – учета, контроля и регулирования обеспечением материальными ресурсами  
ПП – программный продукт  
ПЭК1 – планирование и контроль оплаты заказов  
ПЭК2 – учет и контроль отпускной цены на продукцию  
СППР – система поддержки принятия решений



СКМ – система компьютерного моделирования  
СЛЗ – сложная логистическая задача  
СТАТИСТ – статистические представления  
СТЛЗ – сложная транспортно-логистическая задача  
ТД – технологическая документация  
ТРАНСМАР – транспортный маршрутизатор  
ФГиИС – функциональная гибридная интеллектуальная система  
ФУНКЗА – функциональные зависимости  
ЭВМ – электронная вычислительная машина  
ЭМО – электромеханического отдела  
ЭС – экспертная система  
ЯПД – язык профессиональной деятельности  
СВР-система – система прецедентных рассуждений (англ. case-based reasoning)  
CDE-модель – модель самоорганизации коллектива «container – difference – exchange»  
ERP – планирование ресурсов предприятия (англ. Enterprise resource planning)

## ВВЕДЕНИЕ

Разработки «умных» компьютеров начались более полувека назад. Однако вскоре эйфория от первых успехов: математической модели нейрона, первых экспертных систем и нечеткой логики — сменилась разочарованием. На практике системы не могли решить даже простейшие задачи. Стало очевидно, что интеллектуальные системы чрезвычайно сложны и требуют глубоких научных исследований. Такие работы еще далеки от завершения, но определенные результаты уже получены. Компьютерные системы распознавания текста и диагностики заболеваний, системы помощи водителям автомобиля и системы управления космическими кораблями, системы точного земледелия и управления дорожным движением — все это результаты развития технологий искусственного интеллекта.

Однако, информационные интеллектуальные системы, создатели которых придерживались парадигмы моделирования процессов и явлений в памяти одного человека оказались непригодны для решения сложных практических задач. Проблема состоит в том, что компьютерные технологии остаются средой реализации методов, а не инструментальным средством их синтеза. В результате, на практике со сложными задачами и уникальными ситуациями справляются только коллективы экспертов под руководством ЛПР. Взаимодействуя в ходе обсуждения, эксперты обмениваются данными, знаниями, объяснениями и частичными решениями общей задачи. При этом возникают процессы самоорганизации, направляемые отношениями кооперации, компромисса, содействия, конкуренции, приспособления и др., и определяющие синергетический эффект, когда коллективное, интегрированное решение оказывается лучше частных мнений экспертов.

Таким образом, по аналогии с экспертными системами, позволившими компьютеру рассуждать «не хуже» одного человека, актуальны ЭВМ, работающая в условиях сложных задач не хуже коллектива специалистов. Профессор Д.А. Поспелов выделил задачу моделирования коллективного принятия решений как одну из десяти «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту.

В книге представлены результаты решения фундаментальной проблемы синергетического искусственного интеллекта, связанной с интеграцией различных форм знаний в интересах взаимокompенсации недостатков и объединения преимуществ разнородных моделей для преодоления комбинаторной сложности задач. Синергетические системы

обладают значительным потенциалом имитации рассуждений специалистов, решающих сложные, практические задачи. Рассматриваются компьютерные модели СППР и эффекты самоорганизации, обусловленные процессами координации, согласованности и спора, а также их применение для решения сложных практических задач, в частности, планирования производства и транспортной логистики.

Книга состоит из пяти глав. Первая глава посвящена исследованию явлений самоорганизации и вопросов их моделирования с помощью ГиИС. Во второй главе рассматривается коллективное принятие решений и возникающие при этом коллективные эффекты.

В последующих главах рассматриваются методы и модели синергетического, гибридного искусственного интеллекта, построенные по проблемно-структурной методологии [1] профессора А.В. Колесникова, для решения таких сложных задач, как оперативное планирование мелкосерийного производства и транспортная логистика.

В третьей главе предлагается метод моделирования процесса «координация» в СППР с использованием ГиИС, апробированный на задаче оперативного планирования мелкосерийного производства.

Четвертая глава посвящена моделированию процесса «согласованность» при принятии коллективных решений в СППР с использованием ГиИМАС и применению таких систем для решения сложной транспортно-логистической задачи.

В пятой главе предлагается метод организации спора моделей в ФГиИС для решения транспортно-логистической задачи.

Авторы благодарны соискателям ученой степени кандидата технических наук факультета автоматизации производства и управления ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет» Сергею Солдатову и Алексею Доманицкому, которые внесли большой вклад в написание третьей и пятой глав настоящей книги.

# 1 САМООРГАНИЗАЦИЯ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

## 1.1 Актуальность самоорганизующихся интеллектуальных систем управления

Двадцатый век принес в искусственный интеллект «свежий ветер» перемен социальной в смысле М.Минского и системной в смысле В.Б.Тарасова парадигмами, определяющими, что каждая технология обладает как преимуществами, так и недостатками, и только в комбинации методов и моделей может возникнуть эмерджентность и синергетический эффект, когда дополнительность и сотрудничество минимизируют частные недостатки и позволяют автоматизировано решать сложные задачи практики принятия решений. Перемены коснулись терминологии, теории, методологии, технологии и практики ИИ. В 1966 году W. Witsenhausen предложил модель гибридной системы, а в 1978 г. Н.П. Бусленко приступил к разработке унифицированных, междисциплинарных, комбинированных методов и моделей: агрегатов и агрегативных систем. В 1987 – 1993 гг. L. Tavernini, A. Nerode, W. Kohn, J. Antsaklis, J. Stiver, M.D. Lemmon, A. Back, J. Guckenheimer, M.A. Myers, R.W. Brockett разработали базовые модели гибридных систем, развитие которых по многокомпонентности и связности осуществили M.S. Branicky, V.S. Bonkar, S.K. Mitter в 1994 году. В этом же году A. Puri, P. Varaija определили гибридную систему из координируемых компонент – гибридных автоматов, а в 1996 г. G. Walsh – формализм сети гибридных систем. В 1983 – 1986 гг. Я.А. Гельдфандбейн, А.В. Колесников и И.Д. Рудинский разработали многомодельную семиотическую систему, Д.А. Поспелов и А.Н. Борисов ввели понятие гибридных экспертных систем, а Г.В. Рыбина развивала концепцию интегрированных экспертных систем. Гибридные интеллектуальные системы (ГиИС) были анонсированы в 1994 – 1995 гг. в работах L. Medsker, и, по существу, совпадают с интеллектуальными гибридными системами S. Goonatilake и S. Khebbal (1997 г.), гибридными интегрированными системами (2001 г.) и гибридными интеллектуальными адаптивными системами N. Kasabov, R. Kozma (1998 г.). В 1998 г. Г.С. Осипов исследовал гибридные системы с дискретной частью, основанной на знаниях, а в 1997 г. В.Н. Вагин и А.П. Еремеев предложили для поддержки принятия решений семиотическую систему распределенного интеллекта. В этом же году С.В. Астанин и В.Г. Захаревич построили модель системы гибридного интеллекта, а в 1998 г В.Б. Тарасов определил нечеткую эволюци-

онную многоагентную систему. В 1998 г. специалисты компании Филлипс ввели понятие интеллектуальной среды (интеллектуального пространства), а Ю.Р. Валькман построил исчисление моделей. В 2000 г. А.В. Колесников и А.М. Яшин ввели в информатику понятия гетерогенной и гомогенной задачи [2]. История гибридизации представлена в [1].

На рубеже XX и XXI веков вопросы гибридизации в информатике изучены, обобщены и опубликованы в работах А.Н. Борисова [3], А.В. Гаврилова [4], И.А. Кирикова [5, 6], А.В. Колесникова [1, 5, 6], Д.А. Поспелова [7], Г.В. Рыбиной [8], В.Б. Тарасова [9], Н.Г. Ярушкиной [10, 11], S. Goonatilake и S. Khebbal [12], L. Medsker [13]. В России сложились несколько школ в этой области междисциплинарных знаний: Д.А. Поспелова – В.Б. Тарасова, В.Н. Вагина – А.П. Еремеева, Г.В. Рыбиной в Москве, Н.Г. Ярушкиной в Ульяновске и В.Ф. Пономарева – А.В. Колесникова в Калининграде.

В настоящее время актуальными вопросами являются: 1) контрастность для исследования, особенно для молодых ученых, специалистов по информатике и научно-практического сообщества, фундаментального свойства окружающего мира, которое изучается в Калининградской школе более 30 лет – гетерогенности; 2) отображение в моделях гетерогенности для релевантности информационных интеллектуальных систем оригиналу и получение консультаций по качеству – не хуже, чем предлагают коллективы, принимающие решения в сложных задачах.

Люди всегда стремятся понять мир, в котором они живут, а степень понимания определяется их мировоззрением и картиной мира. В ИИ понятию «картина мира» соответствует понятие «модель внешнего мира» Д.А. Поспелова и М.Г. Гаазе-Раппопорта [7]. Человек познает окружающую его действительность через «призму» своей уникальной модели внешнего мира. Известно основополагающее влияние общепринятой в обществе картины мира на гибридизацию в информатике.

Под мировоззрением понимаются взгляды, оценки, нормы установок и принципов, определяющих общее видение и понимание мира, места в нем человека, выраженные в жизненной позиции, программах поведения и действиях людей. Для наших рассуждений важна часть мировоззрения – обобщенные знания, картина мира.

Первая картина мира основана на классической физике без наблюдателя. Объект полностью и однозначно определяется конечным временным набором параметров. Пространство безгранично, абсолютно, однородно и изотропно. Время есть длительность бытия; уравнения механики Ньютона и электродинамики Максвелла – обратимы.

Вторая картина мира строится на «вероятностно-статистических» представлениях А.Эйнштейна – Н.Бора. Причинность для категории части и целого не сводится к лапласовскому детерминизму. Простран-

ство может быть любой размерности и геометрии, а время – поставленная наблюдателем отметка события, характеризующая последовательность смены состояний или длительность чего-либо.

Третья картина мира утверждает, что нельзя доверять обилию показателей или закону больших чисел: нет «средних значений», нет «равенства», каждая «особь» индивидуальна. При планировании и создании техники расчётные замыслы расходятся с их реализацией, возникают допуски. Пространство и время гетерогенны.

Многие ученые утверждают, что мир стоит на пороге смены парадигмы управления природой и обществом, модели жизнедеятельности.

Новая картина мира складывается из многочисленных теорий и взглядов:

- "ноосфера", "разумный мир" (В.И. Вернадский, Н.Н. Моисеев, А.В. Поздняков);
- "мир диалектики" – мир диалога разных логик (Е.Л. Доценко);
- социальная парадигма искусственного интеллекта ("The society of mind") М.Минского;
- системно-организационный подход в ИИ В.Б.Тарасова;
- теория иерархических многоуровневых систем М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахару;
- мир НЕ-факторов А.С. Нариньяни; гибридный интеллект в психологии и эргономике В.Ф. Венды;
- "Спектроглобус" В.П. Грибашева;

и укладывается в семь постулатов:

1) Квантово-волновой характер описания мира, признание факта его неоднородности (гетерогенности) и любого объекта, разнообразия жизни;

2) Неопределенность границ объектов и связь «всего со всем»;

3) Относительность любой иерархии. Иерархия должна сочетаться с горизонтальными связями;

4) Принцип дополнительности и сотрудничества;

5) Полицентризм;

6) Принцип относительности знания. Введение в описание явления системы координат наблюдателя для снижения относительности и неопределённости;

7) Принцип соответствия управления сложности объекта.

Подчеркнем фундаментальные категории (свойства) новой, четвертой картины мира: гетерогенность, разнообразие, дополнительность, сотрудничество и относительность знания.

Категория гетерогенности, – ответ на потребности в развитии знаний по физике и химии. Отсюда и общедоступное определение: гетероген-

ная система (от греческого ἕτερος – разный; γένω – рождать) – неоднородная система, состоящая из однородных частей, разделенных поверхностью раздела, разрывами в непрерывности физических свойств. Однородные части могут отличаться друг от друга по составу и свойствам. Физика, химия традиционно применяют это понятие для исследования естественных, природных систем и создания искусственных объектов и сред с полезными свойствами.

Разнообразие – признак, проявление гетерогенности. Н. Чернышевский утверждал, что «где нет жизни – нет идеи; где нет бесконечного разнообразия – нет жизни». Разнообразие – общесистемная категория верхнего уровня абстракции общих свойств предметов и явлений окружающего мира. Результаты исследования разнообразия С. Биром, У.Р. Эшби и В.М. Глушковым составили фундамент кибернетики, теории управления, системного анализа и информатики. У.Р. Эшби подчеркивал, что только разнообразие может уничтожить разнообразие, а С. Бир в книге «Мозг фирмы» отмечал, что кибернетика научила работать с разнообразием: создавать, оценивать количество, фильтровать и управлять им. Вследствие закона необходимого разнообразия У.Р. Эшби управление обеспечивается только в том случае, если разнообразие средств управляющего, по крайней мере, не меньше разнообразия управляемой ситуации, что достигается организацией и самоорганизацией. В настоящее время организация ассоциируется с вертикалью управления, а самоорганизация с горизонтальными коллективами – системами поддержки принятия решений.

«Комплементарии!» – эмоциональное высказывание Н. Бора. Английское слово complementary означает дополнительный, добавочный. Н. Бор определил принцип дополненности: при экспериментальном исследовании микрообъекта могут быть получены точные данные либо о его энергиях и импульсах (квантовая механика), либо о его поведении в пространстве и времени (модель атома Э.Резерфорда). Эти две взаимоисключающие картины: энергетически-импульсная и пространственно-временная, получаемые при взаимодействии микрообъекта с измерительными приборами, «дополняют» друг друга. В информатике дополненность определили М. Месарович, Д. Мако и И. Такахара в стратифицированной системе – совокупности «взглядов» на один и тот же объект с разных профессиональных точек зрения (позиций).

Сотрудничать по С.И.Ожегову – значит работать вместе, участвовать в общем деле. Концепция сотрудничества – порождение восточного, японского менталитета – первоначально отвергнута Западом, где господствовала конкуренция: «Я выиграл – ты проиграл», однако, позже Запад переориентировался на принцип сотрудничества «Выигрываем вместе». В ИИ сотрудничают методы, модели, технологии и агенты:

цель взаимодействия «выигрывать вместе», коллективно. Принципы дополнительности и сотрудничества отражаются терминами «интегрированные», «гибридные», «синергетические» интеллектуальные системы и роевой интеллект.

Сократ говорил: «Я знаю, что я ничего не знаю. Но люди воображают, будто они что-то знают, а оказывается, что они не знают ничего. Вот и получается, что, зная о своем незнании, я знаю больше, чем все остальные». Относительность знания в науке ассоциируется с субъективностью познания и необходимостью учитывать характеристики структуры реальности, при которых эти знания были получены. В ИИ относительность знания трактуют в терминах стратификации: не надо стремиться к единственной и заведомо сложной и нерелевантной оригиналу модели, полезнее разработать множество простых моделей – страт с индивидуальными и субъективными мнениями экспертов. За «систему координат», смена которых и определяет относительность знаний, принимается точка зрения и профессиональные знания участника коллектива принимающего решения.

Сконцентрируем дальнейшее изложение на тезисе, что необходимого для принятия решений разнообразия в ситуациях, удовлетворяющих модели «гетерогенная задача», система достигает самоорганизацией своих частей. Отношение целого и частей исследуется философией, математикой, информатикой, системным анализом и другими науками.

Философское осмысление данной проблемы восходит к работам Аристотеля [14]. К настоящему времени сложились две антагонистические концепции соотношения целого и частей, противоположные исходные принципы которых образовали «антиномии целостности». Важнейшие из них: 1) тезис: целое есть не более чем сумма своих частей; антитезис: целое есть нечто большее, чем сумма его частей; 2) тезис: целое познается через знание его частей; антитезис: знание целого предшествует познанию его частей; 3) тезис: части предшествуют целому; антитезис: целое предшествует своим частям. Философская позиция, сводящая целое к его частям и рассматривающая свойства целого только как сумму свойств его частей, получила наименование меризма. Противоположная позиция, подчеркивающая несводимость целого к частям, обретение целым новых свойств по сравнению с частями, называется холизмом. В физике и биологии выражением меризма явились механицизм и редукционизм. Холистическая позиция проявилась в теории эмерджентной эволюции, в витализме и в гештальтпсихологии.

В истории философии и познания практически все мыслители склонялись либо к меризму, либо к холизму, причем порой один и тот же мыслитель при решении одних вопросов отдавал предпочтение меризму, а при решении других – холизму. Платон и средневековые схоласты



склонны подчеркивать примат целого по отношению к его частям. Английские эмпирики 17–18 вв. и представители французского Просвещения под влиянием успехов ньютоновской механики полагали, что всякое целое может быть без остатка разложено на составные части и познание этих частей полностью раскрывает природу любой целостности. Немецкая классическая философия (напр., Шеллинг [15] и Гегель [16]) разработала идею о различии между органичной (способной к саморазвитию) и неорганичной целостностью. В неорганическом (механическом) целом части, сохраняя свою самостоятельность, взаимодействуют друг с другом. Части «органического» целого лишены самостоятельности, более того, вне целого они вообще не существуют. Применительно к органическому целому более уместно говорить не о «частях целого», а о «органах» «тотальности» [14].

Исследования соотношения частей и целого в математике и информатике определили множество алгоритмов декомпозиции, главным образом, формализованных систем: диакоптика Г.Крона [17], методы подструктур [18, 19], Шварца (итерационные методы подструктур) [18, 20], разделения графов [21], декомпозиции данных [22], функциональной декомпозиции [22]. Важно отметить, что данные методы разрабатывались и применяются для декомпозиции формализуемых искусственных систем, что обеспечивает возможность представления системы множеством взаимосвязанных частей.

В современной науке соотношение части и целого получило точную разработку в системном подходе. Выделяют «суммативные» и «интегративные» системы. К суммативным относят совокупности элементов, свойства которых почти целиком исчерпываются свойствами входящих в них элементов и которые лишь количественно превосходят свои элементы, не отличаясь от них качественно. Вхождение какого-либо элемента в такую совокупность ничего или почти ничего ему не добавляет, связи между элементами в таких системах чисто внешние и случайные.

Интегративные системы можно считать органично целым и такие совокупности предметов отличаются следующими особенностями: 1) приобретают новые свойства, т.е. свойства, принадлежащие именно совокупности, а не отдельным частям; 2) связи между их элементами определяют причинно-следственные зависимости; 3) придают своим элементам свойства, которыми элементы не обладают вне системы. Именно такие системы представляют собой подлинные целостности, а их элементы – подлинные части.

Для автоматизированного решения сложных задач требуется создание в компьютере искусственных гетерогенных систем с самоорганизацией – «виртуальных коллективов», способных интегрировать разнородную информацию (нечеткую, лингвистическую, статистическую и

т.п.), поступающую из множества источников, и на ее основе предоставлять рекомендации ЛПР. При этом следует не просто объединить в рамках одной системы несколько различных технологий ИИ, они должны дополнять и компенсировать недостатки друг друга. Результат такой интеграции – проявление синергетического эффекта, когда интегрированное решение качественно лучше решений, предлагаемых применением отдельных методов.

Ключевой вопрос: «Каким образом следует интегрировать методы ИИ, чтобы получить систему релевантную сложной задаче?». В реальных системах проявление синергетического эффекта во многом обусловлено самоорганизацией (разд. 1.2), которая связана с коллективными процессами (разд. 2.4). В данной работе исследуется взаимосвязь самоорганизации с такими процессами как координация (глава 3), согласованность (глава 4) и спор (глава 5). И предложены интегрированные методы решения, моделирующие процессы координации (рис. 1.1,а), согласованности (рис. 1.1,б) и спора (рис. 1.1,в), возникающие при решении сложных задач.

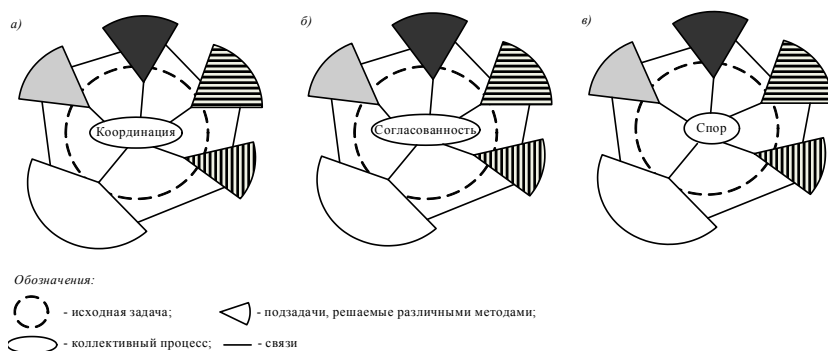


Рис. 1.1 – Модели интегрированных методов решения сложных задач:  
 а) с координацией; б) с согласованностью; в) со спором

Моделирование самоорганизации (разд. 1.3) имитацией данных процессов позволит создавать релевантные существующим сложным, трудноформализованным задачам автоматизированные средства, в которых комбинирование различных технологий искусственного интеллекта приводит к возникновению желаемого синергетического эффекта.

## 1.2 Основные походы к объяснению самоорганизации

В последние десятилетия самоорганизация стала распространенным междисциплинарным понятием [23]. Научные школы сходятся в одном

– система проявляет самоорганизацию, если она способна самостоятельно определять свою внутреннюю структуру, реагируя на изменения окружающей среды. Такое поведение системы позволяет ей адаптироваться к изменяющейся внешней среде, и принимать нестандартные решения, что подчеркивается многими отечественными и зарубежными учеными [24 – 27].

Процессы самоорганизации типичны для окружающего мира [28, 29]: ячейки Бенара (структура, возникающая в тонком слое вязкой жидкости при критическом перепаде температуры между верхней и нижней поверхностью слоя, рис. 1.2, а); мицеллы (структуры неоднородных по степени растворимости в воде молекул, возникающие в водных растворах, рис. 1.2, б); процесс размножения гриба миксомицета (на стадии размножения множество клеток собираются в точку, специализируются и образуют гриб, после чего он выбрасывает споры и жизненный цикл начинается заново, рис. 1.2, в).

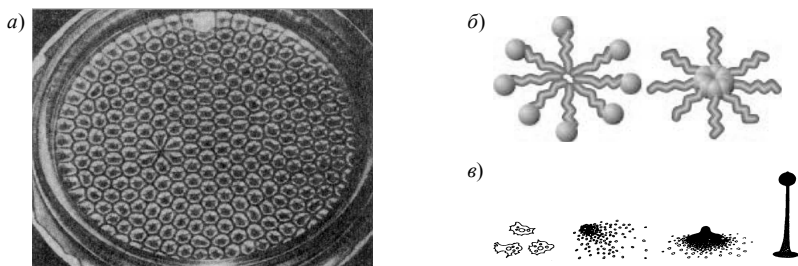


Рис. 1.2 – Примеры самоорганизации в природе и технике:

а) ячейки Бенара; б) мицелла в полярной (слева), т.е. с низкой концентрацией растворенного в воде вещества, и неполярной (справа), т.е. с высокой концентрацией растворенного в воде вещества, средах; в) жизненный цикл гриба миксомицета

Идеи самоорганизации восходят к работам И. Канта, Г.В.Ф. Гегеля, а в XX в. – А. Богданова, Э. Шредингера, Л. Бергаланфи, Н. Моисеева, И. Пригожина, И. Стенгерс, Г. Хакена и др. [30]. Считается [31], что синергетика (теория самоорганизации) берет свое начало в 1963 году, когда вышел рассказ Р. Брэдли «И грянул гром», в котором автор показывает, что незначительные действия (например, раздавленная бабочка) могут привести к серьезным последствиям через значительный промежуток времени. В том же году Э. Лоренц обнаружил, что при расчете сложных систем дифференциальных уравнений, в частности, предложенной им модели конвекции воздуха, серьезное влияние на решение оказывает точность (три или шесть знаков после запятой) входных данных, а Р. Фейнман высказал идею о невозможности долгосрочных про-

гнозов для системы, состоящей из большого числа взаимодействующих простых детерминированных подсистем: малейшая неточность в определении начального состояния системы нарастает со временем, и делает бесполезным долгосрочный прогноз, даже если система детерминирована. С этого момента начинается накопление материалов, подтверждающих проявления эффектов самоорганизации в системах различной природы.

К настоящему времени единого, всеми принятого определения термина «самоорганизация» не существует [32]. Ниже приведено несколько определений.

Самоорганизация системы (по Н.Н. Моисееву) – процесс изменения ее состояния (характеристик), который происходит без целенаправленного (целенаправляемого) начала, каковы бы ни были источники целеполагания [32].

Самоорганизация (по Е.Н. Князевой и С.П. Курдюмову) – процесс установления в системе порядка, происходящий исключительно за счет кооперативного действия и связей ее компонентов и в соответствии с ее предыдущей историей, приводящий к изменению ее пространственной, временной или функциональной структуры [33].

Самоорганизация – процесс спонтанного упорядочивания (перехода от хаоса к порядку), образования и эволюции структур в открытых нелинейных средах [33].

Самоорганизация системы (по Г. Хакену) – возникновение некоторой пространственной, временной и функциональной структуры системы без специфического воздействия извне [29].

Специфическое воздействие, в понимании Г.Хакена, – воздействие, навязывающее системе структуру или функционирование. В противном случае воздействие называется неспецифическим, которое и испытывает самоорганизующаяся система. Пример — электромагнитные колебания в генераторах электрических сигналов, а также в оптических квантовых генераторах – лазерах.

Самоорганизация – целенаправленный процесс, в ходе которого создается, воспроизводится или совершенствуется организация сложной динамической системы [34].

Самоорганизация (по В.Е. Хиценко) – спонтанный процесс становления и поддержания взаимokoординации элементов системы с повышением ее сложности и неравновесности [35]. Это движение от высокоэнтропийного безжизненного хаоса в направлении абсолютного безжизненного порядка, который никогда не достигается.

Понятие самоорганизации в последние десятилетия применяется практически во всех научных дисциплинах, объясняя загадочные явления возникновения сложных макроструктур в результате взаимодейст-

вия относительно простых сущностей [36], например, в космологии для объяснения порядка во Вселенной [37]; во фрактальной геометрии и теории катастроф [38 – 40]; в физике при описании оптических квантовых генераторов [29, 41 – 43]; в химии при объяснении процессов возникновения мицелл (рис. 1.2, б) [44]; в экологии для объяснения эволюции сложных экосистем [45]; в биологии при описании эволюции гиперциклов и изучении взаимодействия между бактериями, клетками или особями в коллективах животных таких, как муравейники, косяки рыб или рои пчел [46 – 50]; в медицине для объяснения нарушений здоровья, например, эпилепсии, болезней сердца и рака [51]; в лингвистике для исследования истоков лексиконов, грамматик и фонетических систем [52, 53]; в психологии для объяснения возникновения высокоуровневых когнитивных структур [54]; в социологии и управлении при сравнении управляемых, организованных сверху и спонтанных, возникающих снизу сообществ [55 – 57]; в экономике для понимания «невидимой руки», управляющей рынком [30, 31]; в географии при изучении городов и регионов как самоорганизующихся систем [58]; в информатике и робототехнике как стратегии совместного выполнения сложных задач простыми агентами [59 – 66]; в философии как основа нового мировоззрения, охватывающего все уровни от материи до разума и социума [6, 33, 67 – 76].

Анализ этих подходов к определению и применению понятия «самоорганизация» позволяет выделить следующие общие свойства самоорганизующихся систем [28]:

- эндогенный глобальный порядок: самоорганизующаяся система переходит из одного стабильного состояния в другое, причем конечное состояние определяется внутренними процессами системы;
- эмерджентность: в самоорганизующихся системах за счет внутренних взаимодействий элементов возникает явление эмерджентности (целостности); это явление наблюдается на макроуровне (при рассмотрении системы в виде «черного ящика»); свойство эмерджентности подразумевает, что свойства (функциональность) системы как целого не сводится к сумме свойств (функций) ее элементов;
- простые локальные правила: общее сложное функционирование системы основано на простых локальных правилах работы ее элементов; для описания локальных правил функционирования элементов требуется меньше информации, чем для описания функции системы в целом; информация о функционировании элементов описывает механизм образования глобальной функции системы, а не саму функцию;
- нестабильность: системы, проявляющие нестабильность, главным образом, характеризуются нелинейной динамикой, когда небольшие флук-

туации окружающей среды приводят к значительным изменениям в функционировании системы; такие системы чувствительны к начальным условиям и значениям параметров, т.е. небольшое изменение параметров может приводить к серьезным различиям в функционировании системы;

– множество равновесных состояний: в точке бифуркации (в момент нестабильности) существует множество равновесных состояний, в которые может перейти система; это обусловлено тем, что в точке бифуркации система попадает область некоторой особенности фазового пространства своих состояний [29];

– критическое состояние: наличие в самоорганизующихся системах пороговых эффектов и фазовых переходов; самоорганизация присуща системам, которые находятся в состоянии далеком от равновесного.

В последние десятилетия активно развиваются методы моделирования самоорганизации на ЭВМ: нейро-, психо-, био-, социокibernетика. Социологическая ветвь расширяется очень интенсивно, осмысливая применительно к проблемам социума кибернетические модели и концепции сложности, уникальные результаты когнитивной психологии, лингвистики, семиотики и искусственного интеллекта [77 – 80]. Особое место занимает эволюционная кибернетика [81], изучающая информационные аспекты биологической эволюции, становление кибернетических свойств живых организмов, феномен возникновения сознательных проявлений жизни.

### **1.3 Компьютерное моделирование самоорганизации**

Переход от классической парадигмы ИИ к синергетической заключается в изменении точки зрения на принципы разработки и механизмы функционирования интеллектуальных систем. Если в классическом подходе к созданию интеллектуальных систем разработчик должен был определять для каждой конкретной задачи свой метод решения, то в рамках синергетической парадигмы от него требуется построение системы, способной самостоятельно конструировать метод решения задачи.

Технологии синергетического ИИ: 1) эволюционные вычисления, в частности, генетические алгоритмы; 2) нейронные сети; 3) клеточные автоматы; 4) гибридные интеллектуальные системы; 5) многоагентные системы.

Эволюционные вычисления берут за основу эволюционные механизмы природы [82] и включает: генетические алгоритмы, эволюционное моделирование и эволюционное программирование, которые сильно

различались на начальных этапах развития, но сегодня трудно отнести конкретный алгоритм к тому или иному направлению [83].

Исследования по генетическим алгоритмам берут начало в работах Д. Холланда и его коллег [78, 84, 85]. Схема работы простейшего генетического алгоритма, лежащего в основе любой системы, построенной по технологии эволюционных вычислений, представлена на рис. 1.3.

На первом шаге генерируется начальная популяция  $P = \{p_i | i = 1, \dots, N_p\}$  особей (хромосом, индивидуумов)  $p_i$ , т.е. некоторый набор решений задачи, где  $N_p$  – размер популяции. Как правило, это делается случайным образом. Каждая хромосома  $p_i$  состоит из генов (элементы, части закодированного решения), которые могут иметь числовые (двоичные, десятичные и т.п.) или функциональные значения. Затем моделируется размножение особей популяции, а часть особей подвергается мутации – случайному изменению одного (или нескольких) генов. Эти действия выполняются до тех пор, пока не будет удовлетворен некоторый критерий останова.

Таким образом, в системах, построенных в рамках эволюционных вычислений, моделируется их эволюционное развитие, континуальная самоорганизация при каждом эволюционном изменении системы (на каждом поколении). При этом процесс самоорганизации может модифицироваться, что проявляется в эволюционных стратегиях в самоадаптации параметров. Результаты анализа [86] показали, что в эволюционных вычислениях моделируются все общие свойства (разд. 1.2), характерные для самоорганизующихся систем.

Другой подход к самоорганизации составил базис технологии синергетического ИИ – искусственных нейронных сетей, основы которой заложили У.С. Мак-Каллок и В. Питтс [87]. В настоящее время искусственные нейронные сети используют в задачах прогнозирования, распознавания образов, в задачах управления и других. При этом моделируются процессы в реальных нейронных сетях: установление и модификация связей между элементарными частями нейронной сети – нейронами – в процессе обучения.

Искусственный нейрон имитирует в первом приближении свойства биологического нейрона [1, 88, 89]. На вход модели (рис. 1.4) поступает

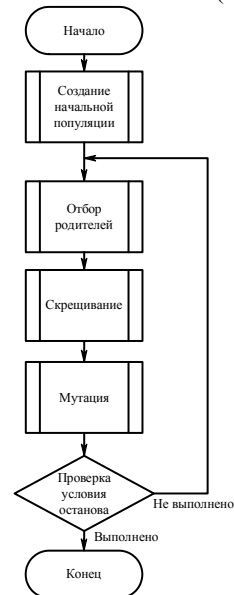


Рис. 1.3 – Схема работы классического генетического алгоритма

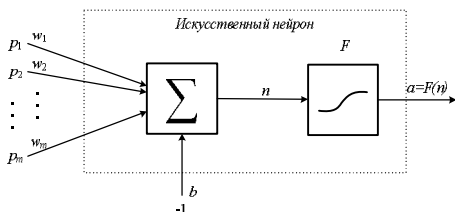


Рис. 1.4 – Искусственный нейрон

множество входных сигналов  $p_1, p_2, \dots, p_m$ . Каждый сигнал умножается на соответствующий вес  $w_1, w_2, \dots, w_m$ , и поступает на суммирующий блок  $\Sigma$ . Множество весов обозначается вектором  $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ . Суммирующий блок имеет дополни-

тельный фиктивный вес  $b$ , называемый смещением нейрона или порогом, на который подается постоянный сигнал «-1». Этот блок складывает взвешенные входы, определяя выход  $n = \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{W} - b$ , где « $\cdot$ » – операция

скалярного произведения векторов, т.е.  $n = \sum_{i=1}^m p_i w_i - b$ . Сигнал  $n$  после

линейной части модели, как правило, преобразуется активационной функцией  $F$  и формирует выходной нейронный сигнал  $a$ . Как показала практика, отдельный нейрон способен решать лишь простейшие задачи, я для достижения значимых результатов, требуется объединять их в слои, а слои – в сети.

Важнейшая особенность естественных, искусственных нейронов и их сетей – способность к самомодификации и обучению. В результате обучения в нейросети возникает определенная структура связей, благодаря чему нейросеть в целом может распознавать сложные образы, аппроксимировать функции и т.д., что не способны проявлять нейроны этой сети порознь. Так моделируется синергетический эффект, о котором писал Г. Хакен. Результаты анализа [86] показали, что в нейронных сетях моделируются все общие свойства (разд. 1.2), характерные для самоорганизующихся систем.

Еще одна технология синергетического ИИ – клеточные автоматы, идея которых была сформулирована независимо К. Цусе и Дж. фон Нейманом в конце 40-х годов [90, 91]. Авторы рассматривали их как универсальную вычислительную среду построения алгоритмов, эквивалентную по своим возможностям машине Тьюринга [92]. Клеточные автоматы – дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется в терминах локальных зависимостей. Так же фиксируется класс реальных непрерывных динамических систем, определенных уравнениями в частных производных и в этом смысле клеточные автоматы – аналог физического понятия «поле».

В технологии клеточных автоматов пространство представляется равномерной сеткой, каждая клетка которой содержит несколько битов данных; законы мира выражаются набором правил, одинаковым для



всех клеток. Выделяют следующие особенности классической модели клеточных автоматов: 1) локальность правил: новое состояние клетки определяется собственным состоянием и состоянием ее соседей; 2) однородность системы: ни одна клетка решетки не может быть отлична от другой по каким-либо особенностям правил; 3) конечность множества состояний клетки; 4) дискретность времени: значения всех клеток меняются одновременно после каждой итерации. При решении некоторых практических задач последние три свойства могут игнорироваться.

Аппаратом клеточных автоматов создаются сложные объекты из простых или даже примитивных материалов. В основе их исследований лежит гипотеза, веками используемая физиками: «мир в основе своей прост – только его очень много» [92].

Параллелизм и локальность, присущие клеточным автоматам – следствие того, что они — стилизованные модели физики [92], благодаря чему дают полезные модели для исследований в естественных, вычислительных науках, комбинаторной математике и способны моделировать эффекты самоорганизации, возникающие в различных физических или химических системах. Пример — структура, формируемая клеточным автоматом [92], моделирующим реакцию Белоусова – Жаботинского (рис. 1.5).

Результаты анализа из [86] показали, что клеточные автоматы обладают некоторыми общими свойствами самоорганизующихся систем. Другие их свойства: множество равновесных состояний и критическое состояние — присутствуют весьма условно. Это объясняется тем, что клеточный автомат – лишь модель для исследования самоорганизующихся систем, в которой можно четко задать начальные условия правила функционирования, что нельзя сделать в реальных самоорганизующихся системах.

Еще одна технология синергетического ИИ – интеллектуальные гибридные системы. Термин «интеллектуальные гибридные системы» появился в 1992 г. [12]. Авторы вкладывали в него смысл гибридов таких интеллектуальных методов, как экспертные системы, нейронные сети и генетические алгоритмы. Под ГиИС (рис 1.6) понимается система, в которой для решения задачи используются более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека [1, 4, 5, 10, 11, 13, 93, 94], каждый элемент которой реализует

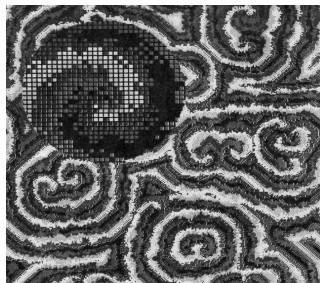


Рис. 1.5 – Клеточный автомат, моделирующий реакцию Белоусова – Жаботинского (фрагмент дан с увеличением)



Обозначения: + – преимущества метода;  
 -- – недостатки метода

Рис. 1.6 – К понятию гибридных интеллектуальных систем

определенную технологию ИИ, способен выполнять множество функций и обрабатывать некоторый класс переменных. Для решения сложных, неоднородных задач одной технологии ИИ недостаточно, и требуется разнообразие элементов, реализующих различные технологии ИИ. Такую задачу нельзя разбить на множество изолированных простых подзадач, нужно учитывать взаимосвязи между ними, моделируя их в ГиИС.

Сложное поведение ГиИС обусловлено взаимодействием элементов, т.е. моделируется эмерджентность.

Для каждой задачи ГиИС синтезирует метод ее решения на основе анализа свойств задачи и доступных методов-прототипов. В результате ГиИС выбирает один из множества вариантов своей структуры, которые можно рассматривать как равновесные состояния ГиИС. Результаты анализа [86] показали, что в ГиИС моделируются все общие свойства (разд. 1.2), характерные для самоорганизующихся систем.

Последняя из рассматриваемых технологий синергетического ИИ – многоагентные системы, научные работы в области которых ведутся уже более трех десятилетий [9, 95 – 97]. Одна из классификаций методов многоагентных систем [9] приведена на рис. 1.7.

В МАС, построенных на идеях распределенного ИИ, имитируется взаимодействие небольшого числа интеллектуальных агентов. Основная проблема – имитация работы интеллектуальных групп и организаций для решения задач методами рассуждений на логико-лингвистических представлениях, что согласуется с моделированием СППР.

В МАС, построенных на идеях децентрализованного ИИ, моделируется не распределенное решение общей задачи, а деятельность автономного агента в динамическом мире и координация этой деятельности. При этом описываются локальные задачи агентов, решаемые на локальных концептуальных моделях при локальных критериях.

В МАС, построенных на идеях искусственной жизни, моделируется интеллектуальное поведение в контексте выживания, адаптации и самоорганизации в динамичной, вра-



Рис. 1.7 – Классификация многоагентных систем

ждебной среде [9]. Поведение МАС при этом рассматривается как результат локальных взаимодействий большого числа простых и не обязательно интеллектуальных агентов. Здесь исследуются понятия «коллективный интеллект» и «интеллект роя».

Ключевая идея многоагентного подхода, объединяющая все направления – социальный характер интеллекта. Предполагается, что отдельный агент имеет лишь частичное представление о задаче, может решить некоторую ее подзадачу, а для решения сложной задачи нужна организация (самоорганизация) агентов.

Согласно результатам анализа [86], в МАС моделируются все общие свойства (разд. 1.2), характерные для самоорганизующихся систем.

Оценки [86] моделирования свойств самоорганизующихся систем разными технологиями синергетического ИИ представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Оценка моделирования свойств самоорганизующихся систем технологиями синергетического ИИ

Свойство	Технологии синергетического ИИ				
	Генетические алгоритмы	Искусственные нейронные сети	Клеточные автоматы	Гибридные интеллектуальные системы	Многоагентные системы
Эндогенный глобальный порядок	+	+	+	+	+
Эмерджентности	+	+	+	+	+
Простые локальные правила	+	+	+	+	+
Нестабильность	+	+	+	+	+
Множество равновесных состояний	+	+	–	+	+
Критическое состояние	+	+	–	+	+

Обозначения: «+» – свойство моделируется; «–» – свойство не моделируется

Анализ табл. 1.1 показывает, что из рассмотренных технологий синергетического ИИ только клеточные автоматы не способны моделировать некоторые свойства самоорганизующихся систем. Для моделирования СППР и процессов самоорганизации в них наиболее подходят ГиИС и МАС (особи генетического алгоритма и нейроны – не релевантны моделированию знаний эксперта СППР). Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки. Так агенты МАС автономнее, чем элементы ГиИС, что приводит к более интенсивной самоорганизации. При этом в МАС не регламентируются технологии ИИ, с помощью которых реализуются агенты, т.е. МАС изначально не предполагает возможность комбинирования различных методов ИИ.

Таким образом, моделированию СППР и процессов самоорганизации в ней релевантны как ГиИС, так и ГиИС, реализующие методологию МАС с целью интенсификации эффекта самоорганизации. В следующем разделе рассмотрим вопросы проектирования ГиИС с самоорганизаци-

ей, во второй главе – модели коллективного принятия решений в СППР, а в главах 3, 4, 5 – ГиИС и ГиИМАС, моделирующие координацию, согласованность и спор, взаимосвязь которых с самоорганизацией показана в разд. 2.4.

#### **1.4 Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией**

Как было отмечено в разд. 1.1, самоорганизация проявляется через коллективные процессы: координацию, согласованность и спор. Рассмотрим особенности их моделирования с использованием ГиИС.

Первые исследования понятия «координация» представлены в работах Дж. Фаркаша и Л. В. Кантаровича [98], Дж. Данцига и П. Вулфа [99], а также Р. Беллмана [100], М. Месаровича и И. Такахары [101], Р. Акоффа, Ф. Эмери [102], Р.А. Алиева, М.И. Либерзона [103], Ф.И. Перегудова, Ф.Л. Тарасенко [104]. Разработке и исследованию методов координации в двухуровневой системе моделей посвящены работы Г.С. Поспелова, В.И. Ирикова, В.С. Михалевича, В.Л. Волковича, А.А. Макарова, В.Н. Буркова, Н.Н. Моисеева, Ю.Б. Гермейера и В.А. Горелика. В настоящее время имитация координации актуальна, и активно исследуется [105 – 107]. Первые попытки координировать работу нескольких экспертных систем были предприняты при создании систем HEARSAY 2 и HEARSAY 3, что стало наглядной демонстрацией сложности указанной задачи. «Если бы мы знали, как осуществить с помощью программы координацию экспертных знаний, то могли бы попытаться запрограммировать такую экспертную систему, в которой воплощены знания многих экспертов» [108, с. 63].

СППР — организация, в которой участники и выполняемые ими задачи находятся в постоянной взаимозависимости и взаимосвязи. Для обеспечения синхронизации деятельности и взаимодействия участников СППР используется координация — процесс распределения деятельности во времени и обеспечения взаимодействия участников СППР в интересах выполнения стоящих перед ней задач. Координация обеспечивает целостность и устойчивость СППР, чем выше степень разнородности специальностей участников СППР и теснее их взаимозависимость, тем больше необходимость в координации. Если СППР состоит из двух экспертов одной специальности, то координация практически не требуется, а необходимость координирующего элемента (лица, принимающего решения, диспетчера) актуальна при решении сложных, неоднородных задач. Таким образом, четко прослеживается причинно-следственная связь: чем сложнее задача, чем она релевантнее реальному миру, тем острее необходимость введения механизма взаимосвязи между отдельными подзадачами, в частности, координации.

Результаты исследования этого процесса в работах [109 – 115] привели авторов к созданию особого вида автоматизированных систем — ФГиИС с координацией для моделирования решения сложных задач коллективом экспертов. Особенность таких систем — выделение элемента (подсистемы) ФГиИС, моделирующего действия ЛПП по координированию решения подзадач экспертами. Результаты моделирования координации при решении сложной задачи оперативно-производственного планирования, позволили сделать вывод о релевантности ФГиИС с координацией моделируемым СППР. Детальное описание данного вида ФГиИС представлено в разд. 3.

Исследования психологии малых групп [116 – 119] свидетельствуют о том, что важное значение для возникновения эффекта самоорганизации в СППР имеет степень согласованности целей и мнений ее участников относительно поставленной задачи. Разногласия в СППР — движущая сила изменений, обеспечивающая повышение эффективности работы, как отдельных экспертов, так и СППР в целом. Включение в состав СППР участников разных специальностей с различным опытом работы, т.е. увеличение разнообразия приводит к интенсивному процессу самоорганизации. Возникновение существенных противоречий и конфликтов между участниками ведет к образованию новых структур в СППР. Понятие «существенное противоречие», определяется системой ценностей участников СППР. Если разногласия членов СППР приобретают деструктивный характер, то выработка согласованного, коллективного решения затрудняется, т.е. ЛПП ответственно за подбор участников СППР и организацию их работы для обеспечения требуемого уровня согласованности мнений и целей экспертов.

Результаты исследования этого процесса в работах [120 – 128] привели авторов к созданию особого вида гибридных интеллектуальных систем – ГиИМАС, сочетающих возможности отображения неоднородности сложных задач и потенциал моделирования коллективных процессов. Особенность таких ГиИМАС – выделение агента, принимающего решения, моделирующего действия ЛПП по подбору структуры СППР релевантной ситуации коллективного решения сложной задачи. Результаты моделирования данного процесса, позволили сформулировать методику подбора структуры СППР соответственно особенностям поставленной задачи. Детальное описание этого вида ГиИС представлено в разд. 4.

Вне зависимости от того насколько хорошо ЛПП координирует и согласует деятельность экспертов в процессе коллективного принятия решений между ними неизбежно возникают разногласия, проявляющиеся в дискуссиях, диспутах, дебатах и других видах спора. Спор — столкновение мнений или позиций, в ходе которого стороны приводят

аргументы в поддержку своих убеждений и критикуют несовместимые с последними представления другой стороны. Спор характеризуется разнообразием представлений об одном и том же объекте, процессе или явлении.

Для того чтобы эффективно решать сложные задачи, ЛПР должно задать регламент работы экспертов и отношения между всеми элементами СППР. В СППР эксперты и ЛПР взаимодействуют друг с другом, ЛПР координирует работу экспертов, эксперты предоставляют ЛПР информацию относительно решаемой задачи и обмениваются между собой информацией. Иногда такой обмен происходит в форме споров. Естественно, в конечном итоге, решение примет ЛПР, но эксперты должны подготовить это решение, высказать свои мнения по обсуждаемому вопросу. ЛПР отводится роль активного наблюдателя, следящего за ходом обсуждения, он задает порядок или очередность выступления сторон, контролирует спор в «рамках» решаемой задачи.

В результате исследования спора в работе [6] для его компьютерного моделирования предложена ГиИС со спором, содержащая различные механизмы и стратегии разрешения споров моделей-элементов ГиИС. В данной ГиИС также как и в двух предшествующих выделяется особый элемент моделирующий поведение ЛПР по разрешению споров моделей, когда они не могут выработать компромиссное решение самостоятельно. Результаты моделирования процесса спора в ГиИС, продемонстрировали актуальность моделирования процесса спора при решении сложных задач. Детальное описание ГиИС со спором представлено в разд. 5.

## 2 СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ: КОЛЛЕКТИВНЫЕ РАССУЖДЕНИЯ В СЛОЖНЫХ СИТУАЦИЯХ

Принятие решений коллективом экспертов в СППР отличается от индивидуальных решений [5]. Оно демократичнее и учитывает интересы заинтересованных лиц. При коллективном принятии решений поставленная задача может быть всесторонне проанализирована приглашенными экспертами в различных областях знаний, что позволяет коллективу решать задачи, с которыми один человек не справляется. Порядок взаимодействия между экспертами не закреплён, взаимосвязи участников формируются при каждом решении задачи, т.е. каждый раз заново вырабатывается метод решения, релевантный условиям конкретной задачи. Можно сказать, что при коллективном обсуждении задачи возникает эффект самоорганизации, улучшающий качество принимаемых решений [129]. Коллективная работа имеет и недостатки [130, 131], например, «группсинк» – феномен интегрального лидерства, гипертрофированное доверие к лидеру и др.

### 2.1 Особенности коллективного принятия решений

В последние десятилетия принятие управленческих решений усложняется, что происходит, во многом, из-за расширения масштабов, количества элементов и взаимосвязей подсистем в организационных структурах. В.М. Глушков, говоря о понятии «сложной задачи», связывал с каждой экономической системой  $S_x$  величину  $\Phi(S_x)$  суммарной сложности управления этой системой [132].

Сложность управления В.М. Глушков определял количеством элементарных операций для выработки правильных решений по управлению системой  $S_x$  за фиксированный промежуток времени  $t$ . По мере развития системы  $S_x$  увеличивается и сложность индивидуальных решений в отношении с обстановкой, усложняются процессы общения между людьми. В результате сложность  $P(S_x)$  управления замкнутой системой  $S_x$  растёт быстрее, чем число людей  $N(S_x)$  в ней.

Данное утверждение иллюстрирует рис. 2.1. По оси абсцисс – число людей, составляющих замкнутую экономическую систему, по оси ординат – сложность задач управления этой системой. Кривая А показывает рост суммарной сложности задач управления замкнутой экономической системой по мере ее развития. Горизонтальная прямая В определяет максимальное количество управленческих задач  $p$ , которые человек

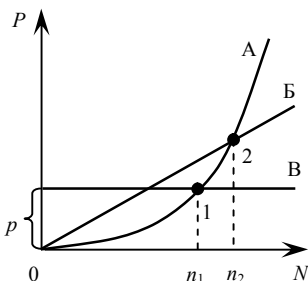


Рис. 2.1 – Первый и второй информационные барьеры

способен решить в единицу времени, а прямая Б ( $P = pN$ ) – максимальное количество управленческих задач, которое способны решить все члены замкнутой экономической системы  $S_x$  без средств автоматизации. До прохождения 1-го информационного барьера система  $S_x$  управляется одним человеком. Между 1-м и 2-м информационными барьерами один человек не может справиться с управлением системой и процесс управления системой  $S_x$  дол-

жен выполняться СППР, т.е. коллективом экспертов в различных областях знаний под управлением ЛПР. После перехода через 2-й информационный барьер любой неавтоматизированный механизм управления неэффективен. В этом случае необходимо создание КСППР. Таким образом, СППР и КСППР – инструменты управления системами и решения задач высокой сложности.

Принятие решений в СППР, например, на военных советах, коллегиях министерств, совещаниях, «планерках» в информационных центрах, отличается от принятия индивидуальных решений [5]. Индивидуальное и коллективное принятие решений имеют свои недостатки, с которыми необходимо считаться. Очевидно, что в условиях цейтнота нет времени всесторонне рассматривать решаемую задачу, принимать решение нужно быстро. В данном случае предпочтительнее индивидуальное принятие решений. Если же время принятия решений не критично, а проблема сложна, требует детального изучения с различных точек зрения, с позиций различных наблюдателей на различных уровнях абстрагирования, то целесообразно использовать СППР. Каждый участник СППР обладает присущей ему моделью внешнего мира, которая формируется на протяжении всей его жизни [133] и на которую влияет темперамент, воспитание, образование, опыт работы, физиологические особенности, а также многие другие факторы. Участник СППР воспринимает решаемую задачу со своей точки зрения, своей модели внешнего мира, но в сложных задачах он не способен охватить всю задачу целиком в силу ограниченности индивидуальной модели, поэтому видит лишь часть целого, определенный ее аспект, формируя в своем сознании характерную только для него модель части сложной задачи.

Очевидно, что в СППР должны присутствовать эксперты в различных областях знаний, чтобы модель и метод, формируемые в СППР в целом на основе моделей отдельных экспертов, были релевантны решаемой сложной задаче. Кроме того, для нормального взаимодействия



участников СППР их индивидуальные модели задачи должны иметь пересекающиеся области. В противном случае, экспертам будет сложно понять друг друга, как мудрецам из восточной притчи о слепцах и слоне.

Другой важный фактор успешного функционирования СППР – организация эффективного взаимодействия ее участников. В [130] отмечается, что каждый эксперт преследует собственные цели, которые могут совпадать или противоречить целям других участников. Концептуальная модель СППР [1] представлена на рис. 2.2. Стрелки, связывающие экспертов, показывают их многогранное взаимодействие.

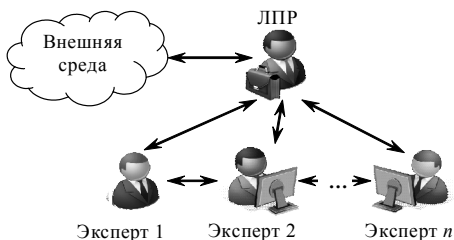


Рис. 2.2 – Концептуальная модель принятия решений в СППР

Некоторые эксперты подчиняются одному или нескольким другим экспертам по службе, то есть между ними могут существовать отношения подчиненности, образующие организационную структуру СППР. Взаимодействуя в ходе обсуждения, эксперты обмениваются данными, знаниями, объяснениями и частичными решениями общей задачи. Возможны группы экспертов, не связанных подчиненностью. Среди них могут быть явные или неявные лидеры, что еще больше «обостряет» гетерогенность коллективного принятия решений. При этом СППР, как и любой малой группе [134], свойственны коллективные эффекты, направляемые процессами координации, согласованности, спора, кооперации, компромисса, содействия, конкуренции и др.

Коллективные эффекты – механизмы функционирования коллектива людей, за счет которых осуществляются коллективные процессы и достигаются коллективные состояния; средства, интегрирующие индивидуальные действия в совместной работе и общении [134]. В результате анализа литературы по социальной психологии [134 – 137] и синергетическому искусственному интеллекту [6, 9] было выявлено 12 основных коллективных эффектов: социальная фасилитация (ингибация), адаптация, Рингельмана, самоорганизация, синергия, группинк и конформизм, мода (подражание), гомеостаз, групповой эгоизм, волна, самообучение и бумеранг. Рассмотрим каждый из них.

**Эффект социальной фасилитации (ингибации).** Действуя совместно, несколько человек могут достичь результатов, которых даже ценой невероятных усилий никогда бы не смог достичь человек в одиночку [138]. При совместной деятельности некоторые проблемы решаются лучше, чем индивидуально. В СППР индивид меньше ошибается и

демонстрирует более высокую скорость решения задач. Это объясняется тем, что присутствие других людей работающих рядом над той же самой задачей активизирует индивида, положительно влияет на его продуктивность, что в психологии определено как социальная фасилитация. Проявляется она не всегда. Например, участие других экспертов снижает эффективность деятельности человека при заучивании бессмысленных слогов, при прохождении лабиринта и при решении сложных примеров на умножение [139]. Повышенное социальное возбуждение способствует доминирующей реакции. Однако если неизвестен алгоритм решения и правильного ответа человек не знает, социальное возбуждение, т.е. бессознательная реакция на присутствие других, затрудняет умственные операции: анализ, синтез, установление причинно-следственных связей — и приводит к неправильному решению. Внимание человека переключается с задачи на окружающих людей. В этом случае следует говорить о социальной ингибации. При решении же простых задач реакция врожденная или хорошо усвоенная, присутствие других — сильнейший стимулятор поиска правильного решения. Выделены [139] определяющие факторы таких реакций: 1) количество окружающих людей; 2) взаимоотношения симпатии или антипатии в СППР; 3) значимость участников для человека; 4) степень пространственной близости между людьми.

**Адаптация.** Согласно [140] различаются два вида адаптации: пассивная и активная. В первом случае адаптирующаяся система приспосабливается к внешней среде, то есть сама изменяется так, чтобы выполнять свои функции в данной среде наилучшим образом. Под активной адаптацией, наоборот, подразумевается либо изменение среды с целью максимизации критерия эффективности, либо активный поиск такой среды, в которой он максимизируется. При этом именно гибкие организационные структуры с процессами самоорганизации эффективно реагируют на изменения во внешней среде и осуществляют внутренние трансформации. По мнению профессора Ф.П. Хэйлихена [141], любая самоорганизующаяся система адаптируется к окружающей среде, а наличие процессов самоорганизации в системе неминуемо приводит к адаптации. Особенно отчетливо это проявляется, если изменить границы рассматриваемой самоорганизующейся системы. Ф.П. Хэйлихен цитирует пример приведенный У.Р. Эшби: если представить часть самоорганизующейся системы как самостоятельную систему, а ее остаток — как окружающую среду этой части, то часть обязательно будет адаптироваться к своей окружающей среде, т.е. остатку самоорганизующейся системы.

**Эффект Рингельмана.** Сравнивая результаты индивидуальной и групповой деятельности в экспериментах по подниманию груза через блок, М. Рингельман установил, что группа из трех человек была в состоянии совместными усилиями достигнуть такой же мощности, которую при индивидуальной работе достигали 2,5 человека (рис. 2.3), а группа из 8 человек коллективно производила работу, выполняемую индивидуально всего 4 испытуемыми [138]. В результате была выявлена практически линейная зависимость убывания усредненного индивидуального усилия в группах от двух до восьми человек. Такой эффект «социальной лени» объясняется потерями координации, мотивации или двумя факторами вместе. Выделяются следующие основные факторы социальной лени [139]: 1) отсутствие индивидуальной ответственности за результаты своего труда; 2) групповая разобщенность и отсутствие дружеских отношений; 3) высокая численность группы; 4) индивидуалистическая культура общества; 5) гендерные различия: женщины в меньшей степени проявляют социальную лень, по сравнению с мужчинами.

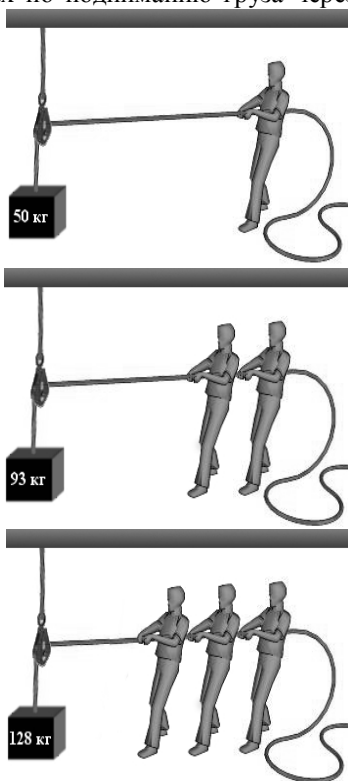


Рис. 2.3 – Схематичная иллюстрация эффекта Рингельмана

**Эффект самоорганизации.** Самоорганизацию в СППР рассматривают как специфический процесс, когда коллектив СППР без видимых внешних причин развивается – изменяет уровень своей организованности, создает новые взаимосвязи между участниками и организационные структуры [142].

Если считать коллективную разработку программного обеспечения процессом принятия решений, можно привести пример эффективного управленческого решения, принятого ЛПР, включившего процесс самоорганизации, и возникновения синергетического эффекта при разработке компанией Microsoft операционной системы Windows NT [143]. Проект стоимостью 150 млн. долл. выполняли 250 программистов в течение 3,5 лет вместо запланированных 1,5, работа шла на грани срыва. Встал вопрос: «Как достичь системной согласованности и не погубить творче-

скую атмосферу?», и шеф проекта Дэвид Катлер вдруг приказывает участникам, чтобы каждый «ел только собственную собачью пищу». Это означало использование разработчиками в качестве операционной системы незаконченных и несовершенных ранее составленных версий. Такое управляющее воздействие смогло создать команду с общей системой ценностей из сборища интеллектуалов, недолюбливающих друг друга. Во-первых, они были изумлены сыростью «собачьей пищи» и количеством собственных ошибок, срывающих все планы на неделю. Во-вторых, заработала положительная обратная связь. Каждая удачная находка облегчала написание кода и приводила к новым успехам, повышавшим вероятность последующих, а каждый «прокол» тормозил дело, пока не становился нетерпимым и с неизбежностью устранился.

Э. Бруннер и В. Чахер выделяют следующие особенности коллектива СППР как самоорганизующейся системы: 1) коллектив СППР – открытая система; 2) поведение СППР нелинейно и определяется параметрами порядка, т.е. существуют фазовые переходы и точки бифуркации; 3) причинные связи в динамике СППР характеризуются кольцом обратной связи, т.е. каждый процесс формируется одновременно положительными и отрицательными обратными связями; 4) поведение СППР возникает из сложного микроуровня: когниции, эмоции и коммуникации [144, 145]. К настоящему времени, создано несколько теорий самоорганизации малой группы: теория поведения систем [146], теория сложных систем [147], теория систем сложного поведения (интеграция первых двух теорий) [148] и теория структурированности [149].

Эффект самоорганизации в СППР проявляется: 1) в динамической выработке релевантных методов решения сложных задач организацией взаимосвязей между экспертами различного профиля заново для каждой задачи; 2) в формировании морально-психологического климата; 3) в наставничестве, поддержке молодых специалистов, взаимном обучении участников; 4) в саморегулировании, разрешении конфликтов; 5) в формировании коллективного решения, превосходящего по эффективности решения, которые могли бы получить участники СППР, работая индивидуально [142].

**Эффект синергии.** Под синергией в СППР понимается прибавочная интеллектуальная энергия за счет возникновения взаимосвязей между людьми при объединении их в целостную группу, выражаемая в групповом результате, который превышает сумму индивидуальных результатов [139]. Это проявляется не только в интеллектуальной сфере, но и в повышении наблюдательности людей в СППР, точности их восприятия и оценок, объеме памяти и внимания. Наиболее ярок этот эффект при «мозговом штурме», когда требуется предложить много новых идей без их критического анализа и логического осмысления.

**Эффект группинка и конформизма.** Открытие феномена и введение термина «группинк» или «группомыслие», принадлежит американскому психологу И. Джанису [139]. Это способ мышления, возникающий, когда поиск согласия сплоченной группы становится настолько доминирующим, что начинает пересиливать реалистичную оценку возможных альтернатив. В этом случае, критерием истинности служит сплоченное мнение группы, а не объективное качество решения. Эффект группинка бывает настолько сильным, что искажает даже сенсорную информацию человека.

Симптомы группинка [138]: 1) иллюзия неуязвимости: излишний оптимизм, не позволяющий увидеть признаки опасности; 2) никем неоспариваемая вера в этичность СППР; 3) рационализация, коллективное оправдание решений СППР; 4) самоцензура членов СППР; 5) иллюзия единодушия; 6) наличие «умохранителей» – членов СППР, защищающих ее от информации, ставящей под сомнение эффективность группового решения.

Тесно связан с группинком и популярный в социальной психологии эффект конформизма [139], когда отдельные эксперты меняют свое мнение под влиянием группового давления. Выделяют несколько условий возникновения конформизма: 1) заниженная самооценка члена СППР; 2) численность группы от трех человек и выше; 3) авторитет экспертов; 4) высокая сплоченность коллектива; 5) отсутствие союзников; 6) необходимость публичного оглашения своего мнения; 7) сложность задачи и некомпетентность эксперта.

Обобщая практический опыт, И. Джанис сформулировал рекомендации для предотвращения группомыслия и конформизма эксперта [138]: 1) быть беспристрастным, т.е. не становиться безоговорочно ни на одну из заявленных позиций; 2) поощрять критическую оценку ситуации; 3) делить группы на подгруппы, с последующим обсуждением разногласий; 4) приветствовать критику со стороны независимых экспертов и коллег; 5) проводить перед выполнением принятых решений «собрание последнего шанса» для обсуждения возможных остаточных сомнений.

**Эффект моды (подражание)** – один из основных механизмов интеграции коллектива [139]. В процессе взаимодействия члены СППР вырабатывают общие эталоны, стереотипы поведения, следование которым подчеркивает и укрепляет взаимосвязи между экспертами СППР. Люди более склонны следовать примеру похожего на них человека, чем непохожего. Эффект подражания лежит в основе обучения и способствует адаптации людей друг к другу, согласованности их действий и готовности к решению общей задачи. Данный эффект близок к эффекту конформизма, однако если при конформизме коллектив СППР оказыва-

ет давление на своего члена, то при подражании следование групповым требованиям добровольно.

**Эффект гомеостаза.** С.Г. Хорошавина [150] выделяет гомеостаз как атрибут самоорганизующейся системы. Термин гомеостаз или гомеостазис (от греч. *homoios* – подобный и *stasis* – неподвижность) введен в науку американским физиологом У.Б. Кэнноном и применим в физиологии, кибернетике, психологии и социологии [151, 152]. Гомеостаз обеспечивает поддержание важнейших для системы параметров в необходимых пределах. Отклонения параметров системы от средних значений, характеризующих наиболее устойчивое ее состояние, не приводят к разрушению системы как целостной структуры, что обусловлено существованием в рамках процессов самоорганизации механизма саморегулирования, или самосохранения, основанного на универсальном принципе обратной связи.

**Эффект группового эгоизма** – направленность интересов, целей и норм поведения группы против интересов, целей и норм поведения отдельных ее членов или общества в целом [139]. Групповой эгоизм проявляется, если цели, ценности принятые в СППР и стабильность ее существования важнее отдельной личности, значимее целей общества. В этом случае личность приносится в жертву целостности группы, подчиняется ее требованиям и стандартам поведения. Данный эффект может сыграть негативную роль в дальнейшей жизнедеятельности СППР и судьбе ее отдельных членов.

**Эффект волны** описывает распространение идей, целей, норм и ценностей в СППР [139]. Новая идея появляется у человека, который делится ею со своим ближайшим окружением, обсуждающим, корректирующим, дополняющим и развивающим предложенную идею. Идея распространяется среди других членов СППР, осуществляется ее групповая сценка и обсуждение, что напоминает волны на воде от брошенного камешка. Волновой эффект возможен тогда, когда возникшая идея отвечает потребностям и интересам участников СППР, а не противоречит им. В первом случае она понимается и развивается, а во втором волновой эффект затухает.

**Эффект самообучения.** Самообучение в СППР [153] – работа ее участника по повышению своего уровня образования с опорой на опыт и знания других членов СППР. Во время обсуждения проблемы возникают горизонтальные связи с передачей информации, знаний и опыта между участниками. Самообучение присуще и ЛПР. При решении новой задачи он учитывает опыт предыдущей работы СППР и распределяет подзадачи. Зависимость качества результата и интенсивности самоорганизации от принимаемых ЛПР решений по распределению подзадач между экспертами изменяется после каждого очередного решения

сложной задачи. Знания ЛПР, чаще всего, не вербализованы, подсознательны, их получение и представление в формальном виде – трудоемкая задача. В этой связи актуально извлечение знаний ЛПР методом компьютерного моделирования.

**Эффект бумеранга** заключается в том, что человек, воспринимающий информацию, не признает ее содержание или вывод истинными и продолжает придерживаться ранее существовавшей установки или вырабатывает суждение противоположное той установке, которую пытались ему внушить через средства массовой коммуникации [139]. Эффект «бумеранга» возникает в случае противоречивости информации, недоверия к ее источнику и методам убеждения. В частности, агрессивные действия или слова одного человека, направленные против другого, в итоге оборачиваются против первого. Например, в конфликтной ситуации более вероятно, что члены группы психологически будут на стороне спокойного, уравновешенного человека, чем на стороне его агрессивного противника.

Рассмотренные выше коллективные эффекты сведены в табл. 2.1, проанализировано их влияние на работу СППР.

## 2.2 Концептуальная модель системы поддержки принятия решений

Концептуальная модель – модель предметной области – перечень понятий, свойств и характеристик для описания этой области, а также законов протекания в ней процессов [154, 155]. Концептуальная модель, с одной стороны, ограничивает предметную область как совокупность объектов, связей и отношений между ними, процедур преобразования этих объектов при решении задач, а с другой – вносит в моделирование субъективные представления разработчика в виде его знаний и опыта – концепций.

Концептуальные модели сущностей, например, задач, СППР, будем строить на основе схемы концептуальных моделей [1], содержащей 11 категорий концептов  $C$ , из которых используются следующие пять.

**Определение 2.1.** Ресурс – понятие, обозначающее вещь, имеющуюся у субъекта управления для решения задач. Множество ресурсов обозначим  $RES = C^{res} \subseteq C$ .

**Определение 2.2.** Свойство – все то, что не является границами данной вещи. Это то, что, характеризуя вещи, не образует новых вещей. Множество свойств обозначим  $PR = C^{pr} \subseteq C$ .

**Определение 2.3.** Действие – понятие, обозначающее отношения на ресурсах, как следствие деятельности, поступков и поведения. Множество действий обозначим  $ACT = C^{act} \subseteq C$ .

Таблица 2.1 – Коллективные эффекты в СППР

Эффект	Краткое описание	Позитивное влияние	Негативное влияние
Адаптация	Приспособление к внешней среде или ее изменения для эффективной работы СППР	Расширяет круг задач, решаемых СППР	Затрудняет анализ работы СППР
Бумеранг	При недоверии к информации, возникает мнение обратное, содержащемуся в ней	Недоверенная информация не воспринимается, либо считается заведомо ложной	Достоверная информация от недоверенного источника может быть расценена как ложная
Волна	Распространение идей в СППР, отвечающих интересам ее членов	Коллективная доработка идей	Длительная работа экспертов над бесперспективными идеями
Гомеостаз	Поддержание важнейших для системы параметров вдали от предельных значений	Обеспечивает длительную жизнеспособность СППР	Иногда СППР в пограничных состояниях генерирует более качественные решения, чем в нормальном состоянии
Групповой эгоизм	Цели коллектива важнее целей ее члена и целей общества	Отсутствует	Эффективная деятельность коллектива может вредить обществу
Группинк и конформизм	Общее мнение – истина, мнение отдельного человека – ничто	Отсутствует	Препятствует возникновению новых подходов к решению проблемы
Мода (подражание)	Добровольное принятие установившейся в коллективе точки зрения на проблему	Основа самообучения членов коллектива; способствует адаптации людей друг к другу	Снижает вероятность появления оригинальных взглядов и подходов к решению проблемы
Рингельмана	С ростом численности группы снижается индивидуальный вклад в общую работу	Снижается нагрузка на отдельных участников СППР	Снижается мотивация экспертов к эффективной совместной работе
Самообучение	Работа участников СППР по повышению уровня своих знаний с опорой на опыт	Поддержание знаний участников СППР в актуальном состоянии	Полученные знания могут быть несистематизированными, невербализуемыми, ошибочными
Самоорганизация	Отношения между экспертами динамичны и изменяются в процессе работы	Адаптация к внешней среде; каждый раз вырабатывается новый метод, релевантный задаче. Появление оригинальных подходов к решению задачи и синергии	Затрудняет анализ работы и внешнее управление коллективом
Синергия	Получение общего результата, который не могут получить эксперты индивидуально	Получение эмерджентного качественно лучшего результата	Возможен эффект отрицательной синергии (дисергии)
Социальная фасилитация	Усиление доминантных реакций в присутствии других людей.	Ускоряет решение простых задач, для которых индивид знает ответ	В сложных задачах повышает вероятность ошибочного ответа



**Определение 2.4.** *Значение – понятие или число, показывающее количество единиц меры. Множество значений обозначим  $VAL = C^{val} \subseteq C$ .*

**Определение 2.5.** *Состояние – понятие, обозначающее проявление процессов, происходящих в ресурсе в некоторый момент времени. Множество состояний обозначим  $ST = C^{ST} \subseteq C$ .*

Между концептами этих категорий установлено множество отношений  $R$ .

**Определение 2.6.** *Отношение – то, что образует вещь из данных элементов (свойства или других вещей). Отношение – есть то, что, будучи установлено между вещами, образует новые вещи.*

Факт установления между концептами отношение обозначим  $r^{\alpha\beta}(c_1^\alpha, c_2^\beta)$ . Будем отличать отношения между различными категориями концептов:  $R^{\alpha\beta} \subseteq R$  – множество отношений между концептами из множества  $C^\alpha$  и множества  $C^\beta$ , где  $\alpha, \beta \in \{ "res", "pr", "act", "val" \}$ .

Таким образом, фрагмент схемы концептуальных моделей  $sch_1$ , построенной в неформальной аксиоматической теории [1], для структурирования знаний о предметной области моделируемой задачи может быть представлен в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 sch_1 = & R^{res\ res}(RES, RES) \circ R^{pr\ pr}(PR, PR) \circ R^{act\ act}(ACT, ACT) \circ \\
 & \circ R^{val\ val}(VAL, VAL) \circ R^{st\ st}(ST, ST) \circ R^{res\ pr}(RES, PR) \circ \\
 & \circ R^{pr\ res}(PR, RES) \circ R^{res\ act}(RES, ACT) \circ R^{act\ res}(ACT, RES) \circ \quad (2.1) \\
 & \circ R^{res\ st}(RES, ST) \circ R^{st\ res}(ST, RES) \circ R^{pr\ act}(PR, ACT) \circ \\
 & \circ R^{act\ pr}(ACT, PR) \circ R^{pr\ val}(PR, VAL) \circ R^{val\ pr}(VAL, PR),
 \end{aligned}$$

где знак  $\circ$  – конкатенация. Графически  $sch_1$  представлена на рис. 2.4.

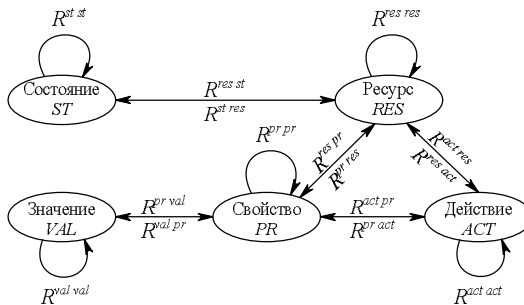


Рис. 2.4 – Схема ролевых концептуальных моделей действительности

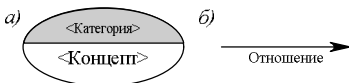


Рис. 2.5 – Условные обозначения на концептуальных моделях:

- а) блок – концепт;
- б) стрелка – отношение

Концепты изображаются в овальном блоке, как показано на рис. 2.5, а; в верхней части блока указывается категория концепта, а в нижней части – наименование; отношения между концептами представляются стрелками – рис. 2.5, б.

Концептуальная модель взаимодействия участников СППР (концептуальная модель СППР на микроуровне) [1] представлена на рис. 2.6 (стрелки  $R^{res\ res}$ , связывающие экспертов, показывают их многогранное взаимодействие).

Концептуальная модель СППР совпадает с понятием «система поддержки принятия решений» [156]. Э.А. Трахтенгерц отмечает, что функции СППР выполнялись военными советами, коллегиями министерств, совещаниями, планерками, аналитическими центрами и т.д., хотя они и не назывались СППР. Микроуровневая концептуальная модель СППР записывается в следующем виде:

$$\widetilde{dss} = R^{res\ res}(prt^{dm}, env) \circ R^{res\ res}(PRT, PRT), \quad (2.2)$$

где  $prt^{dm}$  – модель знаний ЛПП;  $env \in RES$  – внешняя среда;  $PRT = \{prt_1, \dots, prt_n, prt^{dm}\}$ ,  $PRT \subseteq RES$  – множество участников СППР, включающее ЛПП  $prt^{dm}$ ;  $R^{res\ res}$  – множество отношений «ресурс – ресурс» между участниками СППР, а также ЛПП и внешней средой.

В [130] отмечается, что каждый участник  $prt \in PRT$  СППР преследует собственную цель  $pr^{gsu}$ , которая может совпадать или вступать в противоречие с целями других участников. Взаимодействуя в ходе обсуждения (рис. 2.2), эксперты обмениваются данными  $pr^{dat}$ , знаниями  $pr^{knw}$ , объяснениями  $pr^{exp}$  и частичными решениями  $pr^{dec}$  общей зада-

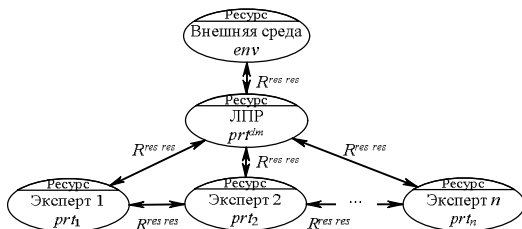


Рис. 2.6 – Концептуальная модель СППР на микроуровне

чи, т.е. выполняют множество действий по передаче  $ACT^{itr}$  и получению  $ACT^{iac}$  информации, множество профессиональных функций  $ACT^{prt}$ , оказывают давление на других участников СППР и

членов окружающей среды, выполняя действия  $ACT^{conf}$ . Каждый эксперт обладает собственной моделью  $res^{mod}$  внешней среды, в том числе и объекта управления, а также собственным набором методов  $RES^{met}$  решения задач. Ввиду неоднородного характера сложных задач (разд. 1.1), для их успешного решения в состав СППР должны входить эксперты различных специальностей, с разными наборами методов решения задач, т.е.  $RES_i^{met} \neq RES_j^{met}$ , где  $i, j = 1, \dots, n$ ,  $i \neq j$  – номер участника во множестве  $PRT$ . Концептуальная модель эксперта СППР записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 prt_i = & r_1^{res\ pr} (prt, pr^{gsu}) \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{dat}) \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{knw}) \circ \\
 & \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{exp}) \circ r_1^{res\ pr} (prt, pr^{dec}) \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{prt}) \circ \\
 & \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{itr}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{dat}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{knw}) \circ \\
 & \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{exp}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{itr}, pr^{dec}) \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{iac}) \circ \\
 & \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{dat}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{knw}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{exp}) \circ \\
 & \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, pr^{dec}) \circ r_2^{res\ act} (prt, ACT^{conf}) \circ r_3^{res\ res} (prt, res^{mod}) \circ \\
 & \circ r_3^{res\ res} (prt, RES^{met}),
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

где  $r_1^{res\ pr}$  – отношение «иметь свойство», устанавливающие соответствие между участником СППР и его свойствами;  $r_2^{res\ act}$  – отношение «выполнять», связывающее субъект и действие, которое он выполняет;  $r_2^{act\ pr}$  – отношение «иметь свойство», связывающее действие с его свойством;  $r_3^{res\ res}$  – отношение «включает», связывающее целое и его части.

Множество отношений  $R^{res\ res}$  в (2.2) состоит из подмножеств отношений различных классов: сотрудничества  $R_{coop}^{res\ res}$ , конкуренции  $R_{comp}^{res\ res}$ , нейтралитета  $R_{neut}^{res\ res}$ , доверия  $R_{trus}^{res\ res}$ , давления и конформизма  $R_{conf}^{res\ res}$ , координации  $R_{coor}^{res\ res}$ , спора  $R_{disp}^{res\ res}$  и другие  $R_{oth}^{res\ res}$ . Подмножество отношений  $R_{oth}^{res\ res}$  введено в модель, чтобы сделать ее полной и расширяемой [1]. Таким образом, множество  $R^{res\ res}$  может быть представлено выражением:

$$\begin{aligned}
 R^{res\ res} = & R_{coop}^{res\ res} \cup R_{comp}^{res\ res} \cup R_{neut}^{res\ res} \cup R_{trus}^{res\ res} \cup R_{conf}^{res\ res} \cup \\
 & \cup R_{coor}^{res\ res} \cup R_{disp}^{res\ res} \cup R_{oth}^{res\ res}.
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Состав отношений из множества  $R^{res\ res}$  и его подмножеств заранее неизвестен и определяется во время работы СППР согласно правилам взаимодействия  $INT \subseteq RES$  в результате ее самоорганизации. Самоорганизация – основа интенсивного развития СППР, ее способность реа-

гировать на изменения во внешней среде, обоснованно и своевременно корректируя свое поведение и основополагающие принципы собственного устройства и функционирования. За счет динамичности связей между экспертами и самоорганизации СППР способна вырабатывать новый метод решения, релевантный сложившимся условиям, и концептуальная модель СППР как самоорганизующейся сущности – метода решения сложной задачи – может быть представлена выражением:

$$\begin{aligned}
 RES_{dss}^{met} = & R^{res\ res}(RES_1^{met}, RES_2^{met}) \circ \dots \circ R^{res\ res}(RES_1^{met}, RES_n^{met}) \circ \\
 & \circ R^{res\ res}(RES_2^{met}, RES_1^{met}) \circ \dots \circ R^{res\ res}(RES_2^{met}, RES_n^{met}) \circ \\
 & \circ R^{res\ res}(RES_n^{met}, RES_1^{met}) \circ \dots \circ R^{res\ res}(RES_n^{met}, RES_{n-1}^{met}),
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

где метод  $RES_{DSS}^{met}$ , вырабатываемый СППР при решении очередной задачи, представляет собой взаимосвязанную совокупность наборов методов  $RES_i^{met}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , используемых экспертами при решении их подзадач. При решении очередной задачи интенсивность и направленность отношений  $R^{res\ res}$  между экспертами СППР и, соответственно, между используемыми ими методами изменяются, приводя к выработке согласно (2.5) нового метода, релевантного сложной задаче, т.е. возникает синергетический эффект. Внешнее проявление этого эффекта – получение СППР решений качественнее в сравнении с мнениями отдельных экспертов.

Учитывая вышесказанное, макроуровневая модель СППР может быть представлена в следующем виде:

$$\widehat{dss} = (PRT, env, INT, \widehat{DSS}, EFF), \tag{2.6}$$

где  $PRT$  – множество участников СППР, описываемых концептуальной моделью (2.3);  $env$  – среда, в которой находится СППР;  $INT$  – множество элементов для структурирования взаимодействий между экспертами;  $\widehat{DSS}$  – множество моделей (2.5) СППР на микроуровне, соответствующих конкретным функциям экспертов в СППР и установившимся отношениям между ними;  $EFF$  – множество концептуальных моделей макроуровневых (коллективных) эффектов в СППР (табл. 2.1): адаптация  $ad$ , бумеранг  $bo$ , волна  $wa$ , гомеостаз  $ho$ , групповой эгоизм  $ge$ , группинк  $gt$ , мода  $fa$ , эффект Рингельмана  $re$ , самообучение  $sl$ , самоорганизация  $so$ , синергия  $se$ , социальная фасилитация  $sf$ . Рассмотрим подробнее модели этих макроуровневых эффектов.

Согласно разд. 2.1 различаются два вида адаптации: пассивная и активная. В первом случае адаптирующаяся система изменяется так, чтобы выполнять свои функции в данной среде наилучшим образом. Концептуальная модель такой адаптации представляется выражением:

$$ad_p = r_3^{res\ res}(dss, PRT) \circ r_2^{res\ act}(PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res}(ACT^{iac}, env) \circ \\ \circ R_1^{res\ res}(\overline{DSS}, \overline{DSS}) \circ r_1^{res\ pr}(\overline{DSS}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val}(PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ \\ \circ r_1^{val\ val}(VAL^{cr}, VAL^{cr\ go}), \quad (2.7)$$

где  $PR^{cr}$  – множество критериев оценки эффективности СППР;  $VAL^{cr}$  – множество значений критических параметров СППР для микроуровневых моделей;  $VAL^{cr\ go}$  – множество целевых значений критических параметров СППР;  $r_1^{pr\ val}$  – отношение «иметь значение»;  $r_1^{val\ val}$  – отношение близости двух значений.

Активная адаптация подразумевает изменение среды с целью максимизации критерия эффективности или активный поиск такой среды. Концептуальная модель активной адаптации в СППР:

$$ad_a = r_3^{res\ res}(dss, PRT) \circ r_2^{res\ act}(PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res}(ACT^{iac}, env) \circ \\ \circ R_1^{res\ res}(ENV, ENV) \circ r_1^{res\ pr}(\overline{DSS}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val}(PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ \\ \circ r_1^{val\ val}(VAL^{cr}, VAL^{cr\ go}) \circ r_2^{res\ act}(dss, ACT^{inf}) \circ r_1^{act\ res}(ACT^{inf}, env), \quad (2.8)$$

где  $ENV \subseteq RES$  – множество внешних сред, подходящих для работы СППР;  $ACT^{inf}$  – множество воздействий СППР на внешнюю среду.

Как показано в разд. 2.1 эффект бумеранга  $bo$  – игнорирование или идентификация как ложной информации из недостоверных источников:

$$bo = r_3^{res\ res}(dss, PRT) \circ r_2^{res\ act}(PRT, ACT_{trus}^{iac}) \circ R_{trus}^{res\ res}(PRT, env) \circ \\ \circ R_{trus}^{res\ res}(PRT, PRT), \quad (2.9)$$

где  $ACT_{trus}^{iac}$  – множество действий по получению информации, учитывающих отношения доверия между участниками СППР, а также участниками и источниками информации из внешней среды.

Согласно табл. 2.1 эффект волны  $wa$  – механизм распространения идей и целей в СППР, отвечающих интересам ее членов, когда они передаются участникам СППР прежде всего из «ближнего круга» эксперта-источника, т.е. участникам с которыми у эксперта-источника установлено отношение доверия. В дальнейшем эти участники могут переработать идею и передать ее участникам СППР из своего «ближнего круга». Формализовано эффект волны записывается в следующем виде:

$$wa = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT_{trus}^{itr}) \circ R_{trus}^{res} (PRT, PRT), \quad (2.10)$$

где  $ACT_{trus}^{itr}$  – множество действий по передаче информации, учитывающих отношения доверия между участниками СППР.

Концептуальная модель гомеостаза  $ho$  в СППР записывается в следующем виде:

$$ho = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ R_1^{res\ res} (\overline{DSS}, \overline{DSS}) \circ r_1^{res\ pr} (\overline{DSS}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ all}), \quad (2.11)$$

где  $VAL^{cr\ all}$  – множество допустимых значений критических параметров СППР.

Эффект группового эгоизма  $ge$  заключается в пренебрежении СППР целями общества и отдельного члена СППР:

$$ge = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{conf}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{conf}, PRT) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{conf}, env) \circ R_{conf}^{res\ res} (PRT, PRT), \quad (2.12)$$

где  $r_1^{act\ res}$  – отношение «иметь объектом», связывающее действие и объект, на который оно направлено.

Эффект группинка  $gt$  – подавление мнений участников СППР, отличающихся от мнения большинства членов СППР:

$$gt = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{conf}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{conf}, PRT) \circ R_{conf}^{res\ res} (PRT, PRT). \quad (2.13)$$

Как показано в разд. 2.1, эффект моды  $fa$  состоит в добровольном принятии установившейся в коллективе точки зрения на проблему:

$$fa = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{iac}, PR^{dec}). \quad (2.14)$$

Согласно табл. 2.1, эффект Рингельмана  $re$  – снижение интенсивности индивидуальной работы с ростом численности группы:

$$re = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{prt}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{efi}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{efc}) \circ r_1^{pr\ pr} (PR^{efi}, PR^{efc}), \quad (2.15)$$

где  $PR^{efi}$  – эффективность выполнения действия при индивидуальной работе определяется для каждой СППР и задачи индивидуально; в общем виде, под эффективностью будем понимать показатель, учитывающий оценку скорости принятия и качества предлагаемых решений;  $PR^{efc}$  – эффективность выполнения действия при работе в коллективе;  $r_1^{pr\ pr}$  – отношение «быть больше».

Концептуальная модель самообучения ЛПП  $sl_{dm}$  представляется выражением:

$$\begin{aligned}
 sl_{dm} = & r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ \\
 & \circ R_1^{res\ res} (\overline{DSS}, \overline{DSS}) \circ r_1^{res\ pr} (\widetilde{dss}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ pl}) \circ \\
 & \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_3^{res\ res} (pr^{dm}, res^{fdb}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr\ pl}, VAL^{cr\ fct}) \circ \\
 & \circ r_2^{res\ act} (res^{fdb}, ACT^{lrm}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{lrm}, res^{rul}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ienv}) \circ \\
 & \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{idss}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{fct}),
 \end{aligned} \quad (2.16)$$

где  $VAL^{cr\ pl}$  – множество планируемых значений критериев эффективности СППР при выбранной микроуровневой модели  $\widetilde{dss}$ ;  $VAL^{cr\ fct}$  – множество фактических значений критериев эффективности СППР при выбранной микроуровневой модели  $\widetilde{dss}$ ;  $res^{fdb}$  – нечеткая база знаний ЛПП по выбору микроуровневых моделей СППР из множества  $\overline{DSS}$ ;  $ACT^{lrm}$  – обучение, корректировка правил нечеткой базы знаний ЛПП  $res^{fdb}$ ;  $res^{rul}$  – правило нечеткой базы знаний ЛПП по выбору микроуровневых моделей СППР из множества  $\overline{DSS}$ ;  $res^{ienv}$  – информация о внешней среде;  $res^{idss}$  – информация о микроуровневой модели  $\widetilde{dss}$ ;  $res^{fct}$  – информация о фактических значениях критериев эффективности СППР с выбранной моделью  $\widetilde{dss}$ .

Самоорганизация СППР  $so$ , как показано в разд. 2.1, – специфический эффект, когда коллектив СППР без видимых причин создает или изменяет взаимосвязи между участниками и организационные структуры:

$$\begin{aligned}
 so = & r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ \\
 & \circ R_1^{res\ res} (\overline{DSS}, \overline{DSS}),
 \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $r_1^{act\ res}$  – отношение «иметь объектом» действия и его ресурсов;  $R_1^{res\ res}$  – множество отношений следования предшествующей микроуровневой модели с последующей в ходе их смены.

Эффект синергии  $se$  – следствие взаимосвязей между участниками СППР при совместной работе над задачей, т.е. генерации организаци-

онной структуры, релевантной решаемой задаче. Данный эффект в СППР выражается в получении коллективного решения более высокого качества, чем любое из индивидуальных:

$$se = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{iac}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{iac}, env) \circ r_1^{res\ res} (\overline{DSS}, \overline{DSS}) \circ r_4^{res\ res} (PRT, RES^{dec}) \circ r_1^{res\ pr} (RES^{dec}, PR^{qua}) \circ r_4^{res\ res} (dss, res_{dss}^{dec}) \circ r_1^{res\ pr} (dss, pr_{dss}^{qua}) \circ r_1^{pr\ pr} (pr_{dss}^{qua}, PR^{qua}), \quad (2.18)$$

где  $RES^{dec}$  – множество решений задачи, поставленной перед СППР, предложенных экспертами в результате индивидуальной работы;  $PR^{qua}$  – множество показателей качества индивидуальных решений экспертов;  $res_{dss}^{dec}$  – решение, выработанное СППР, в результате совместной работы экспертов;  $pr_{dss}^{qua}$  – качество решения, выработанного СППР;  $r_4^{res\ res}$  – отношение, связывающее эксперта или СППР с выработанным решением.

Как показано в табл. 2.1, социальная фасилитация  $sf$  предполагает усиление доминантных реакций в присутствии других экспертов, т.е. способствует ускорению выработки решений:

$$sf = r_3^{res\ res} (dss, PRT) \circ r_2^{res\ act} (PRT, ACT^{prt}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{spi}) \circ r_2^{act\ pr} (ACT^{prt}, PR^{spc}) \circ r_1^{pr\ pr} (PR^{spc}, PR^{spi}), \quad (2.19)$$

где  $PR^{spi}$  – скорость выполнения действия при индивидуальной работе,  $PR^{spc}$  – скорость выполнения действия при работе в коллективе.

Анализ выражений (2.7) – (2.19) показал, что некоторые макроуровневые эффекты взаимосвязаны. Например, выражения (2.7), (2.11), (2.16) и (2.18) могут быть преобразованы с использованием выражения (2.17) следующим образом:

$$ad_p = so \circ r_1^{res\ pr} (\overline{DSS}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ go}), \quad (2.20)$$

$$ho = so \circ r_1^{res\ pr} (\overline{DSS}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr}, VAL^{cr\ all}), \quad (2.21)$$

$$sl_{dm} = so \circ r_1^{res\ pr} (\overline{dss}, PR^{cr}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ pl}) \circ r_1^{pr\ val} (PR^{cr}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_3^{res\ res} (prt^{dm}, res^{fdb}) \circ r_1^{val\ val} (VAL^{cr\ pl}, VAL^{cr\ fct}) \circ r_2^{res\ act} (res^{fdb}, ACT^{lrn}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{lrn}, res^{rul}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ienv}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{idss}) \circ r_3^{res\ res} (res^{rul}, res^{ifct}), \quad (2.22)$$

$$se = so \circ r_4^{res\ res} (PRT, RES^{dec}) \circ r_1^{res\ pr} (RES^{dec}, PR^{qua}) \circ r_4^{res\ res} (dss, res_{dss}^{dec}) \circ r_1^{res\ pr} (dss, pr_{dss}^{qua}) \circ r_1^{pr\ pr} (pr_{dss}^{qua}, PR^{qua}). \quad (2.23)$$

Выражения (2.20) – (2.23) показывают, что особую и основополагающую роль среди коллективных эффектов в СППР играет самоорга-



низация – предпосылка возникновения других эффектов, положительно влияющих на результат работы СППР, таких как, адаптация, гомеостаз, самообучение и синергия [128].

### **2.3 Самоорганизация в системах поддержки принятия решений**

Процесс принятия решения в СППР – поиск компромисса, управляемый ЛПР. Цель поиска – «резонансное состояние», синергетический эффект хода обсуждения в СППР, когда коллективное, интегрированное решение качественно лучше и лишено недостатков индивидуальных мнений экспертов.

Во многих работах исследуются зависимости проявления эффекта самоорганизации от свойств СППР [116]. Р. Стэйси [117] предложил диаграмму соотношения границ порядка и хаоса (рис. 2.7), на которой две оси: «согласованность» и «уверенность». Под согласованностью понимается степень близости мнений участников СППР о текущем состоянии объекта управления. Уверенность – оценка возможности предсказания участниками СППР его будущего состояния. Р. Стэйси полагает, что при высоких уровнях согласованности и уверенности, наиболее эффективно функционируют СППР с жесткой иерархией управления и предлагает называть такие СППР «организованными». Если мнения участников СППР далеки от согласованности, а состояние объекта управления слабо предсказуемо, в СППР возникают случайные, никак не связанные действия и мнения, которые создают беспорядочную, хаотичную атмосферу. Такая СППР – «неорганизованная». Между этими двумя «плюсами» Р. Стэйси выделяет третий класс систем – «самоорганизующиеся». Для них характерна эмерджентность, их структура и взаимодействия между элементами спонтанны, в результате чего СППР эффективно решает поставленные задачи, адаптируясь к меняющейся внешней среде.

Одна из попыток описания функционирования самоорганизующихся систем – CDE-модель [118] Г. Еоянг, описывающая факторы, влияющие на скорость и направление эффекта самоорганизации. Если член СППР понимает, как каждый из факторов обуславливает самоорганизацию, и может повлиять на этот фактор, он может целенаправить самоорганизацию в системе. Применение данной модели к самоорганизующимся системам из средней части диаграммы Р. Стэйси позволяет участникам СППР влиять на баланс между порядком и хаосом в СППР – между ее чрезмерной организацией и полным беспорядком.



Рис. 2.7 – Диаграмма соотношения границ порядка и хаоса в СППР по Р. Стэйси

Р. Паскаль, М. Миллеманн и Л. Джиоя [119] предлагают для построения самоорганизующихся СППР использовать принцип Златовласки (героини английской сказки «Goldilocks and three bears», известной в отечественной литературе в пересказе Л. Толстого под названием «Три медведя»): каша вкусна, если она не слишком горяча и не слишком холодна: для нормального протекания самоорганизации число правил (ограничений) в системе должно быть не слишком мало и не слишком велико. По их мнению, ключ к самоорганизации лежит в конфликте между порядком и свободой воли. В природе такой конфликт возникает, например, между естественным отбором (представляющим порядок) и критическими событиями (случайные мутации или разрушение окружающей среды). В СППР порядок обеспечивается правилами (ограничениями) и координацией взаимодействия экспертов, а самоорганизация СППР состоит в определении какие из ее функций или областей деятельности слишком упорядочены, а какие, наоборот, упорядочены недостаточно. Если участник СППР (эксперт или ЛПР) замечает, что самоорганизации препятствует слишком высокая или, наоборот, недостаточная упорядоченность определенных функций СППР, он должен

предпринять определенные шаги по корректировке факторов, влияющих на самоорганизацию.

В [116] выделяются следующие факторы интенсивности самоорганизации в СППР: ограниченность, наличие разногласий и трансформирующее взаимодействие. Используя эти факторы, ЛПР может влиять на самоорганизацию, усиливая или ослабляя степень упорядоченности и контроля в СППР.

Ограниченность определяет, что входит в состав СППР, а что является внешней средой, иными словами, устанавливает границу СППР. При изменении границы состав СППР меняется, в результате чего со временем возникают новые отношения и структуры внутри СППР. Существуют различные механизмы, обеспечивающие ограниченность СППР: 1) «магнит» – мощная сила, притягивающая к себе части системы (участников СППР), например, авторитетный лидер или оглашение цели; 2) «барьер» – внешнее ограничение, удерживающее части системы вместе, например, принадлежность экспертов к некоторому отделу усиливает эффективность командной работы внутри отдела, в то же время она может усложнять взаимодействие с экспертами других отделов при наличии конкуренции между ними; 3) «сходство» – эксперты удерживаются в СППР благодаря существующим между ними связям, например, профессиональным, культурным, социальным или психологическим.

Разногласия в СППР – движущая сила ее изменений, обеспечивающая потенциал для повышения эффективности работы, как отдельных экспертов, так и СППР в целом. Включение в состав СППР участников разных специальностей с различным опытом работы приводит к интенсификации самоорганизации, а возникновение существенных противоречий и конфликтов между экспертами ведет к образованию новых структур в СППР. Существенное противоречие определяется системой ценностей участников СППР, например, если эксперты придают сильное значение опыту, то вырабатываемые решения будут определяться наиболее опытными участниками.

Трансформирующее взаимодействие определяет, как, несмотря на наличие значительных разногласий, эксперты меняют мнение и изменяются сами в ходе взаимодействия друг с другом и с третьими заинтересованными лицами вне СППР. Большое число таких трансформирующих взаимодействий ускоряет самоорганизацию, меньшее – замедляет ее. Любая передача информации, энергии или вещества может быть частью трансформирующего взаимодействия. Не все взаимодействия трансформирующие. При поверхностных, недостаточных отношениях эксперты работают разрозненно, независимо, что не приводит к возникновению согласованной структуры. Участники испытывают чув-

ство изолированности и беспорядка. Если же связи слишком сильны и/или многочисленны, эксперты имеют мало степеней свободы, что ограничивает их возможности. Чем больше участников в СППР и связей между ними, тем вероятнее, что каждый эксперт, содействует самоорганизации.

Профессор, доктор медицины Н.А. Калтер рассматривает психологические аспекты самоорганизации и синергетического эффекта в СППР [129]. Он предлагает несколько приемов поведения участников СППР, облегчающих возникновение синергетических отношений между ними, когда каждый из экспертов своими действиями способствует повышению эффективности работы других участников и СППР в целом. Эти приемы не революционно новые. Большинство из них люди сознательно или подсознательно используют с давних времен. Тем не менее, именно они, по мнению автора, способствуют возникновению синергетического эффекта.

*Проявление симпатии.* Продуктивное взаимодействие между людьми возникает, если они ощущают некоторую близость, сходство характеров, интересов. Для каждого из экспертов есть множество граней привлекательности. Если симпатия участников СППР ослабевает, требуется проявить ее, причем большое значение имеют невербальные проявления симпатии. Кроме того, автор подчеркивает, что симпатия должна быть искренней, так как люди легко распознают лезть.

*Проявление эмпатии (сопереживания)* – умение поставить себя на место собеседника, понять его. При этом необязательно разделять или принимать его взгляды, систему ценностей, а посмотреть на мир глазами собеседника. Эмпатия приводит к проявлению симпатии, взаимопониманию и повышению эффективности взаимодействия. Кроме того, эмпатия позволяет видеть проблему с различных точек зрения, являясь еще одним шагом на пути к возникновению синергетического эффекта.

*Семантическая «телепатия».* Слово «телепатия» употребляется в переносном смысле; не как прямая передача мыслей, а как способность понимать собеседника с полуслова или вообще без слов. Благодаря семантической «телепатии» получатель сообщения понимает смысл, вкладываемый его отправителем. Семантическая «телепатия» возможна только при симпатии и эмпатии между отправителем и получателем сообщения, то есть при наличии у них схожих моделей внешнего мира. Семантическая «телепатия» сокращает время передачи сообщений между участниками СППР. Они способны понимать смысл сообщения, не получив его полностью, останавливая собеседника, когда семантика передаваемого сообщения стала ясна. В результате повышается скорость обсуждения в СППР. Это следствие того, что эксперты за счет

схожих моделей внешнего мира фокусируются не на синтаксисе сообщения, а на его семантике.

«Синапс». Если в СППР проявляется симпатия, эмпатия, семантическая «телепатия», возможна следующая стадия синергетического функционирования СППР – «синапс», когда эксперты при общении правильно воспринимают не только семантику передаваемых сообщений, но и последствия эти сообщений.

*Дружелюбная беседа* – разговор без раздражения по отношению к идеям и действиям оппонента. Ход дружелюбной беседы регламентируется этим подразумеваемым соглашением. Если оно нарушается одной из сторон, беседа неэффективна и даже контрпродуктивна. Его суть в том, чтобы не обижать и не обижаться на собеседника. Если один из собеседников пытается перекричать другого, проявляет или ощущает враждебность, это негласное соглашение нарушается.

*Совершенная беседа* – высшая форма взаимодействия участников СППР, когда вышеперечисленные приемы используются настолько часто, что СППР функционирует как единое целое.

Н.А. Калтер [129] подчеркивает, что данные принципы оказывают наибольшее влияние на самоорганизацию в СППР, если все или большинство ее участников их принимают и используют. В противном случае, не только не возникает синергетический эффект, но возможен и обратный эффект – «дисергия», т.е. результат работы коллектива может быть хуже решений, предлагаемых от отдельных экспертов.

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что ключ к появлению самоорганизации в СППР – взаимодействие ее участников. Интенсивность самоорганизации зависит от координации в системе, обеспечивающей необходимые уровни упорядоченности или хаоса в СППР, степени согласованности мнений участников, наличия разногласий в СППР и способа их разрешения. В следующем разделе рассмотрим взаимосвязь понятий «самоорганизация», «координация», «согласованность» и «спор» в СППР. Согласно исследованиям Н.А. Калтера серьезное влияние на самоорганизацию оказывают психологические аспекты взаимодействия участников, поэтому возникает проблема подбора участников искренне разделяющих предложенные Н.А. Калтером принципы взаимодействия. Ключевое слово – «искренность», то есть эксперту нельзя дать задание проявлять симпатию или эмпатию к другим членам коллектива, так как неискренность этих проявлений может только навредить процессу принятия решений.

## 2.4 Исследование самоорганизации, координации, согласованности и спора в системах поддержки принятия решений

Организация СППР – трудоемкий процесс решения комплекса задач, часть из которых возникает спонтанно и не формулируема заранее. Подбор участников занимает годы. И дело даже не в том, чтобы собрать высококлассных экспертов из различных областей, охватывающих основные аспекты разнообразия сложной задачи. Необходимо заставить их работать вместе и правильно взаимодействовать. Характер этих взаимодействий, обеспечивающий возникновение эффекта самоорганизации при работе СППР над одной задачей, может быть нерелевантен для решения другой. ЛПР должно иметь знания об эффективности установления и поддержания тех или иных отношений между участниками для решения различных задач.

Как показал анализ исследований в области самоорганизации СППР, наибольшее влияние на интенсивность этого эффекта оказывают такие отношения между экспертами как координация, согласованность и спор.

**Координация.** Исследование понятия «координация» для количественных, хорошо формализуемых задач исследования операций представлено в работах Дж. Фаркаша и Л. В. Кантаровича [98], Дж. Данцига и П. Вулфа [99], а также Р. Беллмана [100] по математическому программированию. При этом декомпозиция сложной задачи на составные части сводится к хорошо развитому в математике приему поиска для исходной матрицы ее «блочной» структуры, вычислениям на частях-блоках и численным методам интеграции (объединения) частных решений в общее. В работах М. Месаровича и И. Такахары предложен иной подход к координации в сложных формализованных задачах [101], введен постулат совместимости. Постулат утверждает, что задачи координируемы относительно глобальной задачи, когда они скоординированы относительно задачи, решаемой вышестоящим элементом. Если решаемые задачи совместимы, то глобальная цель достигается тогда, когда вышестоящий решатель координирует локальные элементы по отношению к его собственной цели, т.е. обеспечивает их интеграцию в единое целое [101]. При таком подходе сложная задача рассматривается как последовательность решаемых подзадач без структурно выделенного координирующего элемента. В этом случае только завершение решения всех подзадач проясняет, получено ли решение общей задачи.

Применение Ф.И. Перегудовым, Ф.Л. Тарасенко, Р. Акоффом, Ф. Эмери [102, 104] системного подхода к анализу решения сложных задач дало более совершенные теоретико-множественные представления. Сложные задачи обрели состав, структуру и эмерджентность. При этом возникли проблемы с количественной мерой сложности и исследовани-

ем причинно-следственных связей качественных (количественных) параметров задачи с ее интегративными свойствами. Практика коллективного решения задачи оперативного планирования в СППР, показывает обязательное наличие координирующего элемента – ЛПР, диспетчера, выполняющего, в частности, специфические, малоизученные функции, связанные с самоорганизацией коллективного обсуждения.

Таким образом, на примере уточнения и развития понятия «задача» прослеживается причинно-следственная связь: чем сложнее задача, чем релевантнее она реальному миру, тем острее необходимость введения механизма взаимосвязи между отдельными частями, подзадачами. Авторы методов решения сложных задач называют такой механизм координацией.

Связующее звено в этой системе – ЛПР. Его работа строится следующим образом: 1) ЛПР разбивает исходную задачу на части и поручает эксперту подзадачу; 2) ожидает, когда эксперты решат подзадачи; 3) агрегирует результаты; 4) по обобщенному решению делает вывод о его допустимости, либо выдает замечания экспертам и решение сложной задачи начинается заново. Следует отметить, что передавая информацию экспертам, ЛПР может пойти двумя путями: 1) поручить исходную задачу целиком каждому эксперту; 2) разделить задачу на части соответственно профессиональным знаниям экспертов. Второй путь предпочтительнее, так как ввиду ограниченности знаний эксперта, последний не может охватить всю задачу, а ограничивается своей профессиональной областью.

Проанализируем, на каком этапе и для чего может потребоваться «координация». Очевидно, что необходимость координировать возникает только после разбиения исходной задачи на части. Если дожидаться полного окончания решения подзадач, то в случае возникновения затруднений у экспертов координация невозможна. В таком случае, ЛПР придется инициировать решение подзадач заново. Координация актуальна только в ходе решения подзадач на совещаниях. Здесь эксперты представляют промежуточные результаты, на основе которых ЛПР выдает указания экспертам по корректировке результатов решаемых подзадач. Причины координации: 1) отклонение интегрированного решения исходной задачи от поставленной цели, за этим следит ЛПР, анализируя промежуточные результаты; 2) возникновение затруднений у экспертов при решении подзадач.

Таким образом, между ЛПР и экспертами возникают отношения координации  $R_{\text{coord}}^{\text{res}}$ , обеспечивающие эффективную совместную работу экспертов. Будем различать множество микроуровневых моделей СППР с координацией  $\widetilde{DSS}_{\text{coord}} \subseteq \widetilde{DSS}$ . Если же в СППР отношения координа-

ции  $R_{\text{coop}}^{\text{res res}}$  отсутствуют, то ее микроуровневая модель принадлежит множеству моделей без координации  $\widetilde{dss} \in \widetilde{DSS}_{\text{coop}} \subseteq \widetilde{DSS}$ . При этом на модели (2.6) выполняются условия:  $\widetilde{DSS}_{\text{coop}} \cap \widetilde{DSS}_{\text{coop}}^- = \emptyset$ ,  $\widetilde{DSS}_{\text{coop}} \cup \widetilde{DSS}_{\text{coop}}^- = \widetilde{DSS}$ .

**Согласованность.** Как было показано в разд. 2.1, коллективное принятие решений в СППР обеспечивается совместной работой нескольких человек. Каждый участник обладает уникальным набором мотивов или целей и имеет свою точку зрения на решаемую задачу [6], и все участники заинтересованы в том, чтобы выработать эффективное решение [157, 158].

Решения зависят, по крайней мере частично, от предпочтений экспертов [159]. П. Фишберн [160] полагает, что выбор группы или коллективные действия основываются на желаниях или предпочтениях индивидов общества, группы или коллектива. Тем не менее, коллективное решение СППР может сильно отличаться от первоначальных мнений экспертов. Взаимодействуя в ходе обсуждения, эксперты СППР корректируют свои точки зрения, дорабатывают решения других экспертов. При этом, чем разнообразнее первоначальные мнения и цели экспертов, тем шире область допустимых решений, исследованных в ходе обсуждения. При решении одних задач ЛПР стремится именно к такому эффекту. Для решения других задач, например, когда требуется, чтобы эксперты совместно обосновали выбор некоторого решения, высокое разнообразие целей и мнений экспертов не требуется. Таким образом, для успешного решения задач ЛПР должен обладать знаниями об эффективности классов микроуровневых моделей СППР.

В зависимости от соотношения целей участников СППР будем различать три типа отношений по степени согласованности: конкуренцию  $R_{\text{comp}}^{\text{res res}}$ , при которой достижение цели одним участником исключает возможность достижения цели другим; сотрудничество  $R_{\text{coop}}^{\text{res res}}$ , когда цели участников совпадают; нейтралитет  $R_{\text{neut}}^{\text{res res}}$ , если цели не совпадают и не противоречат друг другу.

В зависимости от присутствующих в СППР классов отношений будем выделять три подмножества микроуровневых моделей СППР: 1) сотрудничества  $\widetilde{DSS}_{\text{coop}} \subseteq \widetilde{DSS}$ , когда СППР состоит из сотрудничающих и нейтральных участников, и нет отношений конкуренции; 2) нейтралитета  $\widetilde{DSS}_{\text{neut}} \subseteq \widetilde{DSS}$ , когда все отношения в СППР нейтральные; 3) конкуренции  $\widetilde{DSS}_{\text{comp}} \subseteq \widetilde{DSS}$ , когда в СППР есть хотя бы одна пара экспертов с отношением конкуренции; в таких СППР могут быть



также нейтральные и сотрудничающие участники; при наличии сотрудничающих участников они рассматриваются как единый мнимый участник, тогда все участники только конкурирующие или нейтральные. При этом на модели (2.6) выполняются условия:  $\widetilde{DSS}_{coop} \cap \widetilde{DSS}_{neut} = \emptyset$ ,  $\widetilde{DSS}_{comp} \cap \widetilde{DSS}_{neut} = \emptyset$ ,  $\widetilde{DSS}_{coop} \cap \widetilde{DSS}_{comp} = \emptyset$ ,  $\widetilde{DSS}_{coop} \cup \widetilde{DSS}_{comp} \cup \widetilde{DSS}_{neut} = \widetilde{DSS}$ .

**Спор.** Существует несколько причин исследования явления «спор» в СППР. Первая – результат Е.С. Вентцель [161]: «Общих способов построения математических моделей не существует... Поскольку математическая модель не вытекает с непреложностью из описания задачи, всегда полезно не верить слепо ни одной модели, а сличать результаты, полученные по разным моделям, устраивая как бы «спор моделей». При этом одну и ту же задачу решают не один раз, а несколько, пользуясь разной системой допущений, разным аппаратом, разными моделями. Если научные выводы от модели к модели меняются мало – это серьезный аргумент в пользу объективности исследований. Если они существенно расходятся, надо пересмотреть концепции, положенные в основу различных моделей, посмотреть, какая из них более адекватна действительности» [161, с. 20 – 21].

Вторая причина – результаты многочисленных наблюдений за работой ЛПР, в СППР [5]. Опытный руководитель в ходе обсуждения старается завязать (организовать) в аудитории экспертов дискуссию, очевидно, хорошо усвоив простое правило работы в коллективе: «В споре рождается истина». Авторы понимают, что известны и другие «крылатые» суждения относительно спора.

Наконец, третья причина – это предположения, взятые из [5], где утверждается, что эксперт успешно решает сложные задачи, используя три вида информации: 1) опыт; 2) профессиональные знания и 3) теоретические знания. При этом в рассуждениях над решением задачи они применяются в вышеперечисленном порядке.

Таким образом, между экспертами возникают отношения координации  $R_{disp}^{res\ res}$ , обеспечивающих обмен мнениями и доработку их промежуточных решений. В этом случае будем различать множество микроуровневых моделей СППР со спором экспертов  $\widetilde{DSS}_{disp} \subseteq \widetilde{DSS}$ . Если же в СППР отношения спора  $R_{disp}^{res\ res}$  отсутствуют, то ее микроуровневая модель принадлежит множеству моделей без спора  $\widetilde{dss} \in \widetilde{DSS}_{\overline{disp}} \subseteq \widetilde{DSS}$ , а на модели (2.6) выполняются следующие условия:  $\widetilde{DSS}_{disp} \cap \widetilde{DSS}_{\overline{disp}} = \emptyset$ ,  $\widetilde{DSS}_{disp} \cup \widetilde{DSS}_{\overline{disp}} = \widetilde{DSS}$ .

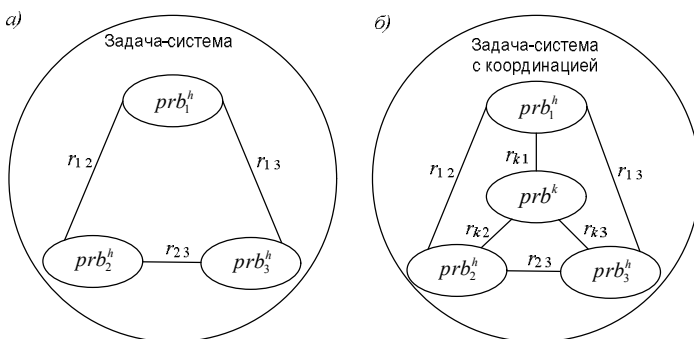
Анализ понятий «координация», «согласованность» и «спор» показал, что существует, как минимум, два класса микроуровневых моделей СППР по признаку наличия координации между ЛПР и экспертами, три класса по степени согласованности экспертов и два класса по признаку наличия спора в СППР. Таким образом, может существовать не менее 12 различных классов микроуровневых моделей СППР. В ходе самоорганизации (2.17) СППР меняет свою микроуровневую модель так, чтобы оставаться релевантной возникающим задачам. В этой связи необходимо получить знания о релевантности перечисленных микроуровневых моделей СППР различным задачам. Исследованию влияния процессов координации, согласованности и спора на качество принимаемых СППР решений, как проявлений эффекта самоорганизации, посвящены главы 3 – 5. Вопрос о взаимном влиянии этих процессов на принятие решений в СППР – предмет дальнейших исследований.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ КООРДИНАЦИИ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Координация – процесс, происходящий в СППР в ходе решения сложных задач и представляющий последовательность анализа промежуточных результатов решения подзадач и выдачи управляющих воздействий. Координация осуществляется ЛПР, однако, может инициироваться и экспертами. В данной работе инициатор координации – ЛПР. понятие «координация» применительно к СППР еще не исследовалось. Изучение реальных СППР определило разработку новой модели сложной задачи и метода моделирования решения сложных задач с координацией подзадач с целью их применения для конструирования компьютерных СППР.

#### 3.1 Модель «Сложная задача с координацией»

Задачи в системном подходе традиционно рассматриваются как системы [102, 104] из отдельных неделимых задач-элементов, между которыми есть связи, взаимодействия (рис. 3.1, а). Порядок соединения и взаимодействия элементов в системе определяется ее структурой.



Обозначения:  $prb_1^h, \dots, prb_3^h$  - задачи-элементы (подзадачи);

$prb^k$  - задача-координатор;  $r_{qw} | q, w = 1, \dots, 3; q \neq w$  - отношения подзадач;

$r_{kw} | w = 1, \dots, 3$  - отношения координатора и подзадач

Рис. 3.1 – Традиционное представление задачи в системном подходе (а) и представление задачи в системном подходе с учетом координации (б)

Обозначим задачу-систему  $prb^u$ , а задачу-элемент –  $prb^h$ . Тогда  $PRB^h = \{prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h\}$  – множество задач-элементов, входящих в  $prb^u$ ;  $\widehat{PRB}^u = \{\widehat{prb}_1^u, \dots, \widehat{prb}_{N_u}^u\}$  – множество декомпозиций задачи  $prb^u$  [5];  $R^h = \{r_{w,q} \mid w, q = 1, \dots, N_h; q \neq w\}$  – множество отношений между задачами-элементами;  $N_h$  – мощность множества  $PRB^h$ .

Модель задачи-системы представим в виде:

$$prb^u = \langle PRB^h, \widehat{PRB}^u, R^h \rangle, \quad (3.1)$$

а модель каждой подзадачи как [5]:

$$prb^h = \langle GL^h, DAT^h, MET^h \rangle, \quad (3.2)$$

где  $GL^h$  – конечная цель;  $DAT^h$  – исходные данные;  $MET^h$  – условия, конкретизирующие как  $DAT^h$  преобразуются в  $GL^h$ .

Модель (3.1) удовлетворяет всем свойствам системы: она состоит из множества элементов –  $PRB^h$ , между которыми установлены отношения  $R^h$ ; связи организованы, что отражено во множестве декомпозиций  $\widehat{PRB}^u$ ; при решении задачи-системы задачи-элементы преимущественно отделены от внешней среды или ее состояние зафиксировано, т.е. выполняется требование того, что связи внутри системы много сильнее, чем с внешней средой; простое суммирование решений задач-элементов не дает решение задачи-системы в целом [109, 110].

Модель (3.1) имеет недостатки. Основной – нерелевантное отображение отношений между элементами. Учитывать только множество отношений  $R^h$  между подзадачами недостаточно. Исследования СППР показали, что в большинстве случаев эксперты не могут дать профессиональные решения подзадач на основе данных о сложной задаче, заданных ЛПП. Обычно не хватает ресурсов, в частности времени, и имеют место ошибки в целеполагании. Изменение первоначальных условий в модели (3.1) невозможно из-за отсутствия существенного элемента – образа ЛПП, который бы выполнял функцию координатора и переформулировал в зависимости от ситуации цели экспертов. Можно отметить, что проблема взаимодействия элементов имеет глубокий философский аспект, поскольку нет строгого понятия о том, какое влияние отдельные элементы оказывают на систему в целом, и как система влияет на отдельные элементы [162]. Этот аспект был изложен в разд. 1.1.

В предлагаемом подходе решение задачи рассматривается не только как отображение последовательности решения подзадач, но и как сис-

тема с координатором  $prb^k$  (рис. 3.1, б), функция которого – мониторинг и управление процессом решения подзадач  $prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$  экспертами в ходе коллективного обсуждения. Координатор связан отношениями  $R^{hk} = \{r^{kw} \mid w=1, \dots, N_h\}$  с каждой задачей  $prb^h$  в системе  $prb^u$ , посредством которых собирает информацию о состоянии процесса решения экспертом задачи-элемента, и в определенные моменты времени выдает координирующие воздействия для изменения входного набора данных: ресурсов и целей. При этом модель сложной задачи с координацией представима выражением:

$$prb^{uk} = \langle PRB^h, \widehat{PRB}^u, prb^k, R^h, R^{hk} \rangle, \quad (3.3)$$

где  $prb^k$  – координатор;  $R^{hk} = \{r^{kw} \mid w=1, \dots, N_h\}$  – множество отношений между координатором и задачами-элементами.

Можно дать следующее определение сложной задачи – это задача, состоящая из подзадач, взаимодействующих между собой в соответствии с заданной декомпозицией, в которой выделен специальный элемент – координатор, управляющий обменом данными (значениями переменных, синхроимпульсами и т.п.) между решателями подзадач.

Сравнение (3.1) и (3.3) показывает, что (3.3) имеет более общий характер и сводится к (3.1) при отбрасывании в модели (3.3) задачи-координатора, т.е. в случае, когда ЛПП в СППР не выполняет координацию в ходе решения сложной задачи. Элемент-координатор может быть представлен «координирующей задачей» ( $k$ -задачей), которая должна быть «добавлена» в декомпозицию  $\widehat{prb}^u \in \widehat{PRB}^u$  сложной задачи  $prb^u$ , чтобы релевантно отображать в модели особенности задач планирования. Рассмотрим сущность задачи-координатора.

Пусть задача-система оперативно-производственного планирования  $prb^u$ , состоящая из двух подзадач-элементов  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$ , а  $SOL_1^h = \{sol_1^{h1}, \dots, sol_{N_{sh1}}^{h1}\}$ ,  $SOL_2^h = \{sol_1^{h2}, \dots, sol_{N_{sh2}}^{h2}\}$  и  $SOL^u = \{sol_1^u, \dots, sol_{N_{su}}^u\}$  – множества всех возможных результатов решения задач-элементов  $prb_1^h$ ,  $prb_2^h$  и задачи-системы  $prb^u$ , соответственно. Множество  $SOL^u$  – результирующее решение, т.е. интеграция результатов  $SOL_1^h$  и  $SOL_2^h$ .

Введем множество  $MET^* = \{met_1, \dots, met_{N_{MET^*}}\}$  условий координации. В простейшем случае задач линейного программирования [98, 99] это неравенства. На практике эти условия чаще записываются на естественном языке, например, «если есть нехватка материалов (результат решения  $prb_1^h$ ) и заказов с предоплатой более 50% более половины от обще-

го числа (результат решения  $prb_2^h$ ), то в производство запустить только заказы с предоплатой более 50%». Тогда, решением задачи  $prb^u$  будем считать искомый в ходе работы СППР план – интегрированный результат решения подзадач, который формирует ЛПП на основе комбинации решений подзадач и условий координации, например,  $sol_1^{h1} \cdot sol_3^{h2} \cdot met_6 \rightarrow sol_2^u$ . Знак « $\cdot$ » обозначает конъюнкцию, знак « $\rightarrow$ » обозначает отображение.

Пусть  $MET^* = \{met_1, \dots, met_{N_{MET^*}}\}$  – множество условий. Тогда может быть определено соответствие  $\psi_1$ :

$$\psi_1 : SOL_1^h \otimes SOL_2^h \otimes MET^* \rightarrow SOL^u. \quad (3.4)$$

Элементы соответствия  $\psi_1$  – кортежи  $((sol_\alpha^{h1}, sol_\beta^{h2}, met_\gamma), sol_\eta^u)$ , при  $\alpha = 1, \dots, N_{sh1}$ ;  $\beta = 1, \dots, N_{sh2}$ ;  $\gamma = 1, \dots, N_{MET^*}$ ;  $\eta = 1, \dots, N_{su}$ , где первая компонента – трехкомпонентный вектор, состоящий из решения  $sol_\alpha^{h1} \in SOL_1^h$  задачи  $prb_1^h$ , решения  $sol_\beta^{h2} \in SOL_2^h$  задачи  $prb_2^h$  и координирующего условия  $met_\gamma \in MET^*$ , а вторая – решение  $sol_\eta^u$  задачи  $prb^u$ .

Соответствие  $\psi_1$  не является функцией, не может быть записано аналитически и вычислено, поскольку условия координации и результаты решения задач-элементов чаще всего представлены на естественном языке. Оно однозначно, поскольку невозможно реализовать несколько планов производства сразу, сюръективно – каждое решение задачи  $prb^u$  соответствует хотя бы одному элементу из  $SOL_1^h \otimes SOL_2^h \otimes MET^*$  – и не инъективно, так как не каждому элементу из  $SOL_1^h \otimes SOL_2^h \otimes MET^*$  соответствует решение задачи  $prb^u$ . Поиск элементов соответствия  $\psi_1$  – задача координатора ( $k$ -задача). Процесс ее решения назовем «процессом координации» и рассмотрим его подробно.

Пусть в результате решения подзадач  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$  получены решения  $sol_1^{h1} \in SOL_1^h$  и  $sol_1^{h2} \in SOL_2^h$ , причем  $\{(sol_1^{h1}, sol_1^{h2})\} \otimes MET^* \not\rightarrow SOL^u$ , т.е. полученные решения  $sol_1^{h1}$  и  $sol_1^{h2}$  при всех  $met_\gamma \in MET^*$  не приводят к решению задачи  $prb^u$ . Знак « $\not\rightarrow$ » обозначает отсутствие отображения множества с левой части знака во множество с его правой части. При этом необходимо повторное решение задач  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$ . Однако в СППР часто нет времени на то, чтобы решать задачу заново, поэтому рассуждения над сложной задачей  $prb^u$  разбиваются на от-

дельные, логически завершенные промежуточные этапы [163, 164], а в конце этапов систематически проверяется интегрированный результат решения сложной задачи, т.е. организуется итеративный процесс. Как следствие, решения подзадачи  $prb^h$  (линии рассуждения экспертов) также разбиваются на части.

В рассматриваемом примере, в процессе решения задач  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$  будут получены следующие промежуточные результаты:

$$\begin{aligned} sol_{11}^{h1} &\Rightarrow sol_{12}^{h1} \Rightarrow \dots \Rightarrow sol_{1s-1}^{h1} \Rightarrow sol_{1N_{sol}}^{h1} = sol_{11}^{h1}, \\ sol_{11}^{h2} &\Rightarrow sol_{12}^{h2} \Rightarrow \dots \Rightarrow sol_{1s-1}^{h2} \Rightarrow sol_{1N_{sol}}^{h2} = sol_{11}^{h2}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где  $N_{sol}$  – количество шагов итерации, на которые разбиты подзадачи; а  $sol_{11}^{h1}$  и  $sol_{11}^{h2}$  – результаты решения задач-элементов  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$ , соответственно, к которым привела последовательность шагов  $1, \dots, N_{sol}$ .

По итогам проверки координатором полученных на конкретном шаге результатов выявляется актуальность воздействия на ход решения подзадач  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$  для того, чтобы процесс решения сложной задачи  $prb^u$  привел к получению заданного результата – цели, например, оптимального количества изготавливаемых изделий для максимально полного удовлетворения нужд заказчиков в заданные сроки. Само воздействие назовем координирующим, и для упрощения далее будем обозначать результат промежуточного этапа без первого нижнего индекса, т.е.  $sol_l^{h1}$  и  $sol_l^{h2}$ , где  $l = 1, \dots, N_{sol}$ .

Следуя [107], введем множество координирующих воздействий:

$$E = \{e_1^\alpha, \dots, e_{N_{pr}}^\alpha\}, \quad (3.6)$$

где  $\alpha$  – тип координирующего воздействия,  $\alpha = 1, \dots, 6$ . Рассмотрим каждый из шести типов.

Интегральная координация ( $\alpha = 1$ ) – ЛПР устанавливает на входные параметры  $in_i^{h1} \in IN^{h1} \subseteq DAT^h$  подзадачи  $prb_1^h$  различные ограничения (нормативы) на определенный период времени:

$$\int_0^T (in_i^{h1}(t))dt = in_i^{h1H}, \quad (3.7)$$

где  $in_i^{h^1H}$  – норматив для входного параметра  $in_i^{h^1} \in IN^{h^1}$ ,  $i = 1, \dots, N_{inhl}$ ;  $IN^{h^1}$  – множество входных параметров подзадачи  $prb_1^h$ ;  $[0, T]$  – временной интервал. Пример – «суммарный расход стали за месяц не должен превышать пять тонн».

Четкая координация ( $\alpha = 2$ ) устанавливает ограничение на входные параметры подзадачи, чтобы в каждый момент времени  $t$  они были равны заданному значению:

$$in_i^{h^1}(t) = in_i^{h^1Set}, \quad (3.8)$$

где  $in_i^{h^1}(t)$  – входной параметр;  $in_i^{h^1Set}$  – заданное значение параметра;  $t$  – произвольный момент времени, в который проверяется выполнения условия,  $t \in [0, +\infty]$ . Пример – «каждый день должно изготавливаться 5 взрывозащищенных коробок».

Интервальная координация ( $\alpha = 3$ ) требует принадлежности входного параметра  $in_i^{h^1}$  подзадачи (исходные данные) заданному интервалу:

$$in_i^{h^1} \in [val_{\min}^{h^1i}, val_{\max}^{h^1i}], \quad (3.9)$$

где  $val_{\min}^{h^1i}, val_{\max}^{h^1i}$  – границы интервала. Пример – «расход наконечников должен быть в пределах от 1000 до 1100 штук на щит автоматики»;

Лингвистическая координация ( $\alpha = 4$ ) – условие, заданное на естественном языке. Пример – «если срок поставки материалов больше 14 дней, то можно поменять поставщика на более дорогого»;

Координация по времени, синхронизация решения подзадач ( $\alpha = 5$ ) – установить, через какой период времени требуется дать промежуточный результат, т.е.  $sol_l^{h^1}$ , где  $l = 1, \dots, N_{sol}$  результаты решения подзадач выдаются через строго определенные интервалы времени:

$$sol_l^{h^1} \xrightarrow{\tau} sol_{l+1}^{h^1}, \quad (3.10)$$

где  $\tau$  – интервал времени, через который происходит выдача решения;  $sol_l^{h^1}$  и  $sol_{l+1}^{h^1}$  – результат решения задачи  $prb_1^h$  после  $i$ -го и  $i+1$ -го этапа решения сложной задачи.

Ситуацию, когда линия рассуждения эксперта не меняется, обозначим как «пустое действие»  $\alpha = 6$ . Например, ЛПП считает, что не нужно влиять на ход решения подзадачи экспертом.



Поскольку результаты решения подзадач наиболее часто выдаются на естественном языке, то и координирующие воздействия  $e_1^\alpha, \dots, e_{N_{pr}}^\alpha$  также чаще всего представлены так же.

Тогда, с учетом вышесказанного, установим соответствие:

$$\Psi_2 : \{(sol_l^{h1}, sol_l^{h2})\} \otimes MET^* \rightarrow E, \quad (3.11)$$

где  $l = 1, \dots, N_{sol} - 1$ . В качестве максимального значения индекса  $l$  используется  $N_{sol} - 1$ , так как после этапа  $N_{sol}$  уже невозможно координировать решение подзадач – получен конечный результат.

Элементы соответствия  $\Psi_2$  – пары  $((sol_l^{h1}, sol_l^{h2}, met_\gamma), e_q^\alpha)$ , при  $l = 1, \dots, N_{sol} - 1$ ;  $\gamma = 1, \dots, N_{MET^*}$ ;  $q = 1, \dots, N_{pr}$ , где первая компонента – трехкомпонентный вектор, состоящий из решения  $sol_l^{h1} \in SOL_1^h$  задачи  $prb_1^h$ , решения  $sol_l^{h2} \in SOL_2^h$  задачи  $prb_2^h$  и координирующего условия  $met_\gamma \in MET^*$ , а вторая – координирующее воздействие  $e_q^\alpha \in E$ . Аналогично (3.4) соответствие (3.11) не является функцией. Оно многозначно, поскольку возможно применение по отношению к одной и той же задаче-элементу  $prb^h$  нескольких координирующих действий  $e_q^\alpha \in E$  сразу.

Поскольку есть ограничение на количество шагов (в реальных задачах оперативно-производственного планирования число планерок ограничено), то при  $l = N_{sol}$  должно иметь место соответствие:

$$\Psi_3 : \{(sol_l^{h1}, sol_l^{h2})\} \otimes MET^* \rightarrow SOL^u. \quad (3.12)$$

Элементы соответствия  $\Psi_3$  – пары вида  $((sol_l^{h1}, sol_l^{h2}, met_\gamma), sol_\eta^u)$ , при  $l = 1, \dots, N_{sol} - 1$ ;  $\gamma = 1, \dots, N_{MET^*}$ ;  $\eta = 1, \dots, N_{su}$ , где первая компонента – трехкомпонентный вектор, состоящий из решения  $sol_l^{h1} \in SOL_1^h$  задачи  $prb_1^h$ , решения  $sol_l^{h2} \in SOL_2^h$  задачи  $prb_2^h$  и координирующего условия  $met_\gamma \in MET^*$ , а вторая – решение  $sol_\eta^u \in SOL^u$  задачи  $met^u$ . Если  $\Psi_3$  не существует, т.е. в результате поиска элементов  $\Psi_3$  обнаруживается, что  $\Psi_3 = \emptyset$ , то ЛПП необходимо изменить множество условий координации  $MET^*$ : ввести новые условия и удалить часть старых.

Соответствие  $\Psi_3$  – подмножество множества  $\Psi_1$ ,  $\Psi_3 \subseteq \Psi_1$ , так как единственное отличие в том, что в  $\Psi_3$  указаны конкретные результаты решения задач  $prb_1^h$  и  $prb_2^h$ .

Поскольку не все элементы соответствия  $\Psi_3$  имеют в качестве второй компоненты  $sol_{\eta}^u \in SOL^u$ , которое удовлетворяет цели решения  $prb^u$ , обозначим  $DAT_{\Psi_3}$  множество элементов соответствия  $\Psi_3$ , в которых вторая компонента удовлетворяет цели решения  $prb^u$ ,  $DAT_{\Psi_3} \in \Psi_3$ .

С учетом вышесказанного, а также учитывая модель (3.2), модель  $k$ -задачи можно записать следующим образом:

$$prb^k = \langle SOL_1^h, SOL_2^h, \Psi_2, DAT_{\Psi_3} \rangle, \quad (3.13)$$

где  $SOL_1^h, SOL_2^h$  – исходные данные для задачи-координатора  $prb^k$ , выраженные комбинацией чисел, слов и выражений;  $DAT_{\Psi_3} \in \Psi_3$  – конечная цель решения задачи-координатора  $prb^k$ ;  $\Psi_2$  – множество условий, конкретизирующих, как формируются после каждого шага координирующие воздействия (3.11), в результате применения которых после последнего шага может быть получено  $DAT_{\Psi_3}$ .

На основании вышесказанного дадим следующее определение процесса координации – итерационный (многоэтапный) процесс, в ходе которого, после каждой итерации ЛПР анализирует интегрированный результат решения совокупности подзадач и выбирает координирующие воздействия для линии рассуждений каждого из экспертов, с тем, чтобы по окончании процесса решения сложной задачи получить общий результат ее решения максимально близкий к желаемому для ЛПР.

Можно также отметить, что с увеличением количества задач-элементов, актуальность координации их решения возрастает, так как комбинаторно увеличивается количество отношений (обмен информации, использование общих переменных или общих ограничений) между задачами-элементами.

### 3.2 Концептуальная модель координации в системах поддержки принятия решений

В предыдущем разделе была получена модель координатора (3.13). В СППР в качестве такого элемента выступает ЛПР, оно редуцирует сложную задачу на подзадачи, выдает исходные данные для экспертов и собирает результаты решения. Недостаток существующих КСППР в том, что координация в них выполняется однократно, в конце решения задачи, когда ЛПР, выполнив агрегацию результатов решения подзадач в единое решение, делает вывод о его пригодности. При неудовлетворительной оценке интегрированного результата возможности решить за-

дачу снова может и не быть. Поэтому актуальна разработка КСППР, в которых координация идет по ходу решения сложной задачи.

На основе модели СППР из [86], а также модели сложной задачи с координацией из разд. 3.1 построим модель СППР с координацией:

$$DSS = \langle PRT, prt^{dm}, R^{dm} \rangle, \quad (3.14)$$

где  $PRT = \{prt_q \mid q = 1, \dots, N_{prt}\}$  – множество моделей экспертов;  $prt^{dm}$  – модель ЛПР;  $R^{dm} = \{r^{dm\ q} \mid q = 1, \dots, N_{prt}\}$  – отношения между ЛПР и экспертами, например, отношения обмена информацией. Каждый эксперт работает строго в своей области знаний  $S_{prtq} \in S$ , где  $S$  – множество всех областей знаний необходимых для решения сложной задачи, и не занимается никакими подзадачами кроме своей,  $S_q \cap S_w = \emptyset$ , при  $q, w = 1, \dots, N_{prt}; q \neq w$ . Основываясь на рассуждениях из [5] и учитывая, что в реальных задачах подзадачи решаются экспертами поэтапно, модель эксперта можно представить выражением:

$$prt_q = \langle B_{prof}, B_{theor}, B_{prec}, B_{facts}, MET_{prtq}, S_{prtq}, In_{prtq}, \Delta t \rangle, \quad (3.15)$$

где  $B_{prof}$  – производственная база профессиональных знаний;  $B_{theor}$  – производственная база теоретических знаний;  $B_{prec}$  – база прецедентов (опыт);  $B_{facts}$  – база фактов;  $MET_{prtq}$  – множество методов рассуждений;  $S_{prtq}$  – описание области знаний эксперта, например, в математике описание математического языка, основных понятий, операций;  $In_{prtq}$  – интерпретатор, обеспечивающий выполнение последовательности правил для решения задачи на основе фактов и правил, хранящейся в базах данных и знаний;  $\Delta t$  – период выдачи экспертами промежуточных решений.

Модель ЛПР может быть построена по аналогии с (3.15):

$$prt^{dm} = \langle B_{prof}, B_{theor}, B_{prec}, B_{facts}, B_{ext}, MET_{prtdm}, S_{prtdm}, In_{prtdm}, E, T \rangle, \quad (3.16)$$

где  $B_{ext}$  – производственная база знаний о том, как выполнять редукцию, агрегацию, сравнение и координацию;  $E$  – множество координирующих действий;  $T$  – время на решение сложной задачи.

Выражение (3.16) в сравнении с (3.15) имеет существенные отличия. Производственная база знаний  $B_{ext}$  о том, как ЛПР управляет решением сложной задачи. Эти знания отсутствуют у других экспертов. Множе-

ство  $E$  описывает, как ЛПП может координировать работу экспертов. В данной работе в модели ЛПП не учитываются:  $B_{prof}$  – база профессиональных знаний;  $B_{theor}$  – база теоретических знаний;  $B_{prec}$  – база прецедентов (опыт).

Рассмотрим, как функционирует СППР в соответствии с (3.14). Пусть перед ЛПП поставлена задача  $prb^u$ , редуцируемая им на подзадачи  $prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$ . Анализируя (3.2) и (3.15), а также опираясь на практику решения сложной задачи оперативно-производственного планирования [111], можно сделать выводы:  $GL^h$  содержится в  $B_{pred}$  и  $B_{facts}$  – опыт в сочетании с фактами позволяет эксперту определить, какой результат должен быть получен;  $MET^h$  содержится в  $B_{prof}$ ,  $B_{theor}$ ,  $B_{pred}$ ,  $MET_{prti}$ ,  $S_{prti}$  и  $In_{prti}$ ;  $DAT^h$  содержится в  $B_{facts}$ .

В традиционных СППР, описанных, например, в [5], каждый эксперт  $prt_q$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$ , получив свою подзадачу  $prb_j^h$ ,  $j = 1, \dots, N_h$ , находит ее решение, используя свои профессиональные  $B_{prof}$  и теоретические знания  $B_{theor}$ . По окончании процесса решения он выдает результат  $sol^{h,j} \in SOL_j^h$ , где  $SOL_j^h$  – множество результатов решения задачи  $prb_j^h$ , что можно записать в виде соответствия  $\psi_4$ :

$$\psi_4 : DAT^h \otimes B^U \rightarrow SOL^h, \quad B^U = B_{prof} \cup B_{theor}. \quad (3.17)$$

Элементы соответствия  $\psi_4$  – кортежи  $(\{dat_\sigma^h\}, \{b_\beta^u\}, sol_\gamma^h)$ , при  $\sigma = 1, \dots, N_{dath}$ ;  $\beta = 1, \dots, N_b$ ;  $\gamma = 1, \dots, N_{sh}$ , где первая компонента – двухкомпонентный вектор, состоящий из перечня исходных данных  $\{dat_\sigma^h\}$ ,  $dat_\sigma^h \in DAT^h$  и перечня используемых экспертом знаний  $\{b_\beta^u\}$ ,  $b_\beta^u \in B^U$  (профессиональных знаний – производственных правил; теоретических знаний – аналитических зависимостей), а вторая – результат  $sol_\gamma^h \in SOL^h$  решения задачи  $prb^h$ .

Соответствие  $\psi_4$  не является функцией (не может быть записано аналитически или вычислено численными методами), так как знания эксперта и результаты решения задачи-элемента могут представляться на естественном языке. Оно неоднозначно, поскольку при неполном наборе исходных данных, эксперт может предложить несколько вариантов результатов, сюръективно, так как каждое решение задачи  $prb^h$  соответствует хотя бы одному элементу из  $DAT^h \otimes B^U$  и не инъектив-

но, так как не каждому элементу из  $DAT^h \otimes B^U$  соответствует решение задачи  $prb^h$ .

Количество этапов, на которые эксперты разбивают процесс решения подзадач, обозначим  $N_{sol}$ , а  $sol_l^h$  – результат решения подзадачи на  $l$ -ом этапе,  $l=1, \dots, N_{sol}$ . На этап отводится интервал времени  $\Delta t$ . Поскольку в практических задачах общее время  $T$  на решение сложной задачи  $prb^u$ , строго ограничено, а время  $\Delta t$  между планерками постоянно, то количество этапов определяется по формуле:

$$N_{sol} = T / \Delta t. \quad (3.18)$$

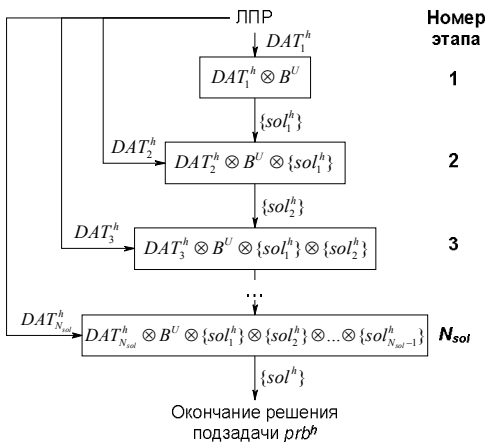
Следует отметить, что в процессе решения подзадачи  $prb^h$ , из-за координирующих воздействий ЛПР исходные данные  $DAT^h$  в (3.17) могут быть модифицированы – введена дополнительная информация или заменена устаревшая информация на новую. Пусть  $DAT_l^h$  исходные данные для  $l$ -го этапа,  $l=1, \dots, N_{sol}$ . Тогда  $DAT_1^h$  – исходные данные, полученные от ЛПР, причем  $DAT_1^h = DAT^h$ , а  $DAT_l^h$ ,  $l=2, \dots, N_{sol}$  – исходные данные последующих этапов. Индекс  $l$  обозначает номер этапа, на котором используются исходные данные. Определим  $DAT_{l+1}^h$  – исходные данные  $l+1$ -го этапа, полученные после координирующих воздействий ЛПР по изменению данных  $l$ -го этапа.

Графически процесс решения подзадачи экспертом представлен на рис. 3.2. Схема последовательности этапов работы эксперта по поиску решения подзадачи  $\pi^h$  может быть выражена следующим образом:

$$DAT_l^h \otimes B^U \otimes \{sol_l^h\} \otimes \dots \otimes \{sol_{l-1}^h\} \Rightarrow \{sol_l^h\}, \quad l=1, \dots, N_{sol}. \quad (3.19)$$

Исходные данные  $DAT_l^h$ ,  $l=1, \dots, N_{sol}$  на каждом этапе дополняются координирующими воздействиями  $e^\alpha \in E$ , выданными ЛПР эксперту, которые оно определяет на основе интегрированного результата решения задачи  $prb^u$  на  $l-1$ -ом этапе. В общем случае, ЛПР может дать несколько координирующих воздействий каждому эксперту. Будем считать, что эксперту выдается одно координирующее воздействие одного типа. Определим соответствие  $\psi_5$ :

$$\psi_5 : \{sol_l^h\} \otimes B_{ext} \rightarrow E, \quad l=1, \dots, N_{sol} - 1. \quad (3.20)$$



Номер этапа	
1	Максимальное значение $l$ равно $N_{sol} - 1$ , потому что после $N_{sol}$ этапа уже невозможно использовать координату, так как получен конечный результат;
2	$sol_l^u$ – интегрированный результат решения задачи $prb^u$ на $l$ -ом этапе;
3	$E = \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{N_e}\}$ – множество векторов вида $(e_1^1, \dots, e_{N_{prt}}^6)$ , каждый компонент которого – координирующее действие для эксперта, $e_q^\alpha \in E$ , $q = 1, \dots, N_{prt}$ .

Рис. 3.2 – Модель процесса решения подзадачи  $prb^h$  экспертом  $prt_q$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$

Поскольку знания об интеграции входят в состав  $B_{ext}$  ЛПР (3.16), то интегрированный результат  $sol_l^u$  решения сложной задачи  $prb^u$  можно записать следующим образом:

$$\{sol_l^{h1}\} \otimes \dots \otimes \{sol_l^{hN_h}\} \otimes B_{ext} \rightarrow \{sol_l^h\}, \quad (3.21)$$

где  $sol_l^{h1}, \dots, sol_l^{hN_h}$  – решения подзадач  $prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$ , соответственно.

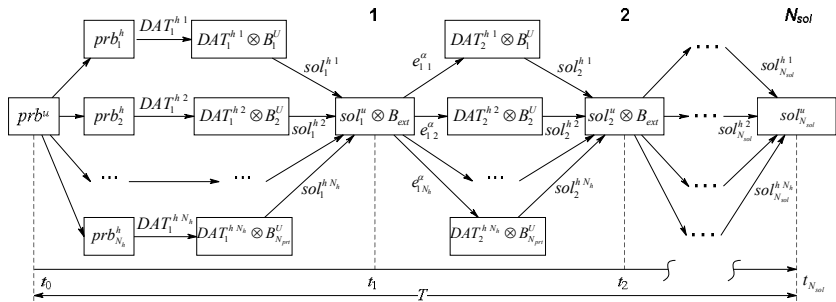
Элементы соответствия  $\psi_5$  – кортежи  $((sol_l^u, \{b_{ext}^\mu\}), \varepsilon_p)$ , при  $l = 1, \dots, N_{sol}$ ,  $\mu = 1, \dots, \mu_{N_\mu}$ ,  $p = 1, \dots, N_e$ , где первая компонента – двухкомпонентный вектор, состоящий из интегрированного результата  $sol_l^u$  решения задачи  $prb^u$  на  $l$ -ом этапе и перечня использованных ЛПР знаний о том, как выполнять сравнение  $\{b_{ext}^\mu\}$ ,  $b_{ext}^\mu \in B_{ext}$ , а вторая компонента – вектор, элементы которого – координирующие воздействия  $e \in E$  для эксперта.

На  $N_{sol}$ -ом этапе ( $l = N_{sol}$ ) вектор координирующих воздействий  $\varepsilon = (e_1^\alpha, \dots, e_{N_{prt}}^\alpha)$ ,  $\alpha = 6$ , т.е. ЛПР не выдает координирующих воздействий экспертам, а только агрегирует (производит интеграцию решений подзадач  $prt^h$  в единое, интегрированное решение  $sol_l^u$  сложной задачи  $prb^u$ ) результаты их работы. Если полученный интегрированный результат  $sol_l^u$  не устраивает ЛПР, оно должно пересмотреть исходные

данные задачи  $prb^u$ , т.е. изменить  $DAT_l^h$  для всех  $prb^h$ , либо изменить перечень своих знаний  $B_{ext}$  и знаний экспертов  $B_{prof}$  (модели (3.16) и (3.15)), а после этого инициировать повторную работу СППР.

Соответствие  $\psi_5$  не является функцией (не может быть записано аналитически и вычислено), поскольку знания ЛПР и интегрированный результат решения задачи  $prb^u$  могут быть представлены на естественном языке. Оно однозначно, поскольку каждому эксперту назначается конкретное координирующее воздействие  $e_q^\alpha$  и поэтому соответствие  $\Psi_5$  однозначно определяет только один вектор  $\varepsilon \in E$ . Оно сюръективно, так как каждому вектору  $\varepsilon \in E$  соответствует хотя бы один элемент из  $\{sol_l^u\} \otimes B_{ext}$  и не инъективно, так как не каждому элементу из  $\{sol_l^u\} \otimes B_{ext}$  соответствует вектору  $\varepsilon \in E$ .

На рис. 3.3 изображен процесс решения сложной задачи с учетом координации.



Обозначения:

$T$  – общее время решения задачи  $prb^u$ ;  $t_1, \dots, t_{N_{sol}}$  – моменты начала планерок;

$t_0$  – момент завершения редукции сложной задачи  $prb^u$  и начала ее решения;

$DAT_l^{h,w}$  – исходные данные для  $l$ -го этапа, ( $l=1, \dots, N_{sol}$ ),  $w$ -ой подзадачи;

$prb_1^h, \dots, prb_{N_h}^h$  – подзадачи из состава сложной задачи  $prb^u$ ;

$B_{ext}$  и  $B_1^U, \dots, B_{N_{prt}}^U$  – знания ЛПР и экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$ , соответственно;

$e_q^\alpha \in E, \alpha=1..6$  – координирующее действие для эксперта  $q=1, \dots, N_{prt}$  на  $l$ -ом этапе;

$sol_l^{h,w}$  – результат решения задачи  $prb_l^h, l=1, \dots, N_{sol}, w=1, \dots, N_h, N_h=N_{prt}$

Рис. 3.3 – Модель процесса решения сложной задачи с учетом координации, как взаимодействие экспертов и ЛПР

На машиностроительных предприятиях координирующие воздействия формируются в ходе планерок. У планерки двоякий смысл: 1) получения ЛПР у эксперта промежуточного решения подзадачи; 2) интегра-

ции ЛПП результатов промежуточных этапов работы экспертов в единый результат и формирования координирующих воздействий каждому эксперту.

В настоящей работе принято, что: для экспертов планерка – это событие в некоторый момент времени; а для ЛПП – процесс. Процесс решения сложной задачи  $prb^u$  можно изобразить графически в виде зависимости промежуточных результатов решения задачи от времени опроса (рис. 3.4). Показанный на рис. 3.4 процесс планирования может быть отнесен к «идеальным», в том случае, если ЛПП не надо выдавать координирующих воздействий. Желаемые результаты для каждой планерки – это результаты, которые ЛПП ожидает после каждой планерки, т.е. это запланированные результаты. Если результаты ниже (хуже) запланированных – план не будет выполнен, а если выше (лучше) запланированных, возможны проблемы в следующем плановом периоде: перерасход ресурсов и затоваривание складов.

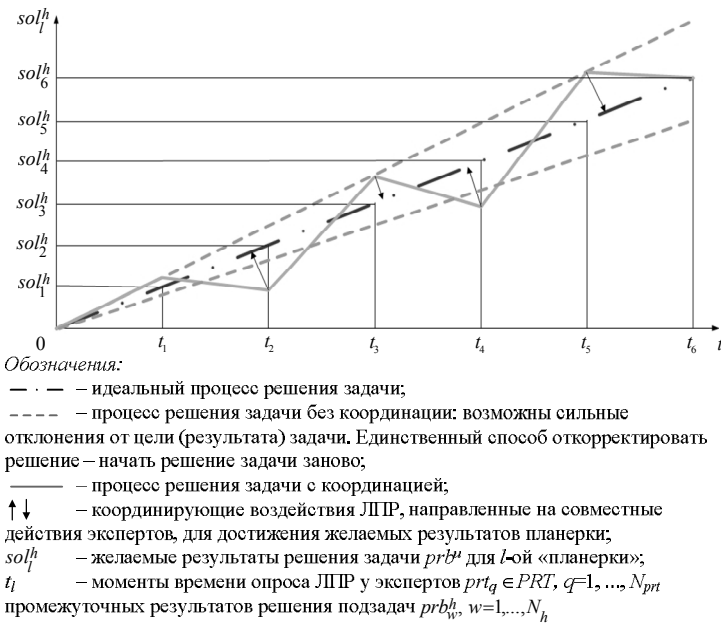


Рис. 3.4 – Процесс решения сложной задачи  $prb^u$  с координацией и без координации

Следует отметить, что чем меньше отклонения от идеального процесса решения, тем лучше. Поясним это на примере. Если в результате производства выполнен план, но потрачено больше ресурсов, чем нуж-



но (много брака), могут возникнуть проблемы в следующем плановом периоде (недостаточно ресурсов для производства). Таким образом, ЛПП при выполнении координации должен стремиться минимизировать отклонение.

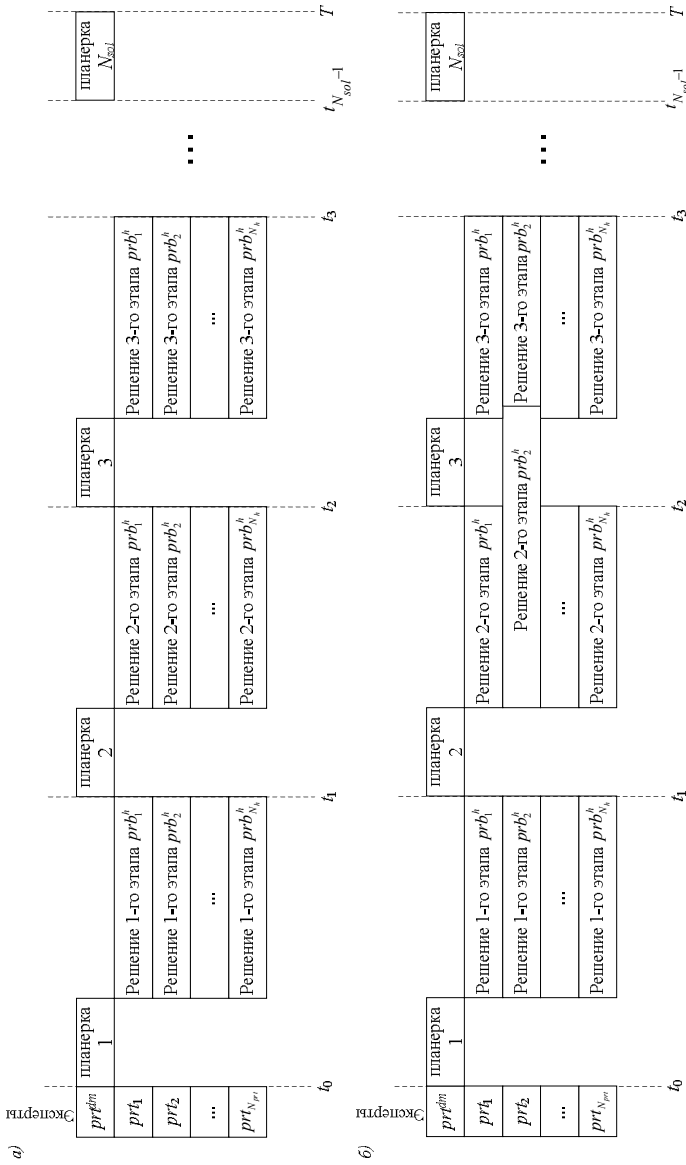
В реальных задачах планирования этапы работы экспертов могут быть не синхронизированы между собой. Если ЛПП запрашивает в ходе планерки у эксперта  $p_{rt}_q \in PRT$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$  результаты работы до получения очередного промежуточного результата, он сообщает результат, выработанный на предыдущей планерке.

Для представления ситуации, когда этапы работы экспертов не синхронизированы, предпочтительны диаграммы Ганта [165, 166]. На рис. 3.5,а представлена ситуация, когда все эксперты успевают предоставить результаты текущего этапа решения подзадачи к очередной планерке, а на рис. 3.5,б – ситуация, когда не все эксперты успевают сделать это. В этом случае эксперт может предоставить на планерку только результат предыдущего этапа. Выбор, есть или нет готовый промежуточный результат решения подзадачи  $prb_w^h$ ,  $w = 1, \dots, N_h$  эксперт  $p_{rt}_q \in PRT$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$  принимает на основе опыта  $B_{prec}$  (3.15).

Анализ вышеописанной модели КСППР с координацией позволяет сделать следующий вывод. При решении сложной задачи предлагаемая КСППР, в отличие традиционных, даже при неверно начатом экспертами процессе решении подзадач  $prb^h$  за счет самоорганизации, выраженной в координации подзадач ЛПП, будет стремиться к идеальному процессу решения сложной задачи, что увеличивает эффективность нахождения приемлемого результата решения сложной задачи  $prb^u$ . При этом ошибки решения сложной задачи будут обнаружены и исправлены до получения результата решения сложной задачи  $prb^u$ . Ранее для этого требовалось ее повторное решение.

### 3.3 Алгоритм координации в системах поддержки принятия решений

Предлагаемый алгоритм моделирует самоорганизацию в СППР по принципу «как есть» (лат. ad hoc) и относится к алгоритмам, основанным на знаниях, где акцент смещается от использования формализованной математической схемы к извлечению и рассуждениям с применением профессиональных знаний [112].



Обозначения:

$T$  – общее время решения задачи  $pr_1^h, t_0$  – момент завершения решения задачи  $pr_1^h$  и начала ее решения,  $t_1, \dots, t_{N_{sol}}$  – моменты начала планерок

Рис. 3.5 – Описание последовательности решения сложной задачи диаграммой Ганта:

а) все эксперты успевают дать результаты очередного этапа к планерке;

б) не все эксперты успевают выдать результаты очередного этапа к планерке

Для разработки алгоритма профессиональные знания были извлечены на примере СППР машиностроительного предприятия с мелкосерийным характером производства. Базы знаний ЛПР  $B_{ext}$ , экспертов  $B_1^U$ ,  $B_2^U$  и оболочка экспертных систем описаны в разд. 3.5. Для имитации рассуждений ЛПР и экспертов используется прямой вывод – от исходных данных-фактов, применяя правила, происходит переход к новым фактам. Процесс заканчивается, когда не остается не обработанных фактов и не использованных правил.

Приведенный ниже алгоритм, имитирует рассуждения в СППР последовательности заседаний (планерок) относительно модельного времени. При этом линии рассуждений экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  координируются ЛПР  $prt^{dm}$ . Полученные экспертами  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  после каждой итерации  $l$  (планерки) решения частных подзадач  $prb_w^h$ ,  $w=1, \dots, N_h$  передаются ЛПР  $prt^{dm}$  как исходные данные  $DAT^{hk}$  для задачи координации  $prb^k$  ( $k$ -задачи). Решив задачу координации  $prb^k$ , ЛПР выдает координирующие воздействия  $E = \{e_1^\alpha, \dots, e_{N_{prt}}^\alpha\}$  каждому из экспертов. Координирующие воздействия в совокупности с первоначально известными после декомпозиции данными  $DAT^h$ , служат исходными данными  $DAT^{h,l}$  для решаемых экспертами подзадач  $prb_w^h$ ,  $w=1, \dots, N_h$  на следующей  $l+1$  итерации (планерке).

*Дано:* СППР с  $N_{prt}$  экспертами и ЛПР, число планерок  $N_{sol}$ . Установлено однозначное соответствие  $\psi_6 : OUT^{h,1} \cup \dots \cup OUT^{h,N_h} \rightarrow IN^{hk}$  выходных параметров  $OUT^{hw} = \{out_1^{hw}, \dots, out_m^{hw}\}$  подзадач  $prb_w^h$ ,  $w=1, \dots, N_h$  и входных параметров  $IN^{hk} = \{in_1^{hk}, \dots, in_n^{hk}\}$  задачи координации  $prb^k$ . Установлено однозначное соответствие  $\psi_7 : OUT^{hk} \rightarrow IN^{h,1} \cup \dots \cup IN^{h,N_h}$  между выходными параметрами  $OUT^{hk} = \{out_1^{hk}, \dots, out_m^{hk}\}$  задачи координации  $prb^k$  и входными параметрами  $IN^{hw} = \{in_1^{hw}, \dots, in_n^{hw}\}$  подзадач  $prb_w^h$ ,  $w=1, \dots, N_h$ . Соответствия  $\psi_6$  и  $\psi_7$  сюръективны и инъективны.

*Найти:* результаты решения (выходные параметры) подзадач  $prb_w^h$ ,  $w=1, \dots, N_h$  экспертами  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  с учетом координации.

*Обозначения:*  $B_q^U$ ,  $q=1, \dots, N_{prt}$  – базы знаний экспертов;  $B_{ext}$  – база знаний ЛПР;  $B_{facts,q}$  – базы фактов экспертов;  $B_{facts,dm}$  – база фактов ЛПР;  $l$  – счетчик планерок;  $q$  – счетчик экспертов;  $Run(B_{facts}, B)$  – процедура имитации рассуждений ЛПР или экспертов – для ЛПР  $B_{facts} = B_{facts,dm}$ ,  $B = B_{ext}$ , для экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  соответствен-

но  $B_{facts} = B_{facts\ q}$ ,  $B = B_q^U$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$ ;  $Search(B)$  – процедура просмотр правил из базы знаний  $B$  и сопоставление фактов с образцами, с целью определения множества правил, которые могут быть активированы – для ЛПР  $B = B_{ext}$ , для экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  соответственно  $B = B_q^U$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$ ;  $Conf$  – процедура разрешения конфликтов в «плане решения» (англ. *Agenda*) экспертной системы, когда возникает необходимость выбора между несколькими правилами из базы знаний  $B$  для продолжения рассуждений (метод разрешения конфликтов – «первый в *Agenda*»);  $Execute$  – процедура применения найденных правил для продолжения рассуждений, т.е. выполнения действий указанных в правой части выбранных правил.

В итоге алгоритм организации процесса координации в СППР можно описать следующим образом.

Алгоритм 3.1:

- 1)  $l = 0$ ;
- 2)  $q = 0$ ;
- 3) Заполнить  $B_q^U$  с учетом  $(in_1^{h\ q}, \dots, in_n^{h\ q})$  и счетчика планерок  $l$ ;
- 4)  $Run(B_{facts\ q}, B_q^U)$ :
  - 4.1)  $Search(B_q^U)$ ;
  - 4.2)  $Conf$ ;
  - 4.3)  $Execute$ ;
  - 4.4) Если для продолжения рассуждений не выбрано ни одно из правил, то закончить имитацию рассуждений и перейти к п. 5, иначе к п. 4.1;
- 5) Присвоить  $(out_1^{h\ q}, \dots, out_m^{h\ q})$  значения из фактов-результатов рассуждений эксперта  $q$ ;
- 6) Присвоить, используя  $\psi_6$ , соответствующим входным параметрам  $(in_1^{h\ k}, \dots, in_n^{h\ k})$  задачи координации  $prb^k$  значения выходных параметров  $(out_1^{h\ q}, \dots, out_m^{h\ q})$  задачи  $prb_q^h$ ;
- 7) Если  $q < N_{prt} + 1$ , то  $q = q + 1$  и перейти к п. 3. Иначе перейти к п. 8;
- 8) Заполнить  $B_{facts\ dm}$  с учетом значений входных параметров  $(in_1^{h\ k}, \dots, in_n^{h\ k})$  задачи координации  $prb^k$  и счетчика планерок  $l$ ;
- 9)  $Run(B_{facts\ dm}, B_{ext})$ :
  - 9.1)  $Search(B_{ext})$ ;
  - 9.2)  $Conf$ ;
  - 9.3)  $Execute$ ;

9.4) Если для продолжения рассуждений не выбрано ни одно из правил, то закончить имитацию рассуждений и перейти к п. 10, иначе к п. 9.1;

10) Присвоить  $(out_1^{hk}, \dots, out_m^{hk})$  задачи координации  $prb^k$  значения из фактов-результатов рассуждений ЛПР;

11) Присвоить, используя  $\psi_7$ , соответствующим входным параметрам  $(in_1^{hq}, \dots, in_n^{hq})$  подзадач  $prb_q^h, q = 1, \dots, N_h$  значения выходных параметров задачи координации  $prb^k$ ;

12) Если  $l < N_{sol}$ , то  $l = l + 1$  и перейти к п. 2. Иначе перейти к п. 13;

13) Вывести значения выходных параметров подзадач, полученные на  $l$  планерке:

13.1)  $q = 1$ ;

13.2) Печать  $(out_1^{hq}, \dots, out_m^{hq})$ ;

13.3) Если  $q < N_{prt} + 1$ , то  $q = q + 1$  и перейти к п. 13.2, иначе перейти к п. 14;

14) Конец.

Разработанный алгоритм обладает всеми необходимыми свойствами:

1) Дискретность (прерывность, раздельность) – алгоритм представляет процесс координации как последовательное выполнение простых шагов. Каждое действие, предусмотренное алгоритмом, исполняется только после того, как закончилось исполнение предыдущего.

2) Определенность – каждое действие алгоритма четкое и однозначное.

3) Результативность (конечность, сходимоть) – алгоритм приводит к решению задачи за конечное число итераций. Внешний цикл (имитация планерки) выполняется не более  $l - 1$  раз. Вложенные циклы (имитация рассуждений каждого эксперта) и цикл вывода результатов решения  $SOL_1^h, \dots, SOL_{N_h}^h$  подзадач  $prb_q^h, q = 1, \dots, N_h$  выполняются не более  $N_h$  раз. Таким образом, алгоритм будет выполнен за конечное число шагов и обладает сходимостью.

4) Массовость – алгоритм координации разработан в общем виде, т.е. применим для сложных задач  $prb^u$  оперативно-производственного планирования, различающихся только исходными данными  $DAT^u$ .

В случае если в результате имитации рассуждений экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  или ЛПР  $prt^{dm}$  не могут быть выведены факты, необходимые для спецификации выходных параметров  $(out_1^{hq}, \dots, out_m^{hq})$  решаемых подзадач  $prb_q^h, q = 1, \dots, N_h$ , то используются значения по умолчанию, извлеченные у экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  и ЛПР  $prt^{dm}$  при разра-

ботке конкретной информационно-вычислительной системы. Например, если начальник отдела материально-технического снабжения не может на основании имеющихся данных однозначно ответить на вопрос о результатах ее решения, то ему проще сказать, что задача не будет решена. Такой результат и будет считаться значением по умолчанию.

Существенное отличие базы фактов  $B_{facts\ dm}$  ЛПП  $prt^{dm}$  от баз фактов  $B_{facts\ q}$ ,  $q = 1, \dots, N_{prt}$  экспертов  $prt_1, \dots, prt_{N_{prt}}$  заключается в том, что в ней происходит интеграция результатов решения подзадач экспертами:

$$OUT^{h\ 1} \cup \dots \cup OUT^{h\ N_k} \rightarrow IN^{h\ k}. \quad (3.22)$$

Эта интеграция основана на причинно-следственных связях, частично-формализованных продукционными правилами и представленными базой профессиональных знаний ЛПП, о качестве которых можно судить исключительно по результатам проведенной апробации. Для таких экспериментов разработан программный продукт «Гибридная система планирования».

Используемые в алгоритме профессиональные знания ЛПП – связующая основа для знаний экспертов, поскольку без знаний ЛПП, знания отдельных экспертов будут описывать лишь отдельные части сложной задачи и не позволят отобразить целостную картину. При этом сами знания ЛПП не несут какой-либо смысловой нагрузки в отрыве от знаний экспертов. Таким образом, алгоритм координации, связывая знания ЛПП и экспертов, решает проблему эмерджентности СППР, т.е. невозможность ее работы по частям. А циклическая координация ЛПП рассуждений экспертов над подзадачами позволяет моделировать самоорганизацию, присущую реальным СППР.

### **3.4 Модель функциональной гибридной интеллектуальной системы с координацией**

В качестве базисной при построении ФГиИС для решения задачи оперативно-производственного планирования принята приведенная в [5] модель функциональной крупнозернистой ГиИС. Выбор этой модели объясняется тем, что сложность решаемых однородных задач не велика – сравнительно мало входных и выходных параметров и экспертных правил, в связи с чем нет необходимости исследовать микроуровень подзадач. Данный вывод сделан на основе системного анализа задачи оперативно-производственного планирования, результаты которого представлены в [127]. Также можно отметить, что декомпозиция

сложной задачи прозрачна, а установление связи между подзадачами и элементами ГиИС несложно.

В [5] приведена следующая концептуальная модель крупнозернистой ФГиИС, с использованием автоматного подхода [167 – 169], предназначенной для решения сложной задачи  $prb^u$  :

$$\begin{aligned}
 res_A^u &= R_1^{res\ met} (res_A^u, met^u) \circ R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{ui}) \circ R_1^{res\ pr} (res_A^u, pr^{uo}) \circ \\
 \circ R_1^{res\ st} (res_A^u, st^u) \circ R_1^{st\ st} (st^u(t), st^u(t+1)) \circ R_1^{pr\ st} (pr^{ui}(t), st^u(t+1)) \circ \\
 \circ R_1^{st\ pr} (st^{up}(t), pr^{uo}(t)) \circ R_1^{res\ res} (RES^{\circ}, RES^{\circ}) \circ R_1^{pr\ pr} (pr^{ui}, PR^{si}) \circ \\
 \circ R_2^{pr\ pr} (PR^{\circ o}, pr^{uo}),
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

где  $t$  – модельное время,  $t \in \mathbb{N}$ ;  $\circ$  – знак конкатенации;  $res_A^u$  – агрегат ГиИС как ресурс решения неоднородной задачи;  $met^u$  – интегрированный метод решения неоднородной задачи;  $pr^{ui}$  – исходные данные  $DAT^u$  [5] сложной задачи  $prb^u$ , передаваемые на вход одного или нескольких элементов  $res^{\circ}$ , построенных по схеме (3.24) в соответствии с декомпозицией  $\widehat{prb}^u$  задачи  $prb^u$ ;  $pr^{uo}$  – выход одного или нескольких элементов  $res^{\circ}$ , построенных по схеме (3.24) в соответствии с  $\widehat{prb}^u$ , являющийся целью  $GL^u$  решения задачи  $prb^u$ ;  $st^u(t)$  – состояние ГиИС в момент времени  $t$ ;  $RES^{\circ}$  – непустое множество, составленное из элементов  $res^{\circ}$ , построенных в соответствии со схемой (3.24);  $PR^{si}$ ,  $PR^{\circ o}$  – множества свойств «вход» и «выход» элементов из  $RES^{\circ}$  соответственно;  $R_1^{st\ st}$ ,  $R_1^{pr\ st}$ ,  $R_1^{st\ pr}$  – отношения функционирования ГиИС;  $R_1^{res\ res}$  – отношения интеграции [5] элементов;  $R_1^{pr\ pr}$  – отношения между входами ГиИС и входами элементов;  $R_2^{pr\ pr}$  – отношения между выходами элементов и выходами ГиИС. Элемент  $res^{\circ}$  моделирует решение однородной подзадачи или выполняет вспомогательные операции, строится в соответствии с автономным методом  $met^{\circ}$  и имеет свойства  $PR^{\circ} \subseteq PR$ , наиболее важные из которых – «вход»  $pr^{si}$ , «выход»  $pr^{\circ o}$  и «состояние»  $st^{\circ}$ .

Концептуальная модель элемента ГиИС:

$$\begin{aligned}
 res^{\circ} &= R_1^{res\ met} (res^{\circ}, met^{\circ}) \circ R_1^{res\ pr} (res^{\circ}, pr^{si}) \circ R_1^{res\ pr} (res^{\circ}, pr^{\circ o}) \circ \\
 \circ R_1^{res\ st} (res^{\circ}, st^{\circ}) \circ R_1^{st\ st} (st^{\circ}(t), st^{\circ}(t+1)) \circ R_1^{pr\ st} (pr^{si}(t), st^{\circ}(t+1)) \circ \\
 \circ R_1^{st\ pr} (st^{\circ}(t), pr^{\circ o}(t)),
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

где  $R_1^{st}$ ,  $R_1^{pr}$ ,  $R_1^{st pr}$  – отношения «состояние – состояние», «вход – состояние», «состояние – выход», соответственно. Среди множества  $MET^3 = \{met_y^3 \mid y = 1, \dots, N_{met}\}$  автономных методов будем выделять  $met_1^3$  – аналитические вычисления,  $met_2^3$  – нейровычисления,  $met_3^3$  – нечеткие вычисления,  $met_4^3$  – рассуждения на основе опыта;  $met_5^3$  – эволюционные вычисления,  $met_6^3$  – статистические вычисления,  $met_7^3$  – логические рассуждения. В случае если между элементом  $res^3$  и автономным методом  $met_y^3$  установлено отношение  $R_1^{res met}(res^3, met_y^3)$ , будем обозначать элемент  $res^{3y}$ .

Отношения  $R_1^{pr pr}$ ,  $R_2^{pr pr}$  в (3.23) задаются на множествах переменных  $DAT^u$ ,  $GL^u$  и множествах переменных  $DAT^h$ ,  $GL^h$  подзадач, входящих в состав сложной задачи. В [5] приводится три возможных случая: 1) множество переменных для  $prb^u$  совпадает с множеством переменных для  $prb^h$ , т.е.  $DAT^u = DAT^h$ ,  $GL^u = GL^h$ ; 2) множество переменных для  $prb^h$  – подмножество соответствующего множества  $prb^u$ , т.е.  $DAT^h \subset DAT^u$ ,  $GL^h \subset GL^u$ ; 3) множество переменных подмножество соответствующего множества  $prb^h$ , т.е.  $DAT^u \subset DAT^h$ ,  $GL^u \subset GL^h$ . Для рассматриваемой сложной задачи оперативно-производственного планирования характерен второй вариант, так как в ходе решения сложной задачи происходит разделение исходных данных между различными подзадачами [127]. Поскольку для моделирования использован автоматный подход, на состояние автомата влияет только входной сигнал. Выходной сигнал зависит от состояния автомата в предыдущий момент автоматного времени и входного сигнала.

Расширение модели (3.23), (3.24) выполнено, исходя из следующих посылок. В процессе координации контролируются промежуточные состояния решения подзадач [113]. В принятых обозначениях (3.23), (3.24) под этими состояниями понимаются состояния (результаты решения) функциональных элементов  $res^3$ , имитирующих решение подзадач  $prb^h$ . На основании анализа этих состояний в ходе координации изменяются свойства «вход»  $pr^{3i}$  одного или нескольких элементов  $res^3$ . Для учета этого факта введем в концептуальную модель крупнозернистой ФГИС (3.23), (3.24) тройку  $R_1^{st pr}(st^u(t), pr^{3i}(t+1))$ . Иными словами, на основании состояния ФГИС  $st^u(t)$  в момент времени  $t$  меняются исходные данные  $pr^{3i}(t+1)$  для ФГИС, но уже в момент времени



$t+1$ , т.е. для следующей итерации. Множество  $R_1^{st\ pr}$  устанавливает отношения между состоянием  $st^u(t)$  гибрида  $res_A^u$  (3.23) на данный момент модельного времени  $t$  и состоянием входов одного или нескольких элементов  $res^3$  на следующем шаге. Чтобы произвести необходимое изменение входов  $pr^{3i}$  одного или нескольких функциональных элементов  $res^3$  в (3.24) введем тройку  $R_1^{st\ act}(st^u, act^{3k})$ , где  $ACT^{3k} = \{act_1^{3k\ \alpha}, \dots, act_{N_{pr}}^{3k\ \alpha}\}$  – множество понятий, обозначающих координирующие действия, которое тождественно множеству координирующих действий  $E$  (3.6), где  $\alpha$  – тип координирующего воздействия,  $\alpha = 1, \dots, 6$ . В алгоритме координации координирующие действия описаны в базе знаний  $B_{ext}$ . Множество  $R_1^{st\ act}$  – множество отношений между состоянием  $st^u$  ФГиИС  $res_A^u$  в момент модельного времени  $t$  и необходимыми координирующими действиями  $ACT^{3k}$ .

Модифицированная концептуальная модель для спецификации крупнозернистых ФГиИС с координацией:

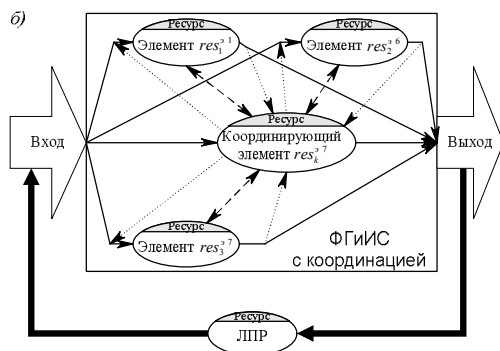
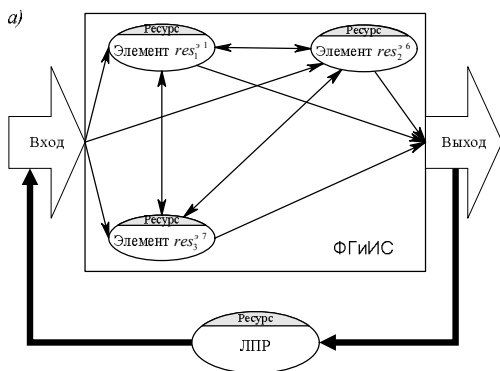
$$res_A^u = res_A^u \circ R_1^{st\ pr}(st^u(t), pr^{3i}(t+1)), \quad (3.25)$$

а модифицированная модель элемента ГиИС:

$$res^3 = res^3 \circ R_1^{st\ act}(st^u, act^{3k}). \quad (3.26)$$

Отношения  $R_1^{st\ pr}$  и  $R_1^{st\ act}$  не задаются заранее, как и  $R_1^{st\ st}$ ,  $R_1^{pr\ st}$ ,  $R_1^{st\ pr}$ , фиксируются в ходе работы ФГиИС и являются результатом решения  $k$ -задачи  $prb^k$  (3.13).

Рассмотрим пример ФГиИС из трех элементов  $res_1^{3\ 1}$ ,  $res_2^{3\ 6}$ ,  $res_3^{3\ 7}$ , для решения подзадач, которые будем называть функциональными [5], и одного координирующего (технологического) элемента  $res_k^{3\ 7}$  для решения  $k$ -задачи, определяющий порядок взаимодействия функциональных элементов. На вход ФГиИС подаются исходные данные  $DAT^u$ , разделенные между функциональными элементами согласно декомпозиции  $\widehat{prb}^u \in \widehat{PRB}^u$  сложной задачи  $prb^u$ . На выходе имеем результаты работы функциональных элементов  $res_1^{3\ 1}$ ,  $res_2^{3\ 6}$ ,  $res_3^{3\ 7}$ , интегрированных в общее решение  $SOL^u$  сложной задачи  $prb^u$ .



Обозначения:

..... - отношения координации, ----> - отношения порядка,  
 —> - отношения передачи информации,

—> - прямая и обратная связь между ФГИИС и ЛПР

Рис. 3.6 – Структурная схема ФГИИС:

а) без координации; б) с координацией

сложной задачи и на основании своих оценок по каналу прямой связи вносит изменения во входные данные  $DAT^u$  и условия  $MET^u$  задачи  $prb^u$  [5]. Далее ЛПР инициирует синтез ФГИИС и повторное решение.

На рис. 3.6,б изображена принципиально иная структурная схема ФГИИС. Ее отличие от выше приведенной заключается в том, что координирующий элемент  $res_k^{\alpha}$  определяет не только порядок работы функциональных элементов и обмен информации между ними, но и в соответствии с (3.25), (3.26), итерационно, на основании состояния всех функциональных элементов корректирует для каждого из них входной набор данных  $DAT^h$  и условий  $MET^h$ . Таким образом, в (3.25), (3.26) часть функций ЛПР передается технологическому элементу, что отражено на рис. 3.6,б изменением размеров структурных блоков ЛПР и

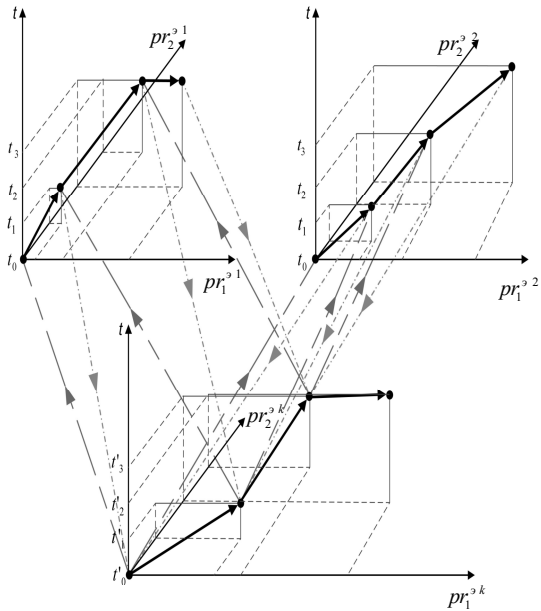
На рис. 3.6,а представлена структурная схема ФГИИС, построенная для решения сложной задачи в соответствии с (3.23), (3.24). При этом моделируется только логически увязанная последовательность решения подзадач  $prb^h$  из декомпозиции  $\widehat{prb}^u$  сложной задачи  $prb^u$ , что соответствует модели сложной задачи на рис. 3.6,а. Данная схема соответствует ситуации, когда выполненная агрегация решений подзадач в общее единое решение дает, с точки зрения ЛПР, ошибочный результат и требует повторного решения задачи. В этом случае по каналу обратной связи ЛПР получает от компьютерной СППР результат решение

технологического элемента, а также толщины линий прямой и обратной связи в контуре управления. В представленной на рис. 3.6,б структурной схеме ЛПР по каналу обратной связи получает от компьютерной СППР результат решения сложной задачи. Если решение не устраивает ЛПР, например, влечет затоваривание складов, увеличение стоимости производимых изделий, то оно вмешивается в обсуждение и меняет условия координации  $MET^{h,k}$ , т.е. модель задачи-координатора (3.13). Далее ЛПР инициирует новый синтез ГиИС и повторное решение сложной задачи.

На рис. 3.7 дан пример работы ФГиИС с координацией (3.25), (3.26), для двух функциональных элементов  $res_1^{3,1}$ ,  $res_2^{3,7}$  одного технологического элемента  $res_k^{3,7}$  и двух переменных  $pr_1^3$ ,  $pr_2^3$  для каждого элемента. Точками на данном рисунке обозначено состояние функционального элемента в соответствующем подпространстве состояний в момент времени  $t_l$ , определяемый по формуле:

$$t_l = t_0 + \tau \cdot l + \tau', \quad (3.27)$$

где  $l=1, \dots, N_{sol}-1$ ;  $\tau$  – период, через который проверяются решения задач-элементов, иными словами – через период  $\tau$  переход к следующему этапу решения задач-элементов;  $t_0$  – момент завершения редук-



Обозначения:

- $\longrightarrow$  – переход из подпространства состояний координирующего элемента в подпространство состояний функциональных элементов;
- $\dashrightarrow$  – переход из подпространства состояний функциональных элементов в подпространство состояний координирующего элемента;
- $\longrightarrow$  – переход между состояниями внутри подпространства

Рис. 3.7 – Графическое представление работы ФГиИС в гетерогенном пространстве состояний

ции сложной задачи  $prb^u$  и начала ее решение;  $\tau'$  – время, отводимое на работу технологического элемента (время на планерку);  $N_{sol}$  – общее количество этапов.

Моменты времени смены состояния технологического элемента (на рис. 3.7 обозначены  $t'_l$ ), определяются следующим образом:

$$t'_l = t_0 + \tau \cdot l, \quad l = 1, \dots, N_{sol}. \quad (3.28)$$

Соединительные линии (штриховая и штрихпунктирная) между тремя подпространствами состояний обозначают передачу информации в ФГиИС от одного элемента к другому и имитируют переход от рассуждений одного эксперта к рассуждениям другого, от рассуждений ЛПР к рассуждениям экспертов и в обратном направлении.

В каждый момент времени  $t_l$  фиксируется (опрашивается) состояния всех  $res_q^{3y}$ . После этого  $res_k^{37}$  на основании состояния  $st^u(t_l)$  ФГиИС выдает координирующее воздействие  $act_q^{3k\alpha} \in ACT^{3k}$  для каждого элемента  $res_q^{3y}$ . В процессе обработки технологическим элементом  $res_k^{37}$  состояния  $st^u(t_l)$  ФГиИС, т.е. решения  $k$ -задачи  $prb^k$  изменяется состояние  $st^{3k}$  технологического элемента  $res_k^{37}$ . Причем время  $\tau'$ , отводимое на такую обработку не должно превышать периода, через который производится фиксация состояния ФГиИС:

$$\tau' \leq T / N_{sol}, \quad (3.29)$$

где  $T$  – время, отведенное на решения сложной задачи  $prb^u$ ;  $N_{sol}$  – общее количество этапов. Переходы между состояниями функциональных элементов происходят скачкообразно, поскольку между моментами времени  $t_l$  состояние  $res_q^{3y}$  не изменяется. Таким образом, каждая точка подпространства состояний для каждого функционального элемента  $res_q^{3y}$  на рис. 3.7 – состояние в конкретный момент времени  $t_l$ , единый для всех элементов  $res_q^{3y}$ . Когда  $t_l = T$ , выдается результат  $GL^u$  решения задачи  $prb^u$ .

Ниже представлена концептуальная модель работы ФГиИС, построенной по (3.25), (3.26):

$$\begin{aligned}
st^{\alpha k}(t'_0) &\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t_0) \\ st^{\alpha 2}(t_0) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t_1) \\ st^{\alpha 2}(t_1) \end{array} \right\} \Rightarrow st^{\alpha k}(t'_0) \rightarrow st^{\alpha k}(t'_1) \Rightarrow \\
&\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t_1) \\ st^{\alpha 2}(t_1) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t_2) \\ st^{\alpha 2}(t_2) \end{array} \right\} \Rightarrow st^{\alpha k}(t'_1) \rightarrow st^{\alpha k}(t'_2) \Rightarrow \dots \Rightarrow \\
&\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t_{p-1}) \\ st^{\alpha 2}(t_{p-1}) \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t_p) \\ st^{\alpha 2}(t_p) \end{array} \right\} \Rightarrow st^{\alpha k}(t'_{p-1}) \rightarrow st^{\alpha k}(t'_p),
\end{aligned} \tag{3.30}$$

где « $\Leftrightarrow$ » обозначают отношения  $R^{st}$ , которые связывают состояния из разных подпространств и задают переход из одного однородного пространства в другие при функционировании ФГИИС; « $\rightarrow$ » – переход между состояниями внутри соответствующего подпространства. Переходы « $\Leftrightarrow$ » из подпространства технологического элемента  $res_k^{\alpha 7}$  моделируют выдачу координирующих воздействий от ЛПР к экспертам. А совокупность переходов « $\Leftrightarrow$ » и « $\rightarrow$ » позволяет смоделировать и проследить процесс самоорганизации в процессе работы ФГИИС.

В (3.30) фигурные скобки обозначают начало и завершение параллельной работы функциональных элементов. Из модели видно, что после каждой фиксации « $\{ \} \Rightarrow$ » состояний, функциональных элементов  $res_q^{\alpha y}$  происходит передача управления технологическому элементу  $res_k^{\alpha 7}$ , а после смены им своего состояния происходит передача управления группе функциональных элементов.

Данная модель родственна концептуальной модели [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} st^{\alpha 1}(t) \rightarrow st^{\alpha 1}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow st^{\alpha 1}(t+n) \\ st^{\alpha 2}(t) \rightarrow st^{\alpha 2}(t+1) \rightarrow \dots \rightarrow st^{\alpha 2}(t+n) \end{array} \right\}. \tag{3.31}$$

В основе модели (3.31) лежит идея о том, что одна и та же однородная задача может решаться параллельно различными функциональными элементами. Отношения интеграции элементов возникают как внутренние невербальные образы в памяти пользователя, который может сравнивать динамику моделирования сложной задачи с разных точек зрения, что позволяет увидеть, то, чего не дает моделирование с использованием одной модели. В модели (3.30) развито иное предположение: включение в компьютерную модель СППР модели ЛПР приводит к возникновению эффекта самоорганизации. При этом появляется возможность взаимоувязать результаты работы отдельных функциональных элементов КСППР в процессе синтеза решения сложной задачи, а не после, как в известных моделях, что обеспечивает релевантность КСППР реальному процессу коллективного осуждения проблем.

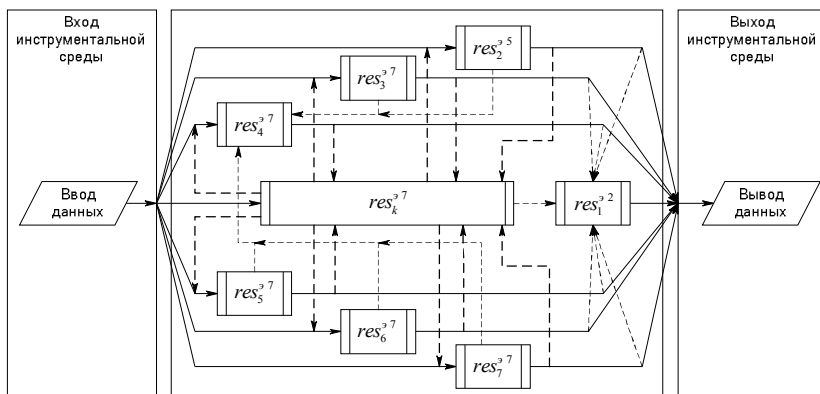
В табл. 3.1 приведен состав гетерогенного модельного поля и методы представления моделей.

Таблица 3.1 – Модели входящие в гетерогенное модельное поле.

Модель	Класс модели и её характеристики	Реализация
НС	Искусственная нейронная сеть (поиск скрытых зависимостей в статистических данных и прогнозирование выполнения плана) – функциональный элемент $res_1^{2,2}$ ИНС с прямым распространением сигнала. Передаточная функция нейрона: сигмоида. Количество входов в ходе экспериментов варьировалось от 3 до 30, а выходов от 1 до 10. Количество скрытых нейронов от 1 до 8. ИНС обучается каждый месяц, для изделий, планируемых к изготовлению. Передаточная функция нейрона: сигмоида. Обучение: алгоритм обратного распространения ошибки. Средняя ошибка обучения – 11%. Обучающая последовательность - 60 образцов	Авторский алгоритм, написанный на языке программирования VB.NET. Алгоритм обучение ИНС реализован на основе метода градиентного спуска. Общий объём кода 400 строк
ГА	Классический ГА для решения задачи оптимизации для определения максимально возможного количества изделий, которые можно изготовить из имеющихся материалов – функциональный элемент $res_2^{3,5}$ . Популяция из 100 хромосом. Эволюция: кроссовер и мутации. Селекция: комбинация панмиксии и ранжирования. Приспособленность (в %) – отношение затраченного на производство материала, к имеющемуся. Если длительное время приспособленность менее 50%, половина популяции уничтожается и генерируется заново. Если десять поколений приспособляемость не меняется, но более 92 %, тогда наилучшая особь – решение	Авторский алгоритм, написанный на языке программирования VB.NET Реализован алгоритм визуализации Объём кода 600 строк
ЭС	Пять экспертных систем (имитируют линии рассуждения экспертов) – функциональные элементы $res_3^{2,7}$ , $res_4^{2,7}$ , $res_5^{2,7}$ , $res_6^{2,7}$ , $res_7^{2,7}$ ; одна экспертная система имитирует рассуждения ЛПР – технологический элемент $res_k^{2,7}$ Продукционная модель знаний для поиска решающего подграфа на графе И/ИЛИ. Рассуждения в прямом направлении. Размеры баз знаний функциональных элементов – 6 – 48 продуктов, а технологического элемента – 15 продуктов. Базы фактов - до 15 фактов. Знания у экспертов и ЛПР извлекались протокольным анализом	Экспертные системы построены на базе программного продукта Visual Rule Studio. Используется прямой вывод

Разработанный в этом и предыдущих разделах третьей главы теоретический базис положен в основу инструментальной среды «Гибридная система планирования», структурно-функциональная схема, которой

представлена на рис. 3.8. В табл. 3.2 приведен состав функциональных элементов инструментальной среды и методы их представления [114, 115] (верхний правый индекс обозначает базовые классы методов ФГи-ИС [5], а нижний правый индекс – порядковый номер подзадачи).



Обозначения: — — — — прямая и обратная связь между технологическим элементом и функциональными элементами; - - - - передача информации между элементами; — — — — ввод информации и вывод результатов

Рис. 3.8 – Структурно-функциональная схема инструментальной среды

Таблица 3.2 – Состав инструментальной среды

Обозначение элемента	Назначение элемента и методы представления	Код модели	Код подзадачи
$res_1^{3,2}$	Подзадача 1 – «Прогнозирование результатов выполнения оперативного графика»; решается НС	НС	ПРГ1
$res_2^{3,5}$	Подзадача 2 – «Оптимизация количества выпускаемой продукции»; решается ГА	ГА	ОПГ1
$res_3^{3,7}$	Подзадача 3 – «Анализ соответствия имеющихся ресурсов требованиям КД по обеспечению выполнения плана производства»; решается ЭС	ЭС1	АНЛ1
$res_4^{3,7}$	Подзадача 4 – «Анализ соответствия имеющихся ресурсов требованиям ТД по обеспечению выполнения плана производства»; решается ЭС	ЭС2	АНЛ2
$res_5^{3,7}$	Подзадача 5 – «Учет, контроль и регулирование обеспечением материальными ресурсами»; решается ЭС	ЭС3	АНЛ3
$res_6^{3,7}$	Подзадача 6 – «Планирование и контроль выполнения ремонтных работ»; решается ЭС	ЭС4	АНЛ4
$res_7^{3,7}$	Подзадача 7 – «Планирование и контроль оплаты заказов»; решается ЭС	ЭС5	АНЛ5
$res_k^{3,7}$	Подзадача 8 – Технологический элемент решает $k$ -задачу методами ЭС	ЭС6	КОР1

Схема инструментальной среды (рис. 3.8) реализована на основе модели (3.30), и аналогична структурной схеме ФГиИС на рис. 3.6. Прямые и обратные связи (жирный пунктир) на рис. 3.8 между технологи-

ческим и функциональными элементами обозначают передачу промежуточных результатов решения подзадач  $prb^h \in PRB^h$  и получение функциональным элементом  $res_q^s$ ,  $q = 1, \dots, 7$  координирующего воздействия  $e \in E$ . Порядок работы функциональных элементов определяется декомпозицией  $\widehat{prb}^u$  сложной задачи  $prb^u$  и рекомендациями экспертов.

Детальное описание автономных моделей из табл. 3.2 представлено в [127].

### **3.5 Решение сложной задачи оперативно-производственного планирования с координацией в инструментальной среде «Гибридная система планирования»**

С целью проведения экспериментов и практического подтверждения теоретических разработок и выводов из разд. 3.1 – 3.4 исследована задача оперативно-производственного планирования на ООО завод «Калининградгазавтоматика» [170], и создана «Автоматизированная система для решения задачи оперативного планирования производством на ООО завод «Калининградгазавтоматика»».

Обследование предприятия показало, что для принятия решения задачи ОПП используются административные механизмы, последствия которых оцениваются грубо, из опыта отдельных экспертов. Единственный на данный момент способ решения задачи ОПП – ежедневные планерки. При решении задачи ОПП используется лингвистическая координация (разд. 3.1), и участвуют десять экспертов (рис. 3.9):

- 1) начальник производственного центра – определяет загруженность участков и перераспределяет производственные мощности; диспетчирует производство и руководит планерками; в СППР является ЛПП и решает задачу координации;
- 2) коммерческий директор – руководит технико-коммерческим отделом, определяет приоритетность заказов, формирует ценовую политику;
- 3) главный конструктор – возглавляет отдел главного конструктора, управляет порядком разработки конструкторской документации, ее согласованием с заказчиками и проектными организациями;
- 4) главный технолог – руководит отделом главного технолога и управляет процессом разработки технологической документации, ее согласования с ОГК, контролирует состояние оснастки;
- 5) начальник отдела продаж – формирует портфель заказов, контролирует оплату заказов и сроки поставки;



6) начальник отдела сбыта контролирует подготовку документов для отправки груза с готовыми изделиями заказчику, и заключение договоров с экспедиторскими организациями;

7) начальник транспортного цеха контролирует доставку готовой продукции;

8) начальник отдела материально-технического снабжения контролирует поставку и заказ необходимых материальных ресурсов, согласует замены;

9) начальник электромеханического отдела планирует и контролирует ремонтные работы.

10) старшие мастера цехов – руководят отдельными цехами, контролируют процесс изготовления, сборки, монтажа и наладки оборудования.

После получения информации об участниках процесса решения сложной задачи ОПП на ООО завод «Калининградгазавтоматика» в соответствии со стратифицированной моделью [5] был выполнен анализ ОПП (рис. 3.10) на стратах: 1) экономико-плановой  $STRAT_1$ ; 2) конструкторско-технологической  $STRAT_2$ ; 3) производственно-исполнительной  $STRAT_3$ . Рис. 3.10 показывает связь между оперативным графиком и стратами, полученными в результате анализа задачи ОПП.

Наиболее детальное представление об ОПП дает производственно-исполнительная страта  $STRAT_3$  (рис. 3.10). Начальник производственного центра вместе с экспертами решает задачу координации в режиме СППР и формирует оперативный график производства – основной до-

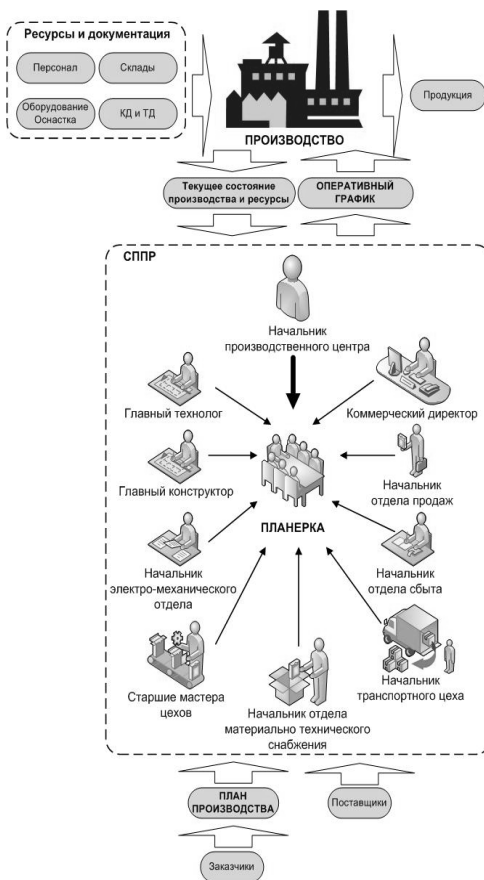


Рис. 3.9 – Система поддержки принятия решений в условиях задачи оперативно-производственного планирования на заводе «Калининградгазавтоматика»

кумент работы цехов и участков, в котором указаны изделия и их количество для изготовления. Информация о состоянии производства на момент планирования: количество и наличие материальных, трудовых и производственных ресурсах – представляется в численном виде, поэтому при моделировании решения задачи ОПП на этой страте применяются алгебраические уравнения и функциональные зависимости.



Рис. 3.10 – Стратифицированная модель задачи оперативно производственного планирования на ООО завод «Калининградгазавтоматика»

На конструкторско-технологической страте  $STRAT_2$  (рис. 3.10) разрабатывается и корректируется КД и ТД на изделия, вносимые в оперативный график. Для решения задачи ОПП на этой страте необходима информация об имеющейся КД: технические задания, чертежи, схемы, ведомости комплектации, и т.п., и ТД: техпроцессы, техкарты производства и операции. Для такой информации характерно, что все объекты планирования представлены в текстовом виде, а для моделирования решения задачи ОПП используются логические рассуждения и естественный язык.

На экономико-плановой страте  $STRAT_1$  (рис. 3.9) рассчитываются стоимостные показатели. Для решения задачи ОПП на этой страте необходима информация о стоимости материалов, энергоресурсов, трудозатратах, норме прибыли, расходах на обслуживание оборудования. Для такой информации, как и на страте  $STRAT_2$  характерно, что все объекты планирования представлены в текстовом виде. Основные методы, используемые на этой страте – математическая статистика, алгебраические уравнения, функциональные зависимости. Данная стратегия – наиболее абстрактное представление задачи оперативного планирования.

Сложная задача ОПП  $prb^u$  редуцирована на множество однородных задач и задачу координации  $prb^k$ , расчеты по которым должны быть выполнены в определенной последовательности, определяемые декомпозицией  $\widehat{prb}^u$  (рис. 3.11). В табл. 3.3 представлены основные задачи, из декомпозиции  $\widehat{prb}^u$  и методы их моделирования.

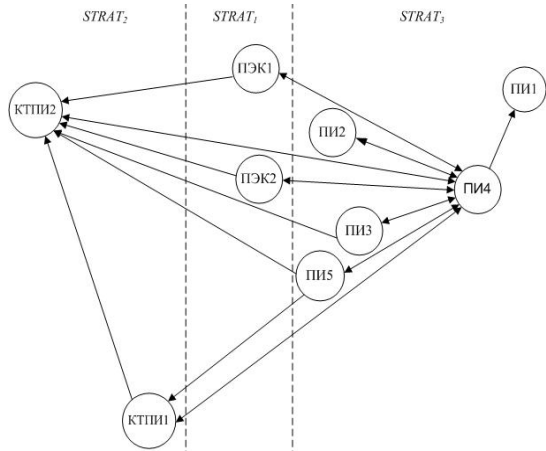


Рис. 3.11 – Декомпозиция сложной задачи оперативного планирования на ООО завод «Калининградгазавтоматика»

После редукиции, были определены входные и выходные данные подзадач, выбраны модели их решения. Для упрощения декомпозиции и, понимая, что задача ПЭК2 требует большого количества экономических расчетов, учитывать ее не будем.

Входные данные для задачи ПЭК1: стоимость заказа, сроки отгрузки, процент оплаты заказа, текущая приоритетность заказов, необходимость переопределения приоритетов заказов. Последняя задается ЛПП в процессе решения задач. Выходные данные ПЭК1: приоритетность заказов. Из указанных в табл. 3.3 методов представления в терминах профессиональной деятельности экспертов для ПЭК1, по словам экспертов, предпочтительнее лингвистическое представление знаний. В связи с этим для решения ПЭК1 ей сопоставляется модель ЭС5 (табл. 3.2) инструментальной среды ГСП.

Таблица 3.3 – Задачи и методы моделирования на промышленном предприятии

Страта	Эксперт	Подзадача	Код под-задачи	Представление в ЯПД эксперта
Экономико-плановая <i>STRAT<sub>1</sub></i>	Инженер-экономист	Планирование и контроль оплаты заказов	ПЭК1	ФУНКЗА АЛГЕУР ЛИНГВИСТИЧ
		Учет и контроль отпускной цены на продукцию	ПЭК2	ФУНКЗА АЛГЕУР
Конструкторско-технологическая <i>STRAT<sub>2</sub></i>	Инженер-конструктор, инженер-технолог	Анализ соответствия имеющихся ресурсов требованиям КД	КТПИ1	ЛОГИЧ ЛИНГВИСТИЧ
		Анализ соответствия имеющихся ресурсов требованиям ТД	КТПИ2	ЛОГИЧ ЛИНГВИСТИЧ
Производственно-исполнительная <i>STRAT<sub>3</sub></i>	Начальник производственного центра (диспетчер производства), инженер-экономист	Прогнозирование результатов выполнения оперативного графика	ПИ1	ФУНКЗА АЛГЕУР
		Оптимизация количества выпускаемой продукции	ПИ2	ФУНКЗА АЛГЕУР
		Планирование и контроль выполнения ремонтных работ	ПИ3	СТАТИСТ ЛИНГВИСТ ЛОГИЧ
		Задача координации	ПИ4	ЛИНГВИСТ ЛОГИЧ
		Учет, контроль и регулирование обеспечением материальными ресурсами	ПИ5	СТАТИСТ ЛИНГВИСТ ЛОГИЧ

Обозначения: АЛГЕУР – алгебраические уравнения; ФУНКЗА – функциональные зависимости; ЛОГИЧ – логические рассуждения; ЛИНГВИСТ – лингвистические рассуждения; СТАТИСТ – статистические представления

Входные данные КТПИ1 и КТПИ2: информация о наличии КД и ТД, информация о необходимости разработки документации и срочность заказа, куда изделие входит, необходимость замены материалов для производства изделия. Входные данные КТПИ2: информация о наличии КД на планируемые изделия. Выходные данные КТПИ1 и КТПИ2: сроки разработки документации, сложность разработки, наличие или отсутствие документации. При решении задачи КТПИ1 и КТПИ2 при отсутствии необходимого по документации технологического оборудования (оснастки) или материалов ищутся и подбираются аналоги, оценивается сложность разработки новой КД и ТД. Поскольку это под силу только эксперт с большим опытом работы, для решения КТПИ1 и КТПИ2 сопоставляются модели ЭС1 и ЭС2 (табл. 3.2) инструментальной среды ГСП, соответственно.

Задача ПИ1 – на основании статистических данных дать прогноз, выполнения оперативного графика. Входные данные ПИ1 – статистика отгруженных и планируемых изделий; выходные данные – прогнозируемые оценки отгрузки. Поскольку ни один из экспертов не сможет

дать такую оценку, а имеющиеся статистические данные могут иметь скрытые зависимости, то задаче ПИ1 сопоставляется модель НС (табл. 3.2) инструментальной среды ГСП.

Цель задачи ПИ2 – определить, сколько можно произвести изделий при имеющихся ресурсах, или сколько необходимо различных видов материалов для выпуска заданного количества изделий. Задачу можно решить, последовательно перебирая желаемое количество изделий и проверяя расход материалов. Учитывая, что номенклатура изделий в оперативно-производственном плане может превышать 50, возможно более 50! (факториал) комбинаций плана. Поэтому для решения ПИ2 используется модель ГА (табл. 3.2) инструментальной среды ГСП. Входные данные – складские запасы материалов и расход материалов на единицу продукции, необходимость проведения оптимизации; выходные данные – максимальное количество планируемых изделий, которое можно изготовить из имеющихся запасов.

При решении задачи ПИ3, по мнению экспертов, основную роль играют логические рассуждения, которым релевантна модель ЭС4 (табл. 3.2) из инструментальной среды ГСП. Входные данные – оборудование для производства планируемых изделий, сроки выполнения ремонтных работ для этого оборудования, их длительность и срочность, необходимость переноса ремонтных работ. Выходные данные – сроки выполнения ремонта оборудования для производства планируемых изделий; ремонтируемое оборудование.

Решение задачи ПИ5 на практике возможно только экспертом, т.к. только он может оперативно определить аналоги материалов, необходимых для производства планируемых изделий. Поэтому ПИ5 сопоставляется модель ЭС3 (табл. 3.2) ГСП. На вход ПИ5 подаются перечни материалов для производства планируемых изделий, сроки отгрузки изделий, приоритетность заказов на планируемые изделия, необходимость замены материалов и их поставщиков. На выходе – возможные замены и сроки поставки материалов, результаты смены поставщиков.

Задача ПИ4 – задача координации, ее может решить только эксперт, поэтому ей сопоставляется модель ЭС6 (табл. 3.2). Входные и выходные данные ПИ4 специфицируются при определении гибридной стратегии.

Для рассмотренных свойств установлены следующие границы значений: общая численность персонала предприятия – 600 человек, из них ИТР – 150 человек, рабочие – 400 человек, сотрудники иных служб, в том числе руководящий персонал – 50 человек; лимиты по складу – минимальный складской запас – 10% от среднемесячного расхода; информация о складских запасах, расходе материалов на единицу продукции, количество изделий – действительные положительные числа.

На основе декомпозиции (рис. 3.11), определена гибридная стратегия ФГиИС, представленная в табл. 3.4.

Таблица 3.4 – Гибридная стратегия

Код под-задачи	Входные данные	Выходные данные
КТПИ1	план производства и его текущее состояние; необходимость разработки документации; необходимость замены материалов для производства изделия	сроки разработки документации
КТПИ2	план производства и его текущее состояние; необходимость разработки документации; необходимость замены материалов для производства изделия	сроки разработки документации
ПИ1	план производства и его текущее состояние	прогнозные оценки отгрузки
ПИ2	план производства и его текущее состояние; необходимость оптимизации	сколько планируемых изделий может быть изготовлено из имеющихся материалов
ПИ3	план производства и его текущее состояние; необходимость переноса ремонтных работ	сроки выполнения ремонта оборудования для производства планируемых изделий
ПИ5	план производства и его текущее состояние; необходимость замены материалов или поставщиков	сроки поставки материалов
ПЭК1	план производства; необходимость переопределения приоритетов заказов	приоритетность заказа
ПИ4	приоритетность заказа (выход ПЭК1); сроки разработки документации (из КТПИ1, КТПИ2); сколько планируемых изделий может быть изготовлено из имеющихся материалов (из ПИ2); сроки выполнения ремонта оборудования для производства планируемых изделий (из ПИ3); сроки поставки материалов (из ПИ5)	необходимость переопределения приоритетов заказов (в ПЭК1); необходимость разработки документации, необходимость замены материалов для производства изделия (в КТПИ1, КТПИ2); необходимость оптимизации (в ПИ2); необходимость переноса ремонтных работ (в ПИ3); необходимость замены материалов или поставщиков (в ПИ5).

Порядок поиска решения задач КТПИ1, КТПИ2, ПИ3, ПИ5 произвольный; поиск решения задачи ПИ2 после решения задач КТПИ1, КТПИ2, ПИ3, ПИ5 и задачи ПИ4; поиск решения задачи ПИ1 после решения всех остальных задач только на последней планерке.

На ООО завод «Калининградгазавтоматика» установлена система ERP SyteLine для учета потребностей и предпочтений клиентов при подборе интересующей его продукции и услуг, а также оперативного управления производством [171]. Для машинных экспериментов из базы данных системы ERP SyteLine, в БД с входными и выходными данными

для инструментальной среды ГСП были экспортированы входные данные подзадач ПЭК1, КТПИ1, КТПИ2, ПИ1-ПИ5. В табл. 3.5 приведено описание БД с входными и выходными данными для инструментальной среды ГСП.

Таблица 3.5 – Описание БД входных и выходных данных инструментальной среды ГСП

Таблица	Описание	Код связанной с таблицей подзадачи
Item	Номенклатуры изделий ERP системы SyteLine	На вход КТПИ1, КТПИ2
KGAItem	Номенклатуры изделий ООО завод «Калининградгазавтоматика»	На вход КТПИ1, КТПИ2
co	Перечень заказов (используется совместно с «coitem»)	На вход ПЭК1, КТПИ1, КТПИ2, ПИ5
coitem	Состав заказов (используется совместно с таблицей «co»)	На вход ПЭК1, КТПИ1, КТПИ2, ПИ3, ПИ5
u_m	Единицы измерений	—
KGAJobMatl	Таблица связи между работами, оборудованием и расходуемыми материалами	На вход ПИ2, ПИ3
RUSDefOper	Таблица с описанием рабочих операций в соответствии со стандартами РФ	—
documentation	Таблица состояния КД и ТД для изделий	На вход КТПИ1, КТПИ2
OptResult	Таблица результатов оптимизации количества выпускаемых изделий	С выхода ПИ2
ExcludedOrders	Таблица заказов, исключенных в ходе моделирования из плана	—
contract_chance	Типы заказов	—
matltran	Таблица расхода и прихода материалов	На вход ПИ5
Matlalt	Таблица взаимозаменяемых материалов	На вход ПИ5
matldelive	Таблица сроков поставки материалов	На вход ПИ5
Repair	Таблица сроков ремонта производственного оборудования	На вход ПИ3

Как видно из табл. 3.5, часть данных в БД системы ERP SyteLine дублируется (таблицы KGAItem и Item). Причина – выявленное несоответствие перечня номенклатуры на предприятии и предлагаемого разработчиками системы ERP SyteLine. Поскольку таблица KGAItem связана с таблицей Item, то для проведения экспериментов она извлечена из БД системы ERP SyteLine в БД с входными данными для инструментальной среды ГСП. Прочерк в последнем столбце означает, что таблица – системная, т.е. хранит данные для работы инструментальной среды ГСП.

После подготовки входных данных для моделирования решения сложной задачи ОПП были выполнены эксперименты, построены графики интегративного результата работы ГиИС с координацией и без нее, а также при условии отсутствия модели одного из экспертов.

Автоматизированное решение сложной задачи ОПП моделировалось с учетом и без учета координации. Были построены графики: 1) для случая с участием всех экспертов и ЛПР на всех 15 планерках – рис. 3.12; 2) для случая без участия одного эксперта (главного конструктора) – рис. 3.13. Поскольку в соответствии с описанием функционирования ФГиИС (разд. 3.4), в процессе решения сложной задачи ОПП в период между планерками состояние ФГиИС неизвестно, то единственная возможность графического представления результатов экспериментов с учетом координации – столбцовая диаграмма. На рис. 3.12 и 3.13 по оси  $X$  отложены месяц и год, для которых проводится моделирование решения задачи ОПП, по оси  $Y$  – суммарная стоимость заказов.

Также построены графики относительной погрешности для экспериментов без учета координации и с учетом координации при отсутствии одного из экспертов (главного конструктора) – рис. 3.14 и 3.15, соответственно. На этих рисунках по оси  $X$  отложены месяц и год, для которых проводится моделирование решения задачи ОПП, по оси  $Y$  – относительная погрешность.

При анализе рис. 3.12 выявлено совпадение результатов экспериментов по решению задачи ОПП с учетом координации с фактическими данными, реального планирования при решении задачи ОПП в СППР на ООО завод «Калининградгазавтоматика». В среднем, по всем одиннадцати экспериментам относительная погрешность результатов решения задачи ОПП с учетом координации не превысила 1%. Это позволяет утверждать, что, разработанная по методике создания программного продукта для решения сложных задач ОПП методами ФГиИС, «Автоматизированная система для решения задачи оперативного планирования производством на ООО завод «Калининградгазавтоматика»» релевантно отображает моделируемые процессы и явления. Нужно отметить, что учет координации при моделировании не приводит к улучшению или ухудшению результатов решения задачи ОПП, а делает модель релевантнее реальной задаче.

На рис. 3.12 видно, что результаты моделирования решения задачи ОПП без учета координации не соответствуют фактическим. Относительная погрешность результатов решения задачи ОПП без учета координации в среднем достигает 36% (рис. 3.16).



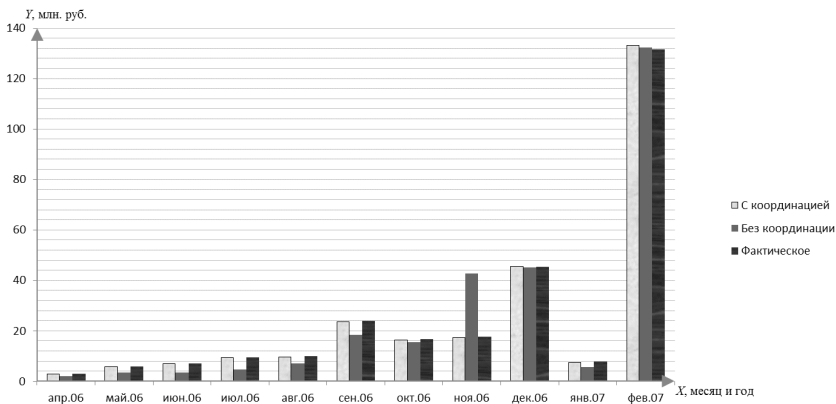


Рис. 3.12 – График результатов решения задачи оперативно-производственного планирования с учетом координации и участием всех экспертов и ЛПП на всех планерках

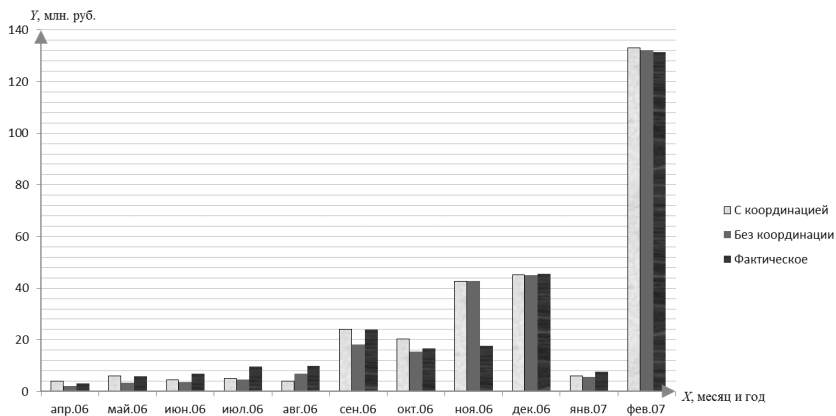


Рис. 3.13 – График результатов решения задачи оперативно-производственного планирования с учетом координации без участия одного эксперта (главного конструктора)

В эксперименте 8 (рис. 3.12, столбец «ноя.06»), при решении без координации, было получено перевыполнения плана (рис. 3.16,а), что соответствует перерасходу ресурсов и затовариванию складов. В экспериментах 1-7, 9-11 (рис. 3.12, все столбцы кроме «ноя.06»), при решении без координации план не выполнен (рис. 3.16,б). Таким образом, анализ рис. 3.12 подтверждает теоретическое обоснование (разд. 3.1) необходимости учета координации при решении сложной задачи ОПП.

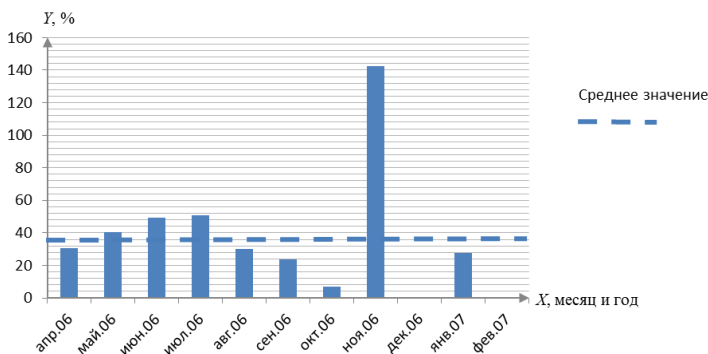


Рис. 3.14 – График относительной погрешности результатов решения задачи оперативно-производственного планирования без учета координации

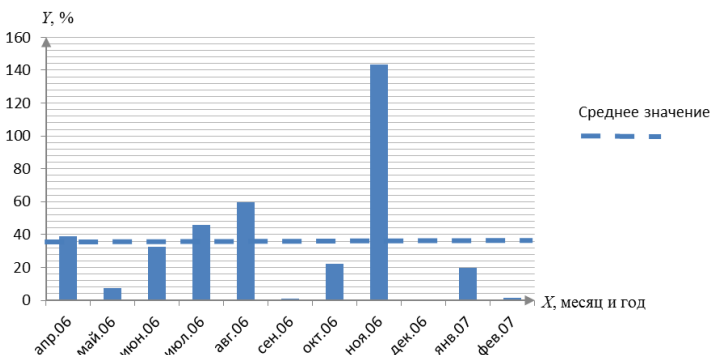


Рис. 3.15 – График относительной погрешности результатов решения задачи оперативно-производственного планирования с учетом координации без участия одного эксперта (главного конструктора)

Анализ рис. 3.13 показал, что «исключение» в ходе решения задачи ОПП с учетом координации моделей отдельных экспертов, ведет к ухудшению результатов планирования. В этом случае ошибка результатов в среднем составила 33% (рис. 3.15), т.е. почти не отличается от ошибки решения задачи ОПП без учета координации. Это объясняется тем, что, недополучая информацию от отсутствующих экспертов, ЛПР не может выдать необходимые координирующие воздействия присутствующим – «пропадает» координация. Уменьшение количества моделей делает интегрированную модель нерелевантной оригиналу, поэтому для релевантного моделирования важен количественный состав КСППР.

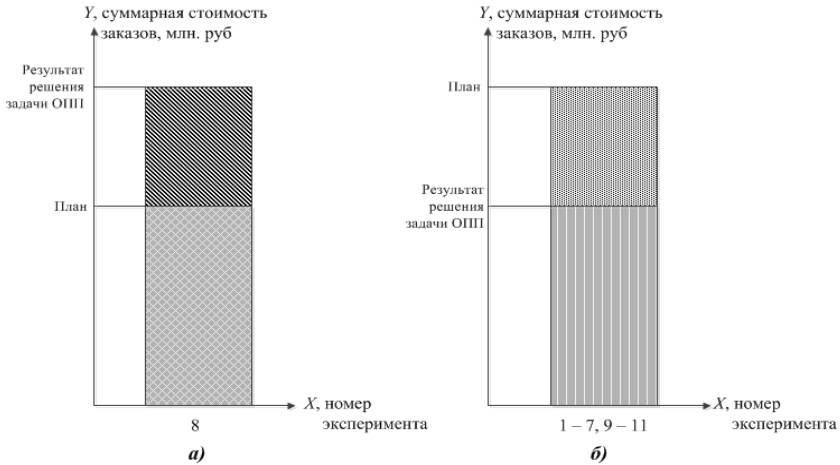


Рис. 3.16 – Упрощенная графическая интерпретация результатов экспериментов по решению задачи оперативно-производственного планирования без учета координации

Полученные в ходе проведения экспериментов по решению сложной задачи ОПП с учетом координации с участием всех экспертов и ЛПП на всех 15 планерках рекомендации, отображенные в протоколе планерок, получили высокую оценку экспертов. По их мнению, они могут рассматриваться как руководство к действию при отсутствии серьезных изменений во внешней среде предприятия – задержке расчетов, задержке поставок и т.д. В результате проведенных экспериментов теоретически обоснована необходимость учета координации при решении сложной задачи ОПП и подтверждена релевантность разработанных моделей сложной задаче ОПП. Кроме того, показано преимущество микроуровневых моделей СППР с координацией  $\widetilde{DSS}_{cor} \subseteq \widetilde{DSS}$  (разд. 2.4) перед моделями без таковой  $\widetilde{DSS}_{cor} \subseteq \widetilde{DSS}$ .

## 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ СОГЛАСОВАННОСТИ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрим еще одну компьютерную модель СППР — гибридную интеллектуальную многоагентную систему, релевантную не только разнообразию знаний, используемых в сложных ситуациях управленческой деятельности, но и оценивающую согласованность целей и мнений экспертов, участвующих в коллективном принятии решений.

### 4.1 Концептуальная модель согласованности в системах поддержки принятия решений

Как показано в разд. 2.4, под согласованностью понимается степень схождения целей участников СППР. Согласно [130], цель – положение вещей, которого стремится достичь ЛПР, имеющее для него определенную субъективную ценность. В [172] цель – идеальное предвосхищение результата деятельности, выступающее ее регулятором, а в [173] – ситуация или область ситуаций, которая должна быть достигнута при функционировании системы за определенное время. Обобщая эти определения, выделим основные характеристики цели: представляет состояние объекта управления, регулятор деятельности, имеет темпоральный характер (функция времени) и субъективно полезна для ЛПР.

*Определение 4.1.* Цель  $pr^{gsu}$  эксперта как субъекта управления  $res^{su}$  – состояние  $st^{pou}$  объекта управления  $res^{ou}$ , имеющее для эксперта ценность (полезность)  $pr^{csu}$ , определяющее его деятельность (последовательность действий)  $act^{dsu}$ , которое должно быть достигнуто за промежуток времени  $pr^t$ .

Схема концептуальных моделей цели может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} pr^{gsu} &= R^{res\ st} (res^{ou}, st^{pou}) \circ R^{res\ pr} (res^{su}, pr^{csu}) \circ R^{res\ act} (res^{ou}, act^{dsu}), \\ act^{dsu} &= R^{act\ act} (ACT^{su}, ACT^{su}) \circ R^{act\ pr} (ACT^{su}, PR^t), \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $R^{res\ st}$  – отношения «ресурс – состояние», ставящие в соответствие объекту управления его состояние;  $R^{res\ pr}$  – отношения «ресурс – свойство», определяющие субъективную полезность состояния объекта управления для эксперта (субъекта управления);  $R^{pr\ act}$  – отношения «свойство – действие», ставящие в соответствие целевому состоянию последовательность действий  $act^{dsu}$ ;  $ACT^{su}$  – множество возможных

действий эксперта;  $R^{act\ act}$  – отношения «действие – действие», определяющие порядок действий  $act^{su} \in ACT^{su}$  в последовательности  $act^{dsu}$ ;  $R^{act\ pr}$  – отношения «действие – свойство» между действиями из  $ACT^{su}$  и временем их выполнения  $PR^t$ .

Состояние  $st^{pou}$  объекта управления  $res^{ou}$  определяется значениями свойств последнего:

$$st^{pou} = R^{res\ pr} (res^{ou}, PR^{ou}) \circ R^{pr\ val} (PR^{ou}, VAL^{ou}),$$

где  $R^{res\ pr}$  – отношения «ресурс – свойство», задающие множество свойств ОУ, а  $R^{pr\ val}$  – отношения «свойство – значение», каждому из свойств ОУ ставящие в соответствие множество значений. Одним из свойств во множестве  $PR^{ou}$  может быть время, связанное с функционированием ОУ. При этом цель эксперта также становится динамической и изменяется во времени.

Поскольку, как отмечалось выше, свойства ОУ представляются переменными при записи причинно-следственных связей в том или ином методе моделирования, то в целеполагании могут использоваться несколько инструментариев. Это обуславливает сложность моделирования принятия решения, если требуется сопоставлять подцели, описанные разными методами. Такая ситуация возникает, например, если существуют решения, оптимальные по Парето, и требуется выбрать только одно из них. Допустим, есть ОУ с двумя свойствами  $pr_1^{ou}$  и  $pr_2^{ou}$ , а также два состояния ОУ  $st_1^{pou}$  и  $st_2^{pou}$ , причем  $st_1^{pou}$  ближе к целевому состоянию  $st^{pou}$ , чем  $st_2^{pou}$ , по первому критерию  $pr_1^{ou}$ , а  $st_2^{pou}$  – по второму  $pr_2^{ou}$ . Если свойства представлены разными переменными (например, стохастической и нечеткой лингвистической), обрабатываемыми разными методами, выбрать одно из решений будет затруднительно. Однако если свойства представлены переменными одного типа, можно задать метрику в двумерном пространстве векторов, представляющих допустимые состояния ОУ, и определить расстояние между  $st_1^{pou}$  и  $st^{pou}$ , а также между  $st_2^{pou}$  и  $st^{pou}$ , после чего сравнить их между собой. Чтобы избежать подобных ситуаций, выберем один метод представления всех свойств, определяющих состояние ОУ, а значит, и используемых при описании целей ЛПР и экспертов. Анализ показал, что этому релевантен аппарат теории нечетких множеств [107].

*Определение 4.2.* Нечеткая цель эксперта  $pr^{gsu}$  – нечеткое множество, заданное на множестве состояний объекта управления  $ST^{pou} \subseteq ST$ , с функцией принадлежности  $\mu^{pr^{gsu}}(st^{pou})$ , или для краткости  $\mu^{gsu}(st^{pou})$ .

Функция принадлежности  $\mu^{gsu}(st^{pou})$  принимает значения на множестве действительных чисел в интервале  $[0; 1]$ . При этом чем больше ее значение, тем ближе состояние объекта управления  $st^{pou}$  к цели эксперта  $pr^{gsu}$ . Состояние  $st^{pou}$  объекта управления описывается набором его свойств  $PR^{ou} = \{pr_1^{ou}, \dots, pr_{N_{pr}^{ou}}^{ou}\}$ , представленных переменными одного из перечисленных в [5] классов, т.е.

$$\mu^{gsu}(st^{pou}) = \mu^{gsu}(pr_1^{ou}, \dots, pr_{N_{pr}^{ou}}^{ou}). \quad (4.2)$$

Значение функции принадлежности определяется подстановкой в (4.2) значений из множества  $VAL^{ou}$  свойств ОУ для данного состояния, т.е. описывается выражением  $\mu^{gsu}(val_1^{ou}, \dots, val_{N_{val}^{ou}}^{ou})$ .

Нечеткая цель эксперта может быть представлена одним из рассмотренных в [7] методов построения функций принадлежности нечетких множеств. Выбор метода – за разработчиком КСППР. Ниже для записи причинно-следственных связей между целями и отношениями взаимодействия экспертов используются прямые методы [7] построения нечеткой цели.

Когда цели экспертов формализованы, может быть выполнено их попарное сравнение и определена степень близости. Один из вариантов определения степени близости целей экспертов – расчет расстояния Евклида или Хэмминга между нечеткими множествами [174, 175]. Однако их применение к определению степени сходства целей экспертов проблематично: они вычисляются лишь при условии сходимости используемых в них рядов или интегралов. Иначе при  $val_{\min}^{ou} = -\infty$  или  $val_{\max}^{ou} = \infty$ , где  $val_{\min}^{ou}$  и  $val_{\max}^{ou}$  – минимальное и максимальное значение свойства  $pr^{ou}$ , описывающего состояние  $st^{pou}$ , расстояние будет равно бесконечности, даже если одно множество включает другое. В этой связи предлагается мера сходства нечетких целей [6, 120 – 122]:

$$s(A, B) = 0,5 \cdot \left( \frac{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_{A \cap B}^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})}{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_A^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})} + \frac{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_{A \cap B}^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})}{\int_{val_{\min}^{ou}}^{val_{\max}^{ou}} \mu_B^{gsu}(pr^{ou}) d(pr^{ou})} \right). \quad (4.3)$$

Формула (4.3) – полусумма отношений площади серой заштрихованной области  $A \cap B$  к площади серой области  $A$  и площади  $A \cap B$  к

площади заштрихованной области  $B$  на рис. 4.1. Значения меры сходства – действительные числа в интервале  $[0; 1]$ .

Анализ показывает, что, в отличие от расстояния Евклида или Хэмминга, соотношение (4.3) следует считать мерой сходства нечетких множеств, а не расстоянием между ними, так как оно не удовлетворяет некоторым из условий (а именно (4.4) и (4.5)), предъявляемым к функции расстояния в математике:

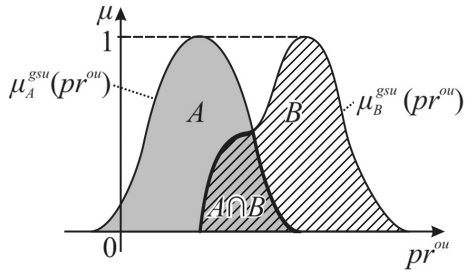


Рис. 4.1 – Мера сходства нечетких целей агентов

$$\begin{aligned}
 d(X, Y) &\geq 0, \\
 d(X, Y) &= d(Y, X), \\
 d(X, Z) &\leq d(X, Y) + d(Y, Z), \\
 d(X, X) &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

После определения меры сходства целей экспертов может быть определен тип отношений между ними по степени согласованности. Представим его в виде нечетких множеств на универсуме значений меры сходства целей  $s$  (на множестве действительных чисел в интервале  $[0; 1]$ ). В разд. 2.4 выделены три типа отношений по степени согласованности: конкуренция, нейтралитет и сотрудничество. Чем выше значение меры сходства целей экспертов (4.3), тем теснее взаимодействие между ними. Таким образом, функция принадлежности нечеткого множества «сотрудничество» должна принимать максимальное значение при  $s = 1$ , а функция принадлежности нечеткого множества «конкуренция» – при  $s = 0$ . Максимум функции принадлежности нечеткого множества «нейтралитет» должен быть равноудален от этих максимумов, т.е. находится в точке  $s = 0,5$ . Функции принадлежности нечетких множеств отношений конкуренции  $\mu_{\text{конкуренция}}(s) =$ , нейтралитета  $\mu_{\text{нейтралитет}}(s) = (1 + (6 \cdot (s - 0,5))^8)^{-1}$  и сотрудничества  $\mu_{\text{сотрудничество}}(s) = (1 + (3 \cdot (s - 1))^8)^{-1}$  изображены на рис. 4.2:

Представим отношение между участниками СППР по степени согласованности лингвистической переменной  $cl$  – «тип отношения»:

$$cl = \langle \beta^{cl}, T^{cl}, U^{cl}, G^{cl}, M^{cl} \rangle,
 \tag{4.6}$$

где  $\beta^{cl} = \langle \text{тип отношений} \rangle$  – наименование лингвистической переменной;  $T^{cl} = \{ \langle \text{«конкуренция»}; \langle \text{«нейтралитет»}; \langle \text{«сотрудничество»} \rangle \}$  – множество имен лингвистических значений переменной (термножество), представляющих наименование нечеткой переменной;  $U^{cl} = [0; 1]$  – область определения (универсум) нечетких переменных, входящих в определение лингвистической переменной;  $G^{cl} = \emptyset$  – синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из элементов множества  $T$  новых термов;  $M^{cl} = \{ \mu_{\text{конкуренция}}(s), \mu_{\text{нейтралитет}}(s), \mu_{\text{сотрудничество}}(s) \}$  – семантическая процедура, ставящая в соответствие каждому терму множества  $T$  и термам, образуемым процедурой  $G$ , нечеткое множество [6, 120, 121].

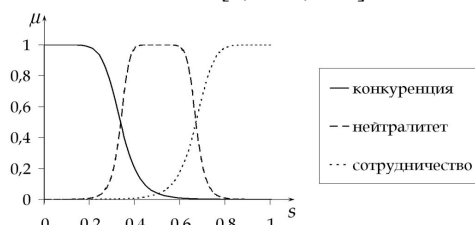


Рис. 4.2 – Функции принадлежности нечетких множеств типов отношений между участниками СППР по степени согласованности

Значение лингвистической переменной  $cl$  (тип отношений) – терм с наибольшим значением функции принадлежности. Для ее вычисления нужно определить значение функции принадлежности к каждому нечеткому множеству, представляющему отношения, и сравнить их между собой.

Нечеткое множество с максимальным значением функции принадлежности соответствует типу отношений, установленному между парой экспертов. Можно определить отображение «классификатор отношений»  $rcl: (prt_i, prt_j) \rightarrow T^{cl}$ ,  $ag_i, ag_j \in AG^*$ ,  $i \neq j$ , который каждой паре участников СППР  $(prt_i, prt_j)$  ставит в соответствие один из термов  $t_k^{cl}$  лингвистической переменной  $cl$ , т.е. тип отношения. Отображение  $rcl$  определяется следующим образом:

$$rcl(prt_i, prt_j) = \arg \max_{t_k^{cl} \in T^{cl}} (\mu_{t_k^{cl}}(s(pr_p^{gsu}, pr_q^{gsu}))), \quad (4.7)$$

причем  $r_i^{res\ pr}(prt_i, pr_p^{gsu}), r_i^{res\ pr}(prt_j, pr_q^{gsu}), i \neq j$ .

Множество значений этого отображения формирует матрицу **RCL** классификации отношений между участниками СППР. Строки и столбцы матрицы обозначают участников, а элементы  $rcl_{ij} = rcl(prt_i, prt_j)$  –



класс отношений между ними. Эта матрица используется для идентификации сложившейся ситуации коллективного решения задачи.

В зависимости от присутствующих в СППР классов отношений выделим три ситуации коллективного решения (микроуровневой модели СППР) задачи (разд. 2.4): 1) ситуация сотрудничества  $\widetilde{dss}_{coop}$ , когда СППР состоит из сотрудничающих и нейтральных участников и где нет отношений конкуренции; 2) ситуация нейтралитета  $\widetilde{dss}_{neut}$ , когда все отношения в СППР нейтральные; 3) ситуация конкуренции  $\widetilde{dss}_{comp}$ , когда в СППР есть хотя бы одна пара экспертов с отношением конкуренции; в таких СППР могут быть также нейтральные и сотрудничающие участники; при наличии сотрудничающих участников они рассматриваются как единый мнимый участник; тогда все участники только конкурирующие или нейтральные.

Таким образом, процесс самоорганизации на основе анализа целей можно разделить на две части: идентификация текущей ситуации коллективного решения (микроуровневой модели СППР) и выбор из множества возможных желаемой ситуации коллективного решения релевантной условиям поставленной задачи. С учетом этого, модель самоорганизации (2.17) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 so^{goa} = & r_2^{res\ act} (dss, ACT^{sen}) \circ r_1^{act\ res} (ACT^{sen}, env) \circ R_1^{res\ res} (\widetilde{DSS}, \widetilde{DSS}) \circ \\
 & \circ r_3^{res\ res} (dss, prt^{dm}) \circ r_2^{res\ act} (prt^{dm}, act_{ia}) \circ r_1^{act\ res} (act_{ia}, \widetilde{dss}_{cur}) \circ \\
 & \circ r_2^{res\ act} (prt^{dm}, act_{ac}) \circ r_1^{act\ res} (act_{ac}, \widetilde{DSS}) \circ r_2^{act\ res} (act_{ac}, \widetilde{dss}_{des}),
 \end{aligned} \quad (4.8)$$

где  $act_{ia}$  – действие ЛПР «идентификация текущей ситуации коллективного решения»;  $act_{ac}$  – действие ЛПР «выбор желаемой ситуации коллективного решения из множества возможных»;  $\widetilde{dss}_{cur}$  – текущая ситуация коллективного решения (микроуровневая модель СППР);  $\widetilde{dss}_{des}$  – желаемая ЛПР ситуация коллективного решения с точки зрения параметров задачи и его знаний об эффективности той или ситуации из множества  $\widetilde{DSS}$  возможных в данной СППР;  $r_2^{res\ act}$  – отношение «выполнять», связывающее субъект и действие, которое он выполняет;  $r_1^{act\ res}$  – отношение «иметь объектом», связывающее действие и его ресурс;  $r_2^{act\ res}$  – отношение «иметь результатом», связывающее действие и результат его выполнения.

На рис. 4.3 представлен алгоритм изменения лицом, принимающим решения, направленности взаимодействий между экспертами на основе анализа согласованности их целей. На нем блоки, выделенные прямоугольником со штриховой границей, относятся к действию ЛПР «иден-

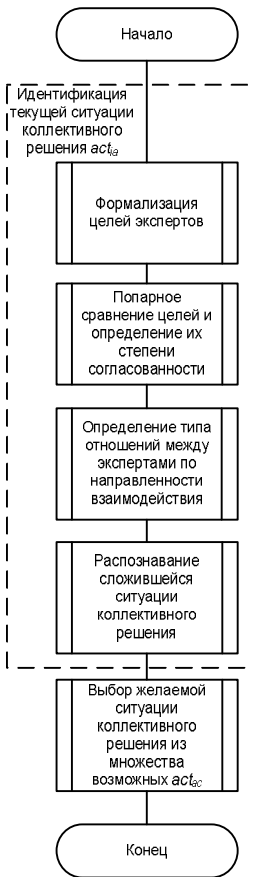


Рис. 4.3 – Блок-схема алгоритма изменения ЛПР направленности взаимодействия между экспертами на основе анализа согласованности их целей

задачи и своих знаниях об эффективности той или иной ситуации коллективного решения ЛПР может стремиться установить одну из них, чтобы повысить эффективность работы СППР, либо попытаться изменить ее, если обсуждение заходит в тупик. Модель системы нечеткого вывода для выбора желаемой ситуации коллективного решения из множества возможных будет описана в следующем разделе. При этом, начиная работу по руководству СППР, ЛПР имеет некоторый объем теоретических знаний о предпочтительности той или иной ситуации коллективного

тификации текущей ситуации коллективного решения»  $act_{ia}$ . Рассмотрим содержание блоков алгоритма рис. 4.3.

Первый этап идентификации  $act_{ia}$  (4.8) ситуации коллективного решения – *формализация целей экспертов* на основе определения нечеткой цели (4.2). После того как определены нечеткие цели всех экспертов, выполняется следующий этап идентификации  $act_{ia}$  (4.8) ситуации коллективного решения – *попарное сравнение целей и определение их степени согласованности* с использованием меры (4.3). Далее *определяется тип отношений между экспертами по степени согласованности* с использованием лингвистической переменной  $cl$  «тип отношения» (4.6). Завершающий этап идентификации  $act_{ia}$  (4.8) ситуации коллективного решения – *распознавание сложившейся ситуации коллективного решения* с использованием матрицы  $CL'$ . В зависимости от присутствующих в матрице  $CL'$  классов отношений выделяется три ситуации коллективного решения задачи: сотрудничества  $\widetilde{dss}_{coop}$ , нейтралитета  $\widetilde{dss}_{neut}$  и конкуренции  $\widetilde{dss}_{comp}$ . После идентификации текущей ситуации коллективного решения ЛПР выбирает  $act_{ac}$  (4.8) из множества возможных ситуаций коллективного решения, релевантную условиям поставленной задачи. В зависимости от параметров

решения задачи. Однако профессиональные, практические знания ЛПР приобретает с опытом решения сложных задач в СППР.

Для исследования предпочтительности различных ситуаций коллективного решения сложной задачи использовано компьютерное моделирование СППР, что позволяет исключить влияние человеческого фактора и обеспечить объективность получаемых знаний. Для этого в следующем разделе вводится модель СППР – гибридная интеллектуальная многоагентная система, которая способна проявлять свойства самоорганизации и самообучения на основе анализа целей агентов, имитирующих участников СППР, и интегрировать технологии искусственного интеллекта для получения метода релевантного сложным в моделировании задачам [86].

#### **4.2 Модель гибридной интеллектуальной многоагентной системы с самоорганизацией на основе анализа согласованности целей агентов**

Гибридной интеллектуальной многоагентной системой будем называть МАС, агенты которой используют в своей работе методы интеллектуальных технологий. Такие системы сочетают положительные стороны ГиИС и МАС. Во-первых, благодаря комбинированию методов ИИ, они релевантны задачам высокой сложности моделирования. Во-вторых, за счет имитации процессов самоорганизации в СППР, они способны менять свою базовую архитектуру для достижения синергетического эффекта и повышения качества рекомендуемых решений. Кроме того, моделирование процессов самоорганизации  $so^{gaa}$  позволяет также моделировать и процесс самообучения ЛПР  $sl_{dm}$ . Это позволит агенту, принимающему решения, корректировать свои знания о взаимодействии агентов ГиИМАС в ходе работ по решению сложных задач для релевантной организации коллективной работы.

Под самоорганизацией ГиИМАС понимается процесс изменения архитектуры ГиИМАС агентом, имитирующим ЛПР и входящим в ее состав, на основе анализа взаимодействия других агентов с целью повышения качества решений. В основу модели ГиИМАС с самоорганизацией положено определение МАС И. Демазо и А. Роча Коста [123]. Определение дополнено множеством концептуальных моделей макроуровневых процессов (2.16), (2.17) в ГиИМАС, подобно тому, как это сделано в выражении (2.6) для СППР, а также понятием автономного метода [1, 5, 6]. В итоге ГиИМАС с самоорганизацией представляется выражениями [124, 125]:

$$himas = (AG^*, env, INT^*, ORG, \{so, sl\}), \quad (4.9)$$

$$AG^* = \{ag_1, \dots, ag_n, ag^{dm}\}, \quad (4.10)$$

$$INT^* = \{prot, lang, ont, rcl\}, \quad (4.11)$$

$$ORG = ORG_{coop} \cup ORG_{neut} \cup ORG_{comp}, \quad ORG_{coop} \cap ORG_{neut} = \emptyset, \quad (4.12)$$

$$ORG_{coop} \cap ORG_{comp} = \emptyset, \quad ORG_{comp} \cap ORG_{neut} = \emptyset,$$

$$act_{himas} = \left( \bigcup_{ag \in AG^*} act_{ag} \right) \cup act_{ia} \cup act_{ac} \cup act_{col}, \quad (4.13)$$

$$act_{ag} = (MET_{ag}, IT_{ag}), \quad ag \in AG^*, \quad \left| \bigcup_{ag \in AG^*} IT_{ag} \right| \geq 2, \quad (4.14)$$

$$ag = ag \vee himas, \quad (4.15)$$

где  $AG^*$  – множество агентов ГиИМАС, включая агента, принимающего решения  $ag_{dm}$ ,  $n$  – число агентов-экспертов в ГиИМАС;  $env$  – среда, в которой находится ГиИМАС  $INT^*$  – множество элементов для структурирования взаимодействий между агентами;  $ORG$  – множество базовых организационных структур, соответствующих конкретным функциям (ролям) агентов и установившимся отношениям между ними, включающее подмножества:  $ORG_{coop}$ ,  $ORG_{neut}$ ,  $ORG_{comp}$  – множество архитектур с сотрудничающими, нейтральными и конкурирующими агентами, соответственно;  $prot$  – протокол взаимодействия агентов (например, протоколы речевых актов, контрактных сетей, доски объявлений и т.д. [176]), определяющий формат сообщений, которыми обмениваются агенты;  $lang$  – язык обмена сообщениями (например, KQML, COOL и др.), определяющий лексику и синтаксис передаваемых сообщений;  $ont$  – модель предметной области, на основе которой определяется семантика передаваемых агентами сообщений;  $rcl$  – классификатор отношений между агентами ГиИМАС;  $act_{himas}$  – функция ГиИМАС в целом;  $act_{ag}$  – функция агента  $ag \in AG^*$ ;  $act_{ia}$  – функция «анализ взаимодействий»;  $act_{ac}$  – функция «выбор архитектуры»;  $MET_{ag}$  – множество методов решения задачи, реализуемых агентом  $ag \in AG^*$ ;  $IT_{ag}$  – множество интеллектуальных технологий, МФПС [6], в рамках которых реализовано множество методов  $MET_{ag}$ .

По сравнению с определением МАС И. Демазо и А. Роча Коста [123] в выражениях (4.9) – (4.15) произошли следующие изменения: во множество  $AG^*$  агентов добавлен агент, принимающий решения  $ag_{dm}$ ; во множество  $INT^*$  элементов для структурирования взаимодействий до-

бавлен дополнительный элемент  $rcl$  – классификатор отношений между агентами ГиИМАС; множество  $ORG$  базовых организационных структур разделено на подмножества  $ORG_{coop}$ ,  $ORG_{neut}$ ,  $ORG_{comp}$ ; добавлены функции «анализ взаимодействий»  $act_{ia}$  и «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  агента принимающего решений  $ag_{dm}$ ; введены понятия метода  $met_{ag} \in MET_{ag}$  и интеллектуальной технологии  $it_{ag} \in IT_{ag}$ . Рассмотрим подробнее перечисленные отличия.

Как уже было сказано, из множества агентов ГиИМАС (4.10) выделяется один агент, принимающий решения. Этот агент, кроме прочего, организует взаимодействия агентов в ГиИМАС, используя две функции (4.13): 1)  $act_{ia}$  – функцию «анализ взаимодействий» и 2)  $act_{ac}$  – функцию «выбор архитектуры». Функция анализ взаимодействия  $act_{ia}$  применяется для мониторинга взаимодействия агентов и идентификации архитектуры ГиИМАС на основе анализа согласованности целей агентов. По его результатам АПР с помощью функции «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  может установить необходимость замены типа отношений агентов и корректировки их целей. Для этого АПР должен иметь базу знаний, используемую функцией «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  и отображающую зависимость эффективности работы ГиИМАС от согласованности целей агентов. Смена архитектуры означает, что с некоторого момента ГиИМАС изменяет алгоритм функционирования, проявляя свойство самоорганизации, и переходит на базовую архитектуру другого типа. Алгоритмы этих функций подробно будут рассмотрены ниже.

Множество  $INT^*$  дополнено еще одним элементом структурирования взаимодействий между агентами – классификатором отношений  $rcl$ . Он анализирует нечеткие цели  $pr^{gsu}$  (разд. 4.1) агентов и оценивает степень их согласованности с помощью меры  $s(A, B)$  (4.3). Далее, используя отображение (4.7), строит матрицу  $\mathbf{RCL}$ , относя взаимоотношения между агентами к одному из типов: конкуренция, нейтралитет и сотрудничество. По этой матрице определяется согласованности агентов ГиИМАС и класс ее базовой архитектуры. Множество базовых архитектур ГиИМАС  $ORG$  делится по степени согласованности на три попарно непересекающихся множества (4.12):

- 1) архитектура ГиИМАС с сотрудничающими агентами, которая состоит только из сотрудничающих и нейтральных агентов, и полностью отсутствуют отношения конкуренции ( $ORG_{coop} \subseteq ORG$ );
- 2) архитектура ГиИМАС с нейтральными агентами, где присутствуют только нейтральные отношения ( $ORG_{neut} \subseteq ORG$ );

3) архитектура ГиИМАС с конкурирующими агентами, в которой есть хотя бы одна пара агентов с отношением конкуренции; в таких архитектурах ГиИМАС могут быть также нейтральные и сотрудничающие агенты; при наличии сотрудничающих агентов они рассматриваются как единый «суперагент», и тогда все агенты становятся только конкурирующими или нейтральными ( $ORG_{comp} \subseteq ORG$ ).

В процессе работы ГиИМАС может переходить от одной базовой архитектуры к другой, с целью повышения качества решений за счет установления между агентами отношений, релевантных условиям решаемой задачи. Критерии качества решения задаются разработчиком ГиИМАС на этапе ее создания либо ее пользователем в процессе функционирования. Это, однако, не означает появление внешнего источника управления. Архитектура ГиИМАС с самоорганизацией может и должна меняться, даже если критерий качества остается неизменным.

Согласно (4.14) каждая функция агента представляется двухкомпонентным кортежем ( $MET_{ag}, IT_{ag}$ ). Как следствие (4.14), в ГиИМАС должно использоваться не менее двух интеллектуальных технологий, чтобы она могла считаться ГиИС и быть релевантной сложным в моделировании задачам. Кроме того, в (4.13) выделяются две функции АПР для управления взаимодействием агентов ГиИМАС:  $act_{ia}$  – функция «анализ взаимодействий» и  $act_{ac}$  – функция «выбор архитектуры». Рассмотрим алгоритмы этих функций.

Исходная информация для функции «анализ взаимодействия» – цели агентов  $pr^{gsu}$ , где результат – тип базовой архитектуры ГиИМАС  $org$  по степени согласованности взаимодействия агентов в виде строки текста, т.е. отнесение текущей архитектуры ГиИМАС  $org_i, i = 1, \dots, N$ , к одному из множеств  $ORG_{coop}$ ,  $ORG_{neut}$  или  $ORG_{comp}$ , а  $N$  – число базовых архитектур ГиИМАС (число элементов множества  $ORG$  в (4.9)). В результате выполнения функции «анализ взаимодействий» идентифицируется базовая архитектура ГиИМАС, что позволяет АПР, с помощью функции «выбор архитектуры»  $f_{ac}$  определить необходимость (или отсутствие таковой) ее модификации для улучшения качества решений. Таким образом, изменяется архитектура ГиИМАС на одну из множества  $ORG$  (4.9) и происходит самоорганизация системы. Блок-схема алгоритма функции «анализ взаимодействий» представлена на рис. 4.4, цифрами на блоках отмечено их соответствие шагам алгоритма 4.1.

Алгоритм 4.1:

1) начало;

- 2) записать цели агентов в виде нечетких целей  $pr^{gsu}$  (4.1), для чего целевые значения каждого свойства из состояния объекта управления, представить нечетким множеством;
- 3) исключить из рассмотрения агентов, безразличных к состоянию объекта управления, чья нечеткая цель – константа;
- 4) вычислить для каждой пары агентов меру сходства целей по (4.3);
- 5) определить класс отношений  $rcl$  для каждой пары агентов на основании значения меры сходства, применив отображение (4.7), получить матрицу **RCL** ;
- 6) для каждой пары конкурирующих (нейтральных) агентов найти агента, сотрудничающего с обоими агентами, и заменить в матрице, полученной на четвертом шаге, тип отношений между этим агентом и каждым из конкурирующих (нейтральных) агентов на нейтральный, получив модифицированную матрицу **RCL'**; если ни для одной пары конкурирующих (нейтральных) агентов не существует ни одного агента, сотрудничающего с обоими агентами, перейти к п. 6);
- 7) на основе модифицированной матрицы **RCL'** идентифицировать тип архитектуры ГиИМАС в целом; если в **RCL'** присутствуют только нейтральные отношения, архитектура ГиИМАС относится к типу ГиИМАС с нейтральными агентами, если же в ней присутствуют отношения сотрудничества или конкуренции, архитектура ГиИМАС относится к типу ГиИМАС с сотрудничающими агентами или ГиИМАС с конкурирующими агентами, соответственно;
- 8) конец.

Анализ алгоритма 4.1 показал, что он удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к алгоритмам: результативность, конечность, определенность, массовость, детерминированность. Алгоритм выполняется за конечное число шагов, зависящее от количества агентов ГиИМАС, независимо от исходных данных. Он обладает полиномиальной вычислительной сложностью  $O(n^3)$ , где  $n$  – количество агентов ГиИМАС.

После определения типа архитектуры ГиИМАС агент, принимающий решения, с помощью функции «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  может установить необходимость замены одного типа отношений агентов на другой и корректировки их целей. Однако, очевидно, что для принятия решения о замене одной архитектуры ГиИМАС на другую сведений только о текущем типе архитектуры ГиИМАС недостаточно. Для подобного решения АПР необходима база знаний о том, какой из типов архитектур ГиИМАС эффективнее в тех или иных условиях, для того или иного класса задач. Например, для тестовой задачи – СТЛЗ – это классы задачи по размерности, топологическим особенностям, числу транспортных средств, степени обобщенности [86].

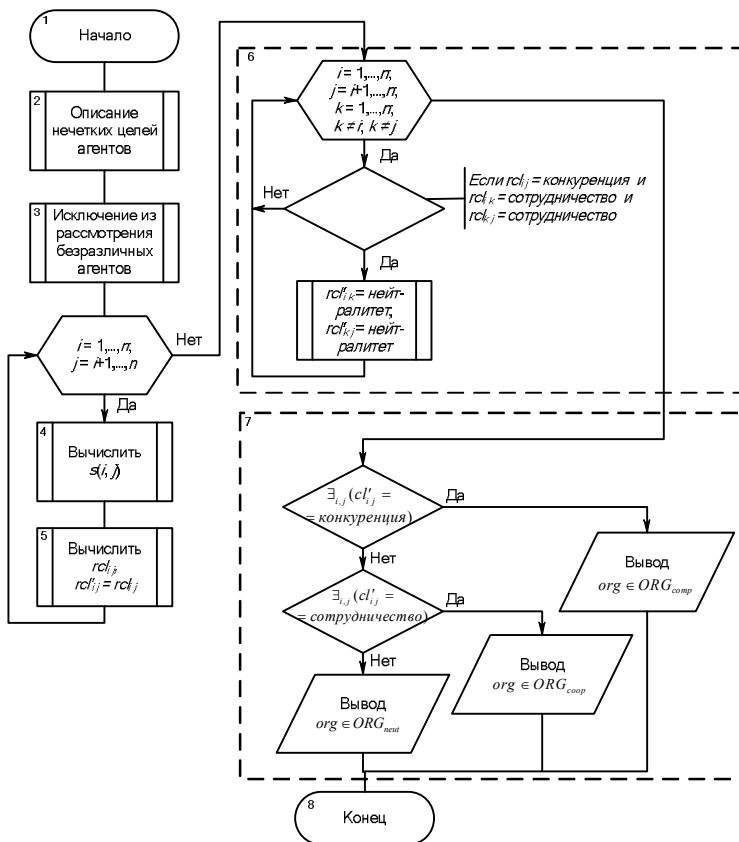


Рис. 4.4 – Блок-схема алгоритма функции «анализ взаимодействий»

В результате анализа методов построения баз знаний для реализации функции «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  были выбраны системы нечеткого вывода. В пользу такого выбора говорит то, что концепция нечеткой логики легка для понимания, она «терпима» к неточностям информации; основывается на опыте людей; система нечеткого вывода может корректировать базу знаний, если реализовать механизм ее самообучения, подобный используемому в нейронных сетях. Определим алгоритм функции «выбор архитектуры»  $act_{ac}$ , а также лингвистические переменные, используемые в правилах нечеткой базы знаний АПР применительно к условиям СТЛЗ (разд. 4.4). Сами правила извлечены в результате вычислительных экспериментов в разд. 4.4.



Исходные данные функции «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  – условия решаемой задачи. Результат – значение степени уверенности [177] в выборе каждой архитектуры ГиИМАС, а также корректировка базы знаний АПР. Функция моделирует работу ЛППР по выбору ситуации коллективного решения сложной задачи в СППР и его способность к накоплению опыта руководства СППР, т.е. эффект самообучения ЛППР.

Функция  $act_{ac}$  выполняется в соответствии с моделью  $mod_{ac}$  (4.17) и алгоритмом  $alg_{ac}$  (алгоритм 4.2, рис. 4.5):

$$act_{ac} = r_1^{act\ mod} (act_{ac}, mod_{ac}) \circ r_1^{act\ alg} (act_{ac}, alg_{ac}), \quad (4.16)$$

где  $mod_{ac}$  – модель нечеткого вывода;  $alg_{ac}$  – алгоритм функции «выбор архитектуры»;  $r_1^{act\ mod}$  – отношение между действием и его моделью;  $r_1^{act\ alg}$  – отношение между действием и его алгоритмом.

Модель нечеткого вывода АПР  $mod_{ac}$  можно сформулировать следующим образом:

$$mod_{ac} = \langle RUL, X, Y, F^\mu, F^y, F^{sl}, I^{fsl} \rangle, \quad (4.17)$$

где  $RUL$  – база знаний, как множество символьных правил  $rul_k, k = 1, \dots, N_{RUL}$ , использующих в качестве посылок и заключений нечеткие множества  $A_i^k, B_j^k$ , соответственно, причем такие, что  $A_i^k \subseteq X_i, B_j^k \subseteq Y_j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ ;  $X, Y$  – множества входных и выходных лингвистических переменных соответственно;  $F^\mu = F_X^\mu \cup F_Y^\mu$  – множество функций принадлежности нечетких переменных входных и выходных лингвистических переменных, соответственно;  $F^y$  – множество функций дефаззификации;  $F^{sl}$  – множество функций корректировки параметров функций принадлежности нечетких переменных из множества  $F^\mu$ . Интерпретатор  $I^{fsl}$ , определяется следующим образом:

$$I^{fsl} = \{I^{fsl1}, I^{fsl2}, I^{fsl3}, I^{fsl4}, I^{fsl5}, I^{fsl6}, I^{fsl7}, I^{fsl8}, I^{fsl9}\},$$

где  $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl5}$  – процессы стандартной системы нечеткого вывода Мамдани [5]:  $I^{fsl1}$  – фаззификация,  $I^{fsl2}$  – агрегирование,  $I^{fsl3}$  – активация,  $I^{fsl4}$  – аккумуляция,  $I^{fsl5}$  – дефаззификация;  $I^{fsl6}$  – выбор архитектуры;  $I^{fsl7}$  – решение СТЛЗ;  $I^{fsl8}$  – определение ошибки;  $I^{fsl9}$  – обучение. Процессы  $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl9}$  выполняются итерационно:

$$I^{fsl1} \rightarrow I^{fsl2} \rightarrow I^{fsl3} \rightarrow I^{fsl4} \rightarrow I^{fsl5} \rightarrow I^{fsl6} \rightarrow I^{fsl7} \rightarrow I^{fsl8} \rightarrow I^{fsl9}. \quad (4.18)$$

Модель (4.17) – система нечеткого вывода Мамдани с самообучением. Процессы самообучения  $I^{fsl6}, \dots, I^{fsl9}$  позволяют системе модифицировать знания о предметной области, чтобы, во-первых, скорректировать возможные ошибки разработчика при их определении, а, во-вторых, автоматически поддерживать базу знаний в актуальном состоянии с течением времени и изменением условий задачи. Кроме того, благодаря применению нечеткого вывода Мамдани [1] сохраняется прозрачность базы знаний для интерпретации человеком в отличие от систем нечеткого вывода Такаги-Сугено [177] или нейронечетких гибридов: ANFIS [178], GARIC [179], SONFIN [180], за счет того, что в консеквенте правила присутствуют лингвистические переменные. Это согласуется с подходом [181, 182], однако, в предлагаемой системе обучение идет по алгоритму обратного распространения ошибки. Рассмотрим содержание процессов  $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl9}$  из (4.18).

*Нечеткий вывод*  $I^{fsl1}, \dots, I^{fsl5}$  выполняется с использованием системы Мамдани [1]. На ее вход подаются сведения (размерность) о решаемой задаче в виде детерминированной переменной. Результат работы системы – значения степеней уверенности в выборе архитектуры ГиИМАС в виде детерминированных переменных. В правилах нечеткой базы знаний входная лингвистическая переменная – «размерность СТЛЗ»  $sz$ , а выходные – «степень уверенности в выборе ГиИМАС с сотрудничающими агентами»  $pcp$ , «степень уверенности в выборе ГиИМАС с нейтральными агентами»  $pnt$  и «степень уверенности в выборе ГиИМАС с конкурирующими агентами»  $pcn$ .

Определим лингвистическую переменную  $sz$  «размерность СТЛЗ»:

$$sz = \langle \beta^{sz}, T^{sz}, U^{sz}, G^{sz}, M^{sz} \rangle,$$

где  $\beta^{sz}$  = «размерность СТЛЗ» – наименование лингвистической переменной;  $T^{sz} = \{ \text{«малая»}, \text{«средняя»}, \text{«большая»} \}$  – множество ее значений (терм-множество), наименований нечеткой переменной;  $U^{sz} = [3; 100]$  – область определения (универсум) нечетких переменных, входящих в определение лингвистической переменной (левая граница обусловлена тем, что СТЛЗ с числом клиентов менее 3 не имеет смысла, так как возможен только один маршрут; правая граница определяется эвристическим соотношением вычислительной сложности

СТЛЗ и возможностями современных ЭВМ, так как маловероятно, что СТЛЗ такой размерности смогут быть решены в ближайшее время);  $G^{sz} = \emptyset$  – синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из элементов множества  $T^{sz}$  новых термов;  $M^{sz} = \{\mu_{малая}^{sz}(u^{sz}), \mu_{средняя}^{sz}(u^{sz}), \mu_{большая}^{sz}(u^{sz})\}$  – семантическая процедура, ставящая в соответствие каждому терму множества  $T^{sz}$ , а также каждому новому терму, образуемому процедурой  $G^{sz}$ , осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества.

Функции принадлежности нечетких множеств из  $M^{sz}$  описываются выражениями:

$$\begin{aligned} \mu_{малая}^{sz}(u^{sz}) &= \left(1 + e^{-a_{sz1}(u_{sz} - c_{sz1})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{sz1} = -0,375, c_{sz1} = 15, \\ \mu_{средняя}^{sz}(u^{sz}) &= e^{-\frac{(u_{sz} - c_{sz2})^2}{2\sigma_{sz2}^2}}, \text{ где } \sigma_{sz2} = 10, c_{sz2} = 30, \\ \mu_{большая}^{sz}(u^{sz}) &= \left(1 + e^{-a_{sz3}(u_{sz} - c_{sz3})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{sz3} = 0,375, c_{sz3} = 45, \end{aligned}$$

где значения параметров  $a_{sz1}$ ,  $c_{sz1}$ ,  $\sigma_{sz2}$ ,  $c_{sz2}$ ,  $a_{sz3}$ ,  $c_{sz3}$  заданы приближенно и должны быть скорректированы в ходе «самообучения» системы нечеткого вывода.

Определим лингвистические переменные  $pcp$ ,  $pnt$ ,  $pcn$  выражениями:

$$\begin{aligned} pcp &= \langle \beta^{pcp}, T^{pcp}, U^{pcp}, G^{pcp}, M^{pcp} \rangle, \\ pnt &= \langle \beta^{pnt}, T^{pnt}, U^{pnt}, G^{pnt}, M^{pnt} \rangle, \\ pcn &= \langle \beta^{pcn}, T^{pcn}, U^{pcn}, G^{pcn}, M^{pcn} \rangle, \end{aligned}$$

где  $\beta^{pcp}$  = «степень уверенности в выборе ГиИМАС с сотрудничающими агентами  $org_{coop}$ »,  $\beta^{pnt}$  = «степень уверенности в выборе ГиИМАС с нейтральными агентами  $org_{neu}$ »,  $\beta^{pcn}$  = «степень уверенности в выборе ГиИМАС с конкурирующими агентами  $org_{conc}$ » – наименования лингвистических переменных;  $T^{pcp} = T^{pnt} = T^{pcn} = \{\langle \text{«низкая»}, \text{«средняя»}, \text{«высокая»} \rangle\}$  – множества их значений (терм-множество), каждое из которых – наименование нечеткой переменной;  $U^{pcp} = U^{pnt} = U^{pcn} = [0; 1]$  – области определения (универсумы) нечетких переменных, входящих в определения лингвистических переменных;  $G^{pcp} = G^{pnt} = G^{pcn} = \emptyset$  – синтаксические процедуры, описывающие процессы образования из элементов множества  $T^{pcp}$ ,  $T^{pnt}$ ,  $T^{pcn}$  новых термов;  $M^{pcp} = \{\mu_{низкая}^{pcp}(u^{pcp}), \mu_{средняя}^{pcp}(u^{pcp}), \mu_{высокая}^{pcp}(u^{pcp})\}$ ,  $M^{pnt} = \{\mu_{низкая}^{pnt}(u^{pnt})\}$ ,

$\mu_{\text{средняя}}^{\text{pnt}}(u^{\text{pnt}}), \mu_{\text{высокая}}^{\text{pnt}}(u^{\text{pnt}})\}$ ,  $M^{\text{pcn}} = \{\mu_{\text{низкая}}^{\text{pcn}}(u^{\text{pcn}}), \mu_{\text{средняя}}^{\text{pcn}}(u^{\text{pcn}}), \mu_{\text{высокая}}^{\text{pcn}}(u^{\text{pcn}})\}$  – семантические процедуры, ставящие в соответствие каждому терму множества  $T^{\text{pcp}}, T^{\text{pnt}}, T^{\text{pcn}}$ , а также каждому новому терму, образуемому процедурой  $G^{\text{pcp}}, G^{\text{pnt}}, G^{\text{pcn}}$ , осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества. Функции принадлежности нечетких множеств из  $M^{\text{pcp}}, M^{\text{pnt}}, M^{\text{pcn}}$  описываются выражениями:

$$\mu_{\text{низкая}}^{\text{pcp}}(u^{\text{pcp}}) = \left(1 + e^{-a_{\text{pcp}1}(u_{\text{pcp}} - c_{\text{pcp}1})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{\text{pcp}1} = -25, c_{\text{pcp}1} = 0,34,$$

$$\mu_{\text{средняя}}^{\text{pcp}}(u^{\text{pcp}}) = e^{\frac{(u_{\text{pcp}} - c_{\text{pcp}2})^2}{2\sigma_{\text{pcp}2}^2}}, \text{ где } \sigma_{\text{pcp}2} = 0,13, c_{\text{pcp}2} = 0,5,$$

$$\mu_{\text{высокая}}^{\text{pcp}}(u^{\text{pcp}}) = \left(1 + e^{-a_{\text{pcp}3}(u_{\text{pcp}} - c_{\text{pcp}3})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{\text{pcp}3} = 25, c_{\text{pcp}3} = 0,66,$$

$$\mu_{\text{низкая}}^{\text{pnt}}(u^{\text{pnt}}) = \left(1 + e^{-a_{\text{pnt}1}(u_{\text{pnt}} - c_{\text{pnt}1})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{\text{pnt}1} = -25, c_{\text{pnt}1} = 0,34,$$

$$\mu_{\text{средняя}}^{\text{pnt}}(u^{\text{pnt}}) = e^{\frac{(u_{\text{pnt}} - c_{\text{pnt}2})^2}{2\sigma_{\text{pnt}2}^2}}, \text{ где } \sigma_{\text{pnt}2} = 0,13, c_{\text{pnt}2} = 0,5,$$

$$\mu_{\text{высокая}}^{\text{pnt}}(u^{\text{pnt}}) = \left(1 + e^{-a_{\text{pnt}3}(u_{\text{pnt}} - c_{\text{pnt}3})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{\text{pnt}3} = 25, c_{\text{pnt}3} = 0,66,$$

$$\mu_{\text{низкая}}^{\text{pcn}}(u^{\text{pcn}}) = \left(1 + e^{-a_{\text{pcn}1}(u_{\text{pcn}} - c_{\text{pcn}1})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{\text{pcn}1} = -25, c_{\text{pcn}1} = 0,34$$

$$\mu_{\text{средняя}}^{\text{pcn}}(u^{\text{pcn}}) = e^{\frac{(u_{\text{pcn}} - c_{\text{pcn}2})^2}{2\sigma_{\text{pcn}2}^2}}, \text{ где } \sigma_{\text{pcn}2} = 0,13, c_{\text{pcn}2} = 0,5,$$

$$\mu_{\text{высокая}}^{\text{pcn}}(u^{\text{pcn}}) = \left(1 + e^{-a_{\text{pcn}3}(u_{\text{pcn}} - c_{\text{pcn}3})}\right)^{-1}, \text{ где } a_{\text{pcn}3} = 25, c_{\text{pcn}3} = 0,66,$$

в которых значения параметров  $a_{\text{pcp}1}, c_{\text{pcp}1}, \sigma_{\text{pcp}2}, c_{\text{pcp}2}, a_{\text{pcp}3}, c_{\text{pcp}3}, a_{\text{pnt}1}, c_{\text{pnt}1}, \sigma_{\text{pnt}2}, c_{\text{pnt}2}, a_{\text{pnt}3}, c_{\text{pnt}3}, a_{\text{pcn}1}, c_{\text{pcn}1}, \sigma_{\text{pcn}2}, c_{\text{pcn}2}, a_{\text{pcn}3}, c_{\text{pcn}3}$  заданы приблизительно и скорректируются в ходе «самообучения» системы нечеткого вывода.

Рассмотренные лингвистические переменные связываются множеством  $RUL$  правил системы нечеткого вывода Мамдани [1]. Правила имеют вид:  $ant_i \xrightarrow{rul_i} cns_i$ , где  $ant_i$  – антецедент  $i$ -го правила  $rul_i$ ,  $cns_i$  – консеквент  $i$ -го правила  $rul_i$ ,  $i = 1, \dots, N_{rul}$ , где  $N_{rul}$  – число правил нечеткой базы знаний агента, принимающего решения. Множество правил  $RUL$  определено экспериментально в разд. 4.4.

Нечеткий вывод Мамдани с самообучением состоит из этапов:

1) фаззификация  $I^{fs1}$  для установления соответствия между значениями  $u^{sz} \in U^{sz}$  и значением функции принадлежности соответствующего

терма лингвистической переменной  $sz$ : для каждого термина  $t^{sz} \in T^{sz}$  вычисляется значение  $y_{isz}^{fuz} = \mu_{isz}^{sz}(u^{sz})$ ;

2) агрегирование  $I^{fsl2}$  выполняется, так как используется только одна входная нечеткая переменная. Степень истинности  $y_i^{agr}$  посылки  $ant_i$  правила  $rul_i$  соответствует значению степени истинности  $y_{isz}^{fuz}$  термина  $t_{sz}$  входной переменной из  $ant_i$ ;

3) активация  $I^{fsl3}$  – для каждого термина  $t_{pcp} \in T_{pcp}$ ,  $t_{pnt} \in T_{pnt}$ ,  $t_{pcn} \in T_{pcn}$  выходных лингвистических переменных  $pcp$ ,  $pnt$ ,  $pcn$ , входящего в заключение  $cnz_i$  правила  $rul_i$ , определяется функция принадлежности с учетом степени истинности посылки, с помощью метода min-активации:  
 $\mu_{pcp\ i}^{pcp}(u^{pcp}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{pcp}^{pcp}(u^{pcp}))$ ,  $\mu_{pnt\ i}^{pnt}(u^{pnt}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{pnt}^{pnt}(u^{pnt}))$ ,  
 $\mu_{pcn\ i}^{pcn}(u^{pcn}) = \min(y_i^{agr}, \mu_{pcn}^{pcn}(u^{pcn}))$ ;

4) аккумуляция  $I^{fsl4}$  – для каждой выходной лингвистической переменной определяются итоговые функции принадлежности  $\mu^{pcp}$ ,  $\mu^{pnt}$ ,  $\mu^{pcn}$  объединением функций принадлежности термов  $\mu_{pcp\ i}^{pcp}$ ,  $\mu_{pnt\ i}^{pnt}$ ,  $\mu_{pcn\ i}^{pcn}$ , активированных на предыдущем шаге. Вид функций принадлежности определяется по правилам:  $\mu^{pcp}(u^{pcp}) = \max_i(\mu_{pcp\ i}^{pcp}(u^{pcp}))$ ,  $\mu^{pnt}(u^{pnt}) = \max_i(\mu_{pnt\ i}^{pnt}(u^{pnt}))$ ,  $\mu^{pcn}(u^{pcn}) = \max_i(\mu_{pcn\ i}^{pcn}(u^{pcn}))$ ;

5) дефаззификация  $I^{fsl5}$ . Результаты дефаззификации переменных  $pcp$ ,  $pnt$ ,  $pcn$  – вещественные числа  $u^{pcp}$ ,  $u^{pnt}$ ,  $u^{pcn}$ , соответственно, которые получаются с использованием центроидного метода дефаззификации:

$$u^{pcp} = \frac{\int_{U^{pcp}} u^{pcp} \mu^{pcp}(u^{pcp}) du^{pcp}}{\int_{U^{pcp}} \mu^{pcp}(u^{pcp}) du^{pcp}}, \quad u^{pnt} = \frac{\int_{U^{pnt}} u^{pnt} \mu^{pnt}(u^{pnt}) du^{pnt}}{\int_{U^{pnt}} \mu^{pnt}(u^{pnt}) du^{pnt}},$$

$$u^{pcn} = \frac{\int_{U^{pcn}} u^{pcn} \mu^{pcn}(u^{pcn}) du^{pcn}}{\int_{U^{pcn}} \mu^{pcn}(u^{pcn}) du^{pcn}};$$

в результате вычисляются четкие значения выходных лингвистических переменных: «степень уверенности в выборе ГиИМАС с сотрудничающими агентами»  $pcp$ , «степень уверенности в выборе ГиИМАС с нейтральными агентами»  $pnt$  и «степень уверенности в выборе ГиИМАС с конкурирующими агентами»  $pcn$  – т.е. для каждой архитектуры ГиИМАС определяется значение уверенности в ее выборе для решения

СТЛЗ, используемое на следующем шаге алгоритма 4.2 для выбора архитектуры;

6) *выбор архитектуры*  $I^{fs15}$ . Степени уверенности выбора архитектур с предыдущего шага, нормализуются, чтобы их сумма была равна единице:  $u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn} = 1$ , по правилам:  $u^{pcp'} = u^{pcp} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$ ,  $u^{pnt'} = u^{pnt} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$ ,  $u^{pcn'} = u^{pcn} / (u^{pcp} + u^{pnt} + u^{pcn})$ , и архитектура ГиИМАС  $org$  выбирается случайным образом среди  $org_{coop}$ ,  $org_{neut}$ ,  $org_{conc}$  в соответствии с нормализованными значениями степенями  $u^{pcp'}$ ,  $u^{pnt'}$ ,  $u^{pcn'}$ , соответственно;

7) *решение сложной задачи*  $I^{fs17}$ . Выполняется моделирование работы СППР методом пула мозговой записи [183] с использованием выбранной архитектуры ГиИМАС; функциональная структура ГиИМАС для решения СТЛЗ представлена в разд. 4.3; при этом АПР «наблюдает» за ходом решения сложной задачи и фиксирует наличие  $syn = 1$  или отсутствие  $syn = 0$  проявления синергетического эффекта, т.е. получила ли СППР более качественное решение по сравнению с решениями отдельных экспертов;

8) *определение абсолютной ошибки нечеткого вывода*  $I^{fs18}$ . Выполняется в соответствии с выражением:

$$er = 0,5 \cdot ((d^{pcp} - u^{pcp'})^2 + (d^{pnt} - u^{pnt'})^2 + (d^{pcn} - u^{pcn'})^2), \quad (4.19)$$

где  $er$  – абсолютная ошибка нечеткого вывода;  $d^{pcp}$ ,  $d^{pnt}$ ,  $d^{pcn}$  – желаемые АПР значения степеней уверенности выбора архитектур  $u^{pcp}$ ,  $u^{pnt}$ ,  $u^{pcn}$ , т.е. значения при которых вероятность выбора архитектуры вызывающей синергетический эффект при данных условиях задачи была бы выше; значения  $d^{pcp}$ ,  $d^{pnt}$ ,  $d^{pcn}$  определяются по следующему правилу: если соответствующая архитектура ГиИМАС не была выбрана для решения СТЛЗ, желаемое значение  $d^i$  соответствует полученному значению  $u^i$ ,  $i \in \{ "pcp", "pnt", "pcn" \}$ , если же она была выбрана, но не привела к синергетическому эффекту  $syn = 0$ , то  $d = 0$ , в противном случае, при появлении синергетического эффекта ( $syn = 1$ ),  $d = 1$ ; формально это правило записывается как:

$$d^{pcp} = \begin{cases} u^{pcp}, & org \neq org_{coop}, \\ 0, & org = org_{coop}, syn = 0, \\ 1, & org = org_{coop}, syn = 1, \end{cases} \quad d^{pnt} = \begin{cases} u^{pnt}, & org \neq org_{neut}, \\ 0, & org = org_{neut}, syn = 0, \\ 1, & org = org_{neut}, syn = 1, \end{cases}$$

$$d^{pcn} = \begin{cases} u^{pcn}, & org \neq org_{conc}, \\ 0, & org = org_{conc}, syn = 0, \\ 1, & org = org_{conc}, syn = 1. \end{cases}$$

9) обучение  $I^{fs19}$  системы нечеткого вывода. Здесь корректируются параметры функций принадлежности входной  $sz$  и выходных  $pcp$ ,  $pnt$ ,  $pcn$  лингвистических переменных; при обучении используется метод градиентного спуска с переменным коэффициентом обучения [184]:

$$par(t+1) = par(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial par}, \quad (4.20)$$

где  $par$  – любой из параметров функций принадлежности ( $a_{sz1}$ ,  $c_{sz1}$ ,  $\sigma_{sz2}$ ,  $c_{sz2}$ ,  $a_{sz3}$ ,  $c_{sz3}$ ,  $a_{pcp1}$ ,  $c_{pcp1}$ ,  $\sigma_{pcp2}$ ,  $c_{pcp2}$ ,  $a_{pcp3}$ ,  $c_{pcp3}$ ,  $a_{pnt1}$ ,  $c_{pnt1}$ ,  $\sigma_{pnt2}$ ,  $c_{pnt2}$ ,  $a_{pnt3}$ ,  $c_{pnt3}$ ,  $a_{pcn1}$ ,  $c_{pcn1}$ ,  $\sigma_{pcn2}$ ,  $c_{pcn2}$ ,  $a_{pcn3}$ ,  $c_{pcn3}$ ), входящих в определения входной или выходных лингвистических переменных;  $t$  – порядковый номер решаемой СТЛЗ (итерация обучения системы нечеткого вывода);  $\eta$  – шаг коррекции,  $0 < \eta < 1$ ,  $\eta(t) = t^{-1}$ ; для параметров  $par_{pcp}$ ,  $par_{pnt}$ ,  $par_{pcn}$  функций принадлежности выходных переменных  $pcp$ ,  $pnt$ ,  $pcn$  выражение (4.20) переписывается:

$$\begin{aligned} par_{pcp}(t+1) &= par_{pcp}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pcp}} \frac{\partial u^{pcp}}{\partial par_{pcp}} = par_{pcp}(t) + \eta(d^{pcp} - u^{pcp}) \frac{\partial u^{pcp}}{\partial par_{pcp}}, \\ par_{pnt}(t+1) &= par_{pnt}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pnt}} \frac{\partial u^{pnt}}{\partial par_{pnt}} = par_{pnt}(t) + \eta(d^{pnt} - u^{pnt}) \frac{\partial u^{pnt}}{\partial par_{pnt}}, \\ par_{pcn}(t+1) &= par_{pcn}(t) - \eta \frac{\partial er}{\partial u^{pcn}} \frac{\partial u^{pcn}}{\partial par_{pcn}} = par_{pcn}(t) + \eta(d^{pcn} - u^{pcn}) \frac{\partial u^{pcn}}{\partial par_{pcn}}; \end{aligned}$$

для параметров  $par_{sz}$  функций принадлежности входной переменной  $sz$  выражение (4.20) переписывается:

$$\begin{aligned} par_{sz}(t+1) &= par_{sz}(t) + \eta \left( (d^{pcp} - u^{pcp}) \sum_{i=1}^{N_{mul}} \frac{\partial u^{pcp}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} + \right. \\ &\left. + (d^{pnt} - u^{pnt}) \sum_{i=1}^{N_{mul}} \frac{\partial u^{pnt}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} + (d^{pcn} - u^{pcn}) \sum_{i=1}^{N_{mul}} \frac{\partial u^{pcn}}{\partial y_i^{agr}} \frac{\partial y_i^{agr}}{\partial par_{sz}} \right); \end{aligned} \quad (4.21)$$

после подстройки параметров функций принадлежности входной лингвистической переменной этап обучения и работа системы нечеткого вывода заканчивается.



Рис. 4.5 – Блок-схема алгоритма функции «выбор архитектуры»

«выбор архитектуры» (процесс  $I^{fst8}$ ): в зависимости от эффективности взаимодействия агентов ГиИМАС при решении задачи на шаге 5 формируется значение абсолютной ошибки нечеткого вывода (4.19) на шаге 3;  
 7) обучение (процесс  $I^{fst9}$ ): на основе значения ошибки корректируется (4.20) функции принадлежности нечетких переменных системы нечеткого вывода, чтобы при последующих решениях задачи выбрать архитектуру ГиИМАС релевантную ее условиям и повысить качество принимаемых ГиИМАС решений;  
 8) конец.

При решении новой СТЛЗ система нечеткого вывода начинает работу с первого этапа уже с новыми значениями всех параметров функций принадлежности.

Описанный выше интерпретатор  $I^{fst}$  реализуется алгоритмом  $alg_{ac}$  функции «выбор архитектуры» (рис. 4.5, алгоритм 4.2), представим содержательное описание его блоков.

Алгоритм 4.2:

- 1) начало;
- 2) получение входных данных: функция «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  принимает на вход сведения о решаемой задаче (ее размерность);
- 3) нечеткий вывод (процессы  $I^{fst1}, \dots, I^{fst5}$ ): запускается система нечеткого вывода Мамдани [1], результат работы которой – значения степеней уверенности в выборе архитектуры ГиИМАС;
- 4) выбор архитектуры (процесс  $I^{fst6}$ ): в соответствии с полученными значениями степеней уверенности на шаге 3 случайным образом с вероятностями пропорциональными полученным степеням уверенности выбирается одна из архитектур ГиИМАС для решения СТЛЗ;
- 5) решение сложной задачи (процесс  $I^{fst7}$ ): задача решается ГиИМАС с использованием архитектуры, выбранной на шаге 4;
- 6) определение абсолютной ошибки нечеткого вывода (процесс  $I^{fst8}$ ):

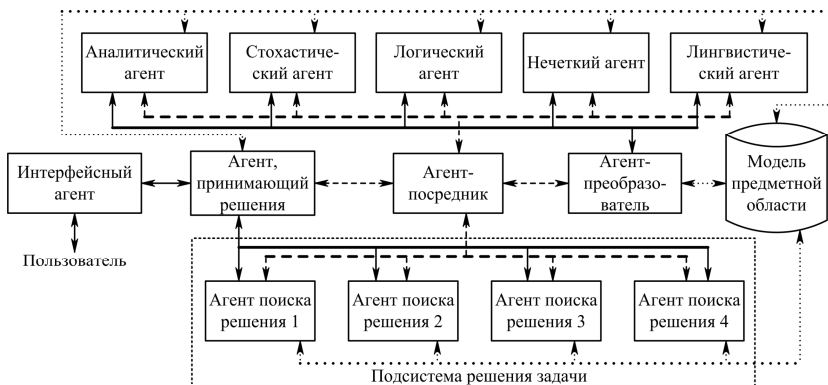


Обучение нечеткой базы знаний в алгоритме 4.2 основано на методе обратного распространения ошибки, наследуя достоинства и недостатки последнего. К недостаткам можно отнести низкую скорость сходимости и отсутствие гарантий сходимости [185]. Однако обучение нечеткой базы знаний позволяет за счет корректировки содержащихся в ней знаний накапливать опыт решения сложных задач и учитывать возможное изменение их параметров, подающихся на вход нечеткой системы, во времени. Кроме того, в отличие от системы нечеткого вывода Такаги-Сугено [1] применение алгоритма обратного распространения ошибки для обучения системы нечеткого вывода Мамдани не приводит к потере прозрачности базы знаний [182] за счет того, что в консеквенте правила присутствуют лингвистические переменные. Становится возможным извлекать знания полученные обучением и легко их интерпретировать.

### **4.3 Архитектура гибридной интеллектуальной многоагентной системы для решения сложной транспортно-логистической задачи**

Согласно выражениям (4.9) – (4.15) ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов, имитирующая в памяти компьютера работу СППР, должна удовлетворять следующим требованиям: 1) содержать множество агентов  $AG^*$ , один из которых – агент, принимающий решения  $ag_{dm}$ ; 2) специфицировать среду функционирования; 3) содержать элементы структурирования взаимодействий  $INT$ , т.е. определять  $prot$  – протокол взаимодействия агентов,  $lang$  – язык обмена сообщениями,  $ont$  – модель предметной области,  $rcl$  – классификатор отношений между агентами; 4) располагать несколькими архитектурами, относящимися к различным классам по степени сплоченности агентов:  $ORG_{coop}$ ,  $ORG_{neut}$ ,  $ORG_{comp}$ ; 5) имитировать в памяти компьютера эффекты самоорганизации  $so$  и самообучения  $sl$ ; 6) реализовывать, кроме функций агентов по решению задачи и других служебных функций агентов, функции «анализ взаимодействий»  $act_{ia}$ , «выбор архитектуры»  $act_{ac}$  и коллективную функцию  $act_{col}$ ; 7) использовать не менее двух интеллектуальных технологий; 8) обладать рекурсивностью, т.е. возможностью представить агента как ГиИМАС при рассмотрении на более низком уровне.

Для удовлетворения требований 1 – 8 в программной реализации ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов предлагается функциональная структура (рис. 4.6) [6, 124 – 126], в основу которой положена универсальная архитектура ГиИМАС из [186].



Обозначения:

- - взаимоотношения агентов: запросы информации, передача результатов их решения,
- - - - - взаимоотношения агентов: запросы помощи в решении подзадачи,
- ⋯⋯⋯ - взаимодействие (получение сведений из модели, обновление модели) агентов с моделью предметной области

Рис. 4.6 – Функциональная структура программного продукта «Транспортный маршрутизатор ТРАНСМАР» версия 1.1, реализующего ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов для решения СТЛЗ

Рассмотрим подробнее элементы ГиИМАС на рис. 4.6, и покажем, что она удовлетворяет указанным требованиям.

Структура содержит множество взаимодействующих агентов, причем один из них – АПР, этот агент, кроме прочего, реализует функции «анализ взаимодействий»  $act_{ia}$  и «выбор архитектуры»  $act_{ac}$ , что показано при рассмотрении его архитектуры на рис. 4.3. Кроме него в ГиИМАС для решения СТЛЗ присутствуют шесть агентов интеллектуальных технологий, помогающих агентам поиска решения оценить маршрут: аналитический, стохастический, логический, нечеткий, лингвистический и агент-преобразователь. Первые пять агентов по числу классов переменных, присутствующих в модели СТЛЗ, реализуют функции обработки соответствующих типов переменных в МФПС, шестой, при необходимости, выполняет преобразование типов переменных для обеспечения совместной работы всех агентов интеллектуальных технологий.

В предлагаемой функциональной структуре используются четыре агента поиска решения (по числу критериев оценки маршрута в СТЛЗ), выполняющие выработку и выбор решений СТЛЗ по критериям оптимальности. Критерии определяются целью агента, которая, в свою очередь, устанавливается агентом, принимающим решения, в зависимости от выбранной им архитектуры. Кроме того, в ГиИМАС есть интерфейсный агент, взаимодействующий с пользователем, и агент-посредник,

добавляющий, удаляющий или заменяющий агентов интеллектуальных технологий. При наличии агента, который может лучше выполнить те же задачи. Кроме того, при невозможности использования одного из агентов интеллектуальных технологий агент поиска решения может воспользоваться помощью другого, найдя его через агента-посредника. Таким образом, во время работы ГиИМАС взаимодействия между агентами возникают и разрешаются.

Для агентов разработаны архитектуры (рис. 4.7 – 4.11), а их функции даны в табл. 4.1.

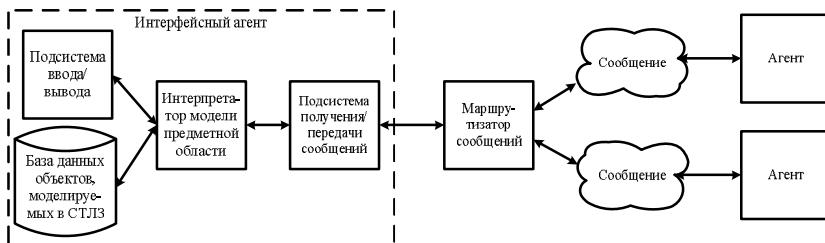


Рис. 4.7 – Архитектура интерфейсного агента

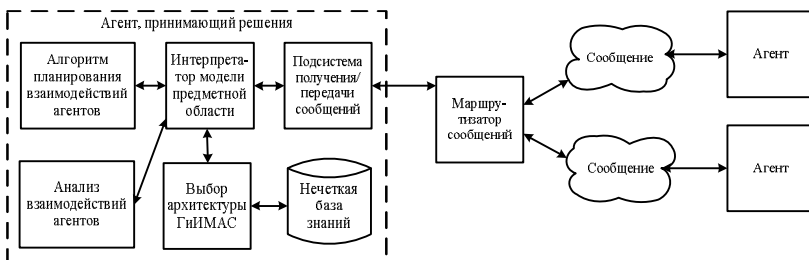


Рис. 4.8 – Архитектура агента, принимающего решения

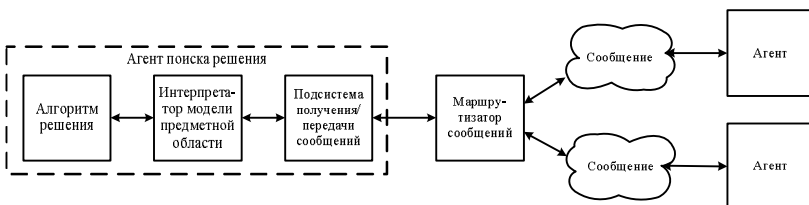


Рис. 4.9 – Архитектура агента поиска решения

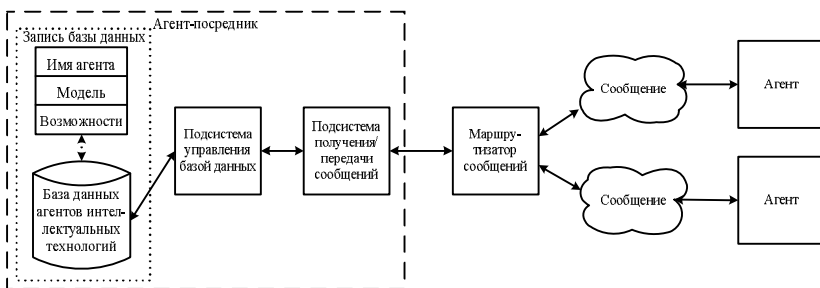


Рис. 4.10 – Архитектура агента-посредника

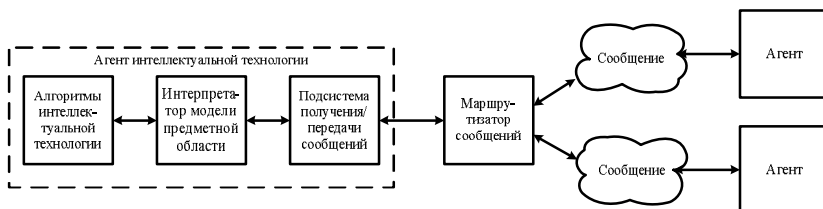


Рис. 4.11 – Архитектура агента интеллектуальной технологии

В ГиИМАС входят шесть агентов интеллектуальных технологий, четыре агента поиска решения, агент-посредник, интерфейсный агент и агент, принимающий решения, т.е. функциональная структура ГиИМАС удовлетворяет первому требованию к ГиИМАС с самоорганизацией из перечисленных в начале раздела.

Внешняя среда ПП ТРАНСМАР – пользователь, с которым взаимодействует интерфейсный агент (рис. 4.7). Таким образом, ГиИМАС находится в некоторой среде и взаимодействует с ней, т.е. удовлетворяет второму требованию к ГиИМАС с самоорганизацией.

Согласно третьему требованию к ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов, система должна содержать элементы структурирования взаимодействий *INT*, т.е. определять *prot* – протокол взаимодействия агентов (определяется алгоритмом планирования взаимодействия агентов АПР, на рис. 4.8), *lang* – язык обмена сообщениями (реализуется подсистемой получения/передачи сообщений каждого агента на рис. 4.7 – 4.11), *ont* – модель предметной области (рис. 4.6), *rcl* – классификатор отношений между агентами (реализуется блоком «анализ взаимодействия агентов» АПР, на рис. 4.8).

Модель предметной области *ont* – семантическая сеть – основа взаимосвязи агентов на концептуальной модели СТЛЗ [128], отображает отношения между понятиями СТЛЗ (разд. 4.4) и устанавливает порядок вычисления критериев оценки маршрута.

Таблица 4.1 – Функции агентов ПП «Транспортный маршрутизатор ТРАНСМАР»

Блок	Агент	Функция
Подсистема получения/передачи сообщений	Все агенты	Взаимодействие агента с другими агентами, запись сообщений на понятном другим агентам языке
Интерпретатор предметной области	Все, кроме агента-посредника	Интерпретирует смысл сообщений на модели предметной области. Отсутствует у агента-посредника
Подсистема ввода/вывода	Интерфейсный агент	Взаимодействует с пользователем, запрашивает входные данные, сообщает результат, обеспечивает возможность редактирования базы данных
База данных объектов, моделируемых в СТЛЗ	Интерфейсный агент	Хранит значения параметров объектов (сотрудники, клиенты, товары, транспортные средства и т.п.), определяет условия решаемой задачи
Алгоритм планирования взаимодействий агентов	Агент, принимающий решения	Определяет протокол взаимодействия агентов. Использует метод пула мозговой записи в СППР [183] и агрегирует решения агентов поиска решения
Анализ взаимодействий агентов	Агент, принимающий решения	Идентификация текущей архитектуры ГиИМАС по согласованности целей агентов и алгоритму 4.1
Выбор архитектуры ГиИМАС	Агент, принимающий решения	Имитирует работу ЛПР по выбору ситуации коллективного решения сложной задачи в СППР и самообучение ЛПР по алгоритму 4.2 и на модели из разд. 4.2. Использует нечеткую базу знаний по выбору архитектуры ГиИМАС
Нечеткая база знаний	Агент, принимающий решения	Описывает правила выбора архитектуры ГиИМАС в зависимости от параметров задачи. Лингвистические переменные даны в разд. 4.2. Правила сформулированы в разд. 4.4
Алгоритм решения	Агент поиска решения	В зависимости от условий задачи используются разные алгоритмы поиска решения; в условиях СТЛЗ используется алгоритм колонии муравьев [6] с критерием в виде значения нечеткой цели агента, принимающего решения. Так как СТЛЗ имеет сложность моделирования $q = (5, 7)$ [6] и решить ее одним методом колонии муравьев невозможно, алгоритм генерирует и выбирает маршруты. Для оценки качества маршрута агент поиска решения запрашивает агентов интеллектуальных технологий
Подсистема управления базой данных	Агент-посредник	Взаимодействует с базой данных (списком) агентов, хранящейся у агента посредника, добавляет, удаляет и ищет записи об агентах
База данных агентов интеллектуальных технологий	Агент-посредник	Хранит в виде записей информацию о зарегистрировавшихся у агента-посредника агентах и их возможностях
Алгоритмы интеллектуальной технологии	Агент интеллектуальной технологии	Имитирует рассуждения эксперта по алгоритму МФПС [6]: алгебраические уравнения; метод Монте-Карло; производционная экспертная система с рассуждениями в прямом направлении; алгоритм нечеткого вывода Мамдани. Решает подзадачи, передаваемые агентами поиска решения и другими агентами интеллектуальных технологий

Графическое представление модели предметной области *ont* в виде семантической сети разделено на две части: модель в целом (рис. 4.12) и более детальное рассмотрение ресурса «транспорт» СТЛЗ (рис. 4.13).

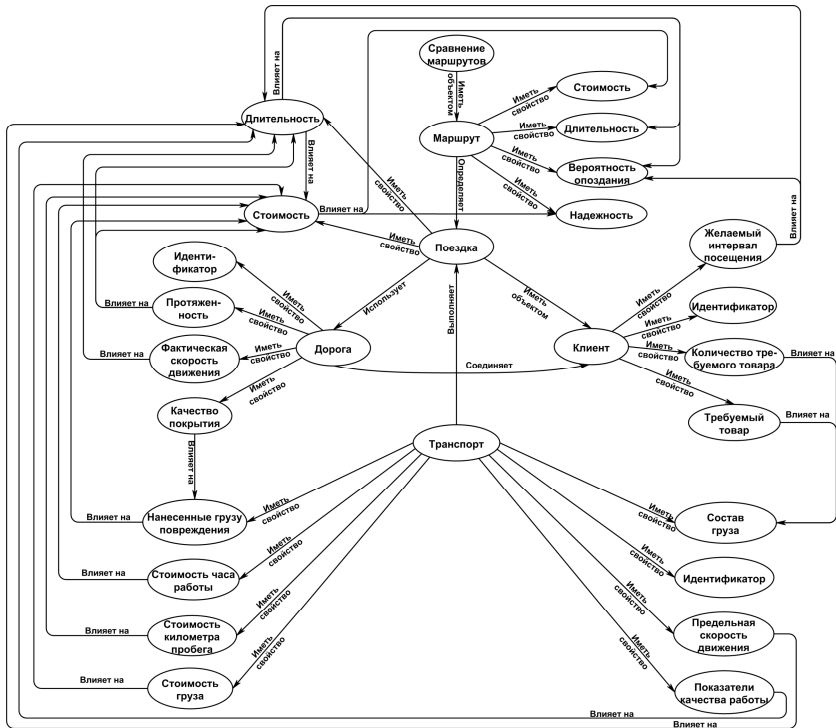


Рис. 4.12 – Семантическая сеть модели предметной области ПП «Транспортный маршрутизатор ТРАНСМАР»

Таким образом, в предложенной функциональной структуре ГИИМАС определены все элементы структурирования взаимодействий *INT*, т.е. она удовлетворяет третьему требованию из перечисленных в начале раздела.

Как было сказано выше, цель агента поиска решения не определена и устанавливается АПР. Таким образом, в зависимости от соотношения целей четырех агентов поиска решения архитектура ГИИМАС может относиться к одному из трех классов по степени сплоченности агентов:  $ORG_{coop}$ ,  $ORG_{neut}$ ,  $ORG_{comp}$ . Отсюда функциональная структура на рис. 4.6 соответствует четвертому требованию к ГИИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей.

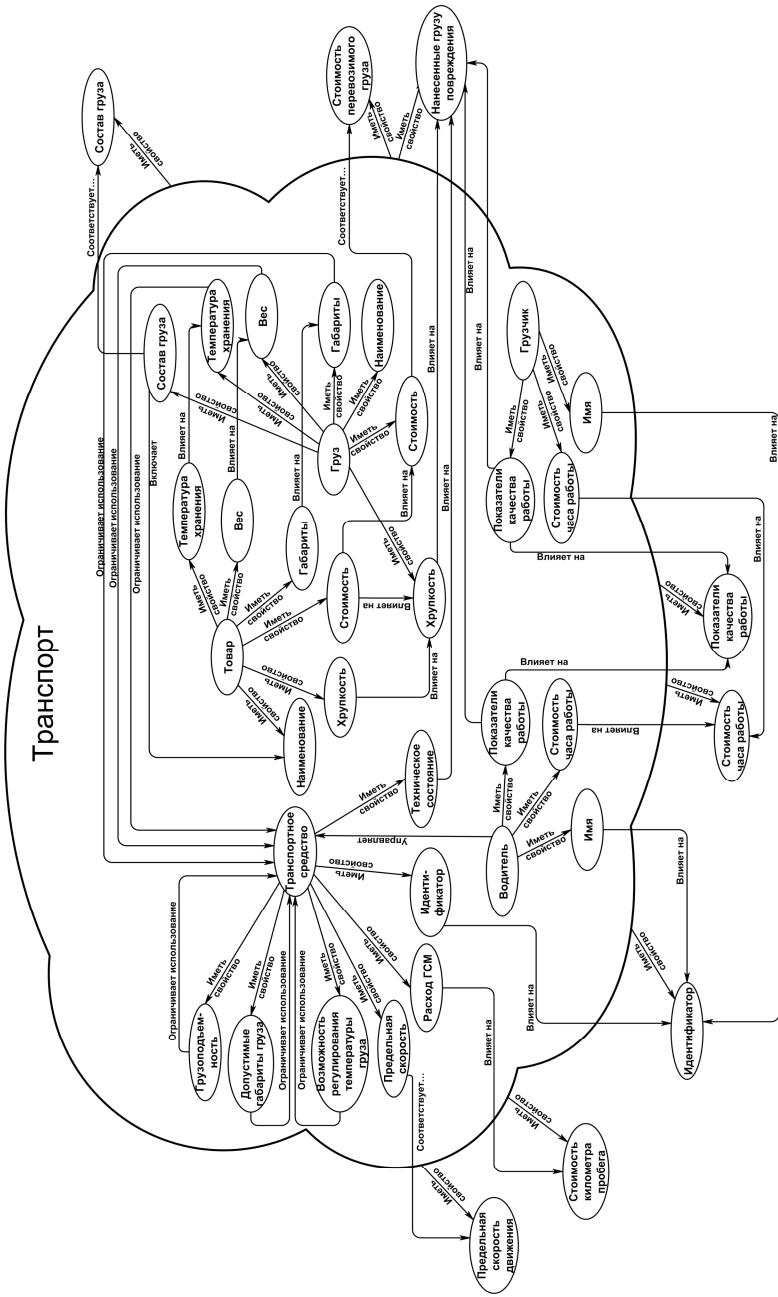


Рис. 4.13 — Семантическая сеть модели ресурса «транспорт»

Как показано в разд. 4.1, самоорганизация *so* в ГиИМАС – процесс изменения архитектуры ГиИМАС агентом, имитирующим ЛПР и входящим в ее состав, на основе анализа взаимодействия других агентов с целью повышения качества принимаемых ГиИМАС решений. Процесс самоорганизации реализуется функциями «анализ взаимодействий агентов»  $act_{ia}$  и «выбор архитектуры»  $act_{ac}$ , а эффект самообучения *sl* ЛПР — в соответствии с алгоритмом 4.2 функцией «выбор архитектуры» АПР, как накопление опыта по управлению ГиИМАС. Таким образом, предложенная функциональная структура соответствует пятому требованию к ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов.

Как было сказано выше, АПР реализует функции «анализ взаимодействий»  $act_{ia}$  и «выбор архитектуры»  $act_{ac}$ . Коллективная функция  $act_{col}$  – взаимодействие агентов ГиИМАС в соответствии с протоколом взаимодействия, задаваемым алгоритмом планирования взаимодействий агентов. Таким образом, предложенная функциональная структура соответствует шестому требованию к ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов.

На рис. 4.1 видно, что функциональная структура ГиИМАС содержит пять агентов интеллектуальных технологий, т.е. удовлетворяет седьмому требованию из перечисленных в начале раздела.

Согласно рис. 4.6 функциональная структура ГиИМАС не накладывает ограничений на архитектуру агентов. В случае с ГиИМАС для решения СТЛЗ этого не потребовалось. Кроме того, сама ГиИМАС может быть агентом более общей ГиИМАС, взаимодействующей с последней через интерфейсного агента. Таким образом, соблюдается принцип рекурсивности, и функциональная структура соответствует восьмому требованию к ГиИМАС из перечисленных в начале раздела.

Проведенный выше анализ предложенной функциональной структуры ПП «Транспортный маршрутизатор ТРАНСМАР» и архитектур его агентов показал, что данное программное средство соответствует модели ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов (4.9) – (4.15). Его программная реализация выполнима с использованием любого современного языка объектно-ориентированного программирования, однако в настоящее время существуют и специальные средства разработки МАС. В результате анализа их характеристик [127, 170] для программной реализации ПП ТРАНСМАР выбрана среда JADE.

Разработанный ПП «Транспортный маршрутизатор ТРАНСМАР» состоит из 57 модулей, разбитых на три пакета: «agents» – девять модулей, описывающих агентов ГиИМАС; «interface» – пять модулей пользовательского интерфейса; «ontology» – 43 модуля, описывающих кон-



цептуальную модель СТЛЗ. Общий объем исходного кода превысил девять тысяч строк. В табл. 4.2 представлена модульная структура ПП.

Таблица 4.2 – Модульная структура ПП ТРАНСМАР

Пакет	Модули	Функции
Agents	Int_agent.java, Planning_agent.java, Task_solving_agent.java, An_agent.java, St_agent.java, Lo_agent.java, Li_agent.java, Fu_agent.java, Tran_agent.java	Функции агентов
Interface	Model.java, Settings.java, About.java, Dirs.java, Progress.java	Пользовательский интерфейс
Ontology	Szk_ontology.java, Architecture.java, Cargo.java, Client.java, Driver.java, Error.java, Good.java, Loader.java, Order.java, Road.java, Route.java, TS.java, Trip.java, Vehicle.java, Deterministic_variable.java, Findcargo_depth.java, Findcargo_dimensions.java, Findcargo_fragility.java, Findcargo_height.java, Findcargo_stor_temp.java, Findcargo_weight.java, Findcargo_width.java, Findroute.java, Findroute_cost.java, Findroute_delay.java, Findroute_duration.java, Findroute_reliability.java, Findtrip_cost.java, Findtrip_duration.java, Findts_cargo_cost.java, Findts_cargo_damage.java, Findts_cargo_structure.java, Findts_id.java, Findts_km_cost.java, Findts_max_speed.java, Findts_time_cost.java, Findts_work_quality.java, Fuzzy_linguistic_variable.java, Linguistic_variable.java, Logical_variable.java, Probabilistic_variable.java, Send_task.java, Set_goal.java	Семантическая сеть модели предметной области

#### 4.4. Результаты вычислительных экспериментов по решению сложной транспортно-логистической задачи с использованием гибридной интеллектуальной многоагентной системы

В качестве тестовой задачи для тестирования ГиИМАС с самоорганизацией на основе анализа целей агентов была выбрана СТЛЗ (рис. 4.12, 4.13). Условия СТЛЗ для логистической организации, доставляющей грузы своим клиентам, имеющей несколько единиц транспортных средств, можно сформулировать следующим образом: требуется найти совокупность маршрутов доставки (по одному маршруту для каждого транспортного средства), охватывающую всех клиентов, заказавших доставку, с учетом условий перевозки для отдельных видов грузов, качества и загруженности дорог, временных интервалов доставки, определенных клиентами, а также норм трудового законодательства в отношении персонала. Совокупность найденных маршрутов должна быть оптимальной по четырем критериям: стоимости (min), длительности (min), надежности (max) и вероятности опоздания (min). Стоимость – затраты на ГСМ, затраты, связанные с повреждением или потерей груза, а также зарплата персонала. Длительность – общая для всех транспортных средств разница между временем прибытия в конечный пункт маршрута и временем отправления из начального пункта. Надежность маршрута

оценивается математическим ожиданием увеличения его стоимости, поэтому для максимизации надежности требуется его минимизировать. Вероятность опоздания – вероятность того, что при использовании данного маршрута груз не будет доставлен вовремя хотя бы одному клиенту вследствие каких-либо случайных событий, например, задержки погрузки/разгрузки, отклонения от среднего времени проезда от одного клиента к другому и т.п. Исходные данные СТЛЗ: 1) запросы клиентов на доставку грузов с указанием наименования, количества товара и временного интервала его доставки; 2) сведения о дорогах к клиентам (протяженность, загруженность, качество); 3) паспортные данные транспортных средств (расход ГСМ, грузоподъемность и т.п.); 4) сведения о графиках работы и размере заработной платы персонала (водителей и грузчиков); 5) информация о перевозимом грузе (вес, габариты, хрупкость и т.п.).

Цели экспериментов:

- 1) проверить в лаборатории работоспособность ПП ТРАНСМАР, оценить технико-эксплуатационные показатели автоматизированного решения СТЛЗ;
- 2) сравнить качество решений СТЛЗ, предлагаемых ЭВМ, с результатами экспертов, принимающих решения на практике;
- 3) исследовать на компьютерной модели ситуации решения СТЛЗ и установить условия возникновения синергетического эффекта, когда общее коллективное решение оказывается качественно лучше частных решений экспертов;
- 4) по результатам компьютерного моделирования коллективных решений извлечь знания для подготовки и совершенствования деятельности ЛПР в СППР на транспорте;
- 5) рассчитать оценки экономических показателей автоматизированного решения сложных задач с использованием ПП ТРАНСМАР в условиях опытной и промышленной эксплуатации.

Задачи экспериментов: оценка технико-эксплуатационных показателей ПП ТРАНСМАР при решении СТЛЗ: занимаемая память, время решения задачи, время подготовки исходных данных; оценка экспертами транспортно-логистического предприятия выдаваемых ПП маршрутов; сравнение вероятности возникновения синергетического эффекта в ГиИМАС трех различных архитектур для различных СТЛЗ; сравнение качества маршрутов, получаемых различными ГиИМАС, и извлечение с помощью компьютерного моделирования знаний ЛПР об организации взаимодействия в СППР; расчет изменения экономических показателей в результате использования ПП ТРАНСМАР на практике.

Для вычислительных экспериментов по тестированию ПП ТРАНСМАР были взяты пять СТЛЗ с 10, 15, 20, 25, 30 клиентами, что согласу-

ется с практикой решения СТЛЗ, когда число клиентов обычно лежит в интервале [5, 30]. Полностью описать эти задачи не представляется возможным из-за ограниченного объема книги. Поэтому приведем только количественные параметры: число клиентов, дорог, водителей, грузчиков, транспортных средств (табл. 4.3). Значения свойств ресурсов «клиент», «дорога», «водитель», «грузчик», «товар» и «транспортное средство» задавались случайным образом.

Таблица 4.3 – Количественные параметры тестируемых СТЛЗ

Задача	Количество клиентов	Количество дорог	Количество водителей	Количество грузчиков	Количество транспортных средств
СТЛЗ 10	10	75	3	3	3
СТЛЗ 15	15	240	5	5	5
СТЛЗ 20	20	420	5	5	5
СТЛЗ 25	25	650	9	9	9
СТЛЗ 30	30	377	6	6	6

В экспериментах используется ПП ТРАНСМАР с тремя архитектурами ГиИМАС для решения СТЛЗ, относящиеся к различным классам по степени взаимодействия агентов. Архитектуры различаются только целями агентов поиска решения. В архитектуре с сотрудничающими агентами  $org_1 \in ORG_{coop}$  все агенты поиска решения ищут маршрут-решение, оптимальный по всем четырем критериям: стоимость, длительность, надежность и вероятность опоздания. В архитектуре с нейтральными агентами  $org_2 \in ORG_{neut}$  каждый из агентов поиска решения пытается найти решение оптимальное только по одному из критериев, не обращая внимания на изменение других. В архитектуре с конкурирующими агентами  $org_3 \in ORG_{comp}$  цели агентов поиска решения конфликтуют: каждый из агентов ищет решение, оптимальное по одному из критериев, ухудшая при этом качество маршрута по другим критериям. Цель АПП во всех трех архитектурах, – минимизировать стоимость, длительность, надежность маршрута и вероятность опоздания. Остальные агенты: интерфейсный, планирующий, аналитический, стохастический, логический, нечеткий, лингвистический, агент-посредник и агент-преобразователь – не имеют целей относительно объекта управления, а должны обеспечивать работу агентов поиска решения и АПП. Характеристики рассмотренных архитектур ГиИМАС сведены в табл. 4.4.

Использование этих архитектур позволяет исследовать зависимость вероятности возникновения синергетического эффекта при решении сложных задач от типа архитектуры ГиИМАС. Кроме того, чтобы убедиться, что благодаря организации взаимодействия агентов в ГиИМАС возникает синергетический эффект и растет качество предлагаемых сис-

темой решений, проведена серия экспериментов с ГиИМАС, в которой агенты поиска решения не обмениваются решениями и не взаимодействуют между собой. В такой ГиИМАС каждый из агентов поиска решения пытается решить СТЛЗ целиком и передает свое решение агенту, принимающему решения. Последний выбирает наиболее качественное с точки зрения его нечеткой цели решение и выдает его интерфейсному агенту как окончательное. При этом нет промежуточных этапов, когда каждый из агентов поиска решения получает промежуточные решения других агентов и пытается улучшить их.

Таблица 4.4 – Оценки архитектур ГиИМАС

Архитектура	Параметры маршрута				
	Агент, принимающий решения	Агент поиска решения 1	Агент поиска решения 2	Агент поиска решения 3	Агент поиска решения 4
$org_1 \in ORG_{coop}$	ст, дл, ве(min), на(max)	ст, дл, ве(min), на(max)	ст, дл, ве(min), на(max)	ст, дл, ве(min), на(max)	ст, дл, ве(min), на(max)
$org_2 \in ORG_{neu}$	ст, дл, ве(min), на(max)	ст(min)	дл(min)	на(max)	ве(min)
$org_3 \in ORG_{comp}$	ст, дл, ве(min), на(max)	ст(min), дл(max)	ст(max), дл (min)	на(max), ве(max)	на(min), ве(min)

Обозначения: ст – стоимость; дл – длительность; на – надежность; ве – вероятность опоздания

Архитектуры ГиИМАС протестированы на СТЛЗ из табл. 4.3, и выяснено, в каких из них вероятнее возникновение синергетического эффекта, т.е. получение общего решения ГиИМАС лучшего, чем любое из предложенных каждым отдельным агентом. Установлено, как возникновение синергетического эффекта влияет на качество принимаемых ГиИМАС решений. Кроме этого, результаты работы этих архитектур сопоставлены с результатами ГиИМАС, в которой агенты не взаимодействуют и не обмениваются частными решениями задачи.

В общей сложности для каждой архитектуры из табл. 4.4 и каждой задачи из табл. 4.3 проведено по сто вычислительных экспериментов на персональной ЭВМ со следующими характеристиками: процессор – Intel Core 2 Duo 2,4 ГГц, оперативная память – 2 Гб, операционная система – Microsoft Windows XP Professional.

В результате экспериментов установлено, что ПП ТРАНСМАР работоспособен, его технико-эксплуатационные характеристики: занимаемая память – от 0,2 до 1,5 Гб, время решения тестовой задачи от 2 до 30 мин, при загрузке процессора в среднем 95%; подготовка исходных данных от 5 до 30 мин. Эти показатели лучше, чем у ГиИС, решавшей СТЛЗ со сложностью моделирования  $q = (3, 2)$  [6] в работах [6, 187,

188]. Сравнение ГиИМАС и аналогичной ГиИС для решения СТЛЗ показало, что моделирование эффекта самоорганизации СППР в ГиИМАС позволило динамически синтезировать метод решения сложных задач на основе базовых методов-знаний агентов: 1) при решении СТЛЗ вырабатывается релевантный ей метод, что повышает качество решений; 2) стало возможным решать СТЛЗ с более высокими оценками сложности моделирования; 3) сокращается трудоемкость проекта за счет отказа от настройки межагентных связей.

По результатам экспериментов построена графическая зависимость, показывающая причинно-следственную связь числа ситуаций (в процентах), в которых возникает синергетический эффект и коллективное решение (решение ГиИМАС в целом) оказывается лучшим, чем любое из индивидуальных решений агентов, от количества клиентов (рис. 4.14) [6, 124 – 126]. Для каждой задачи и архитектуры ГиИМАС, а также для архитектуры ГиИМАС без взаимодействия (агенты не обмениваются частными решениями) рассчитано среднее значение цели АПР среднее значение стоимости, длительности, надежности в виде математического ожидания увеличения стоимости маршрута, вероятности опоздания для маршрутов, найденных ГиИМАС в целом (рис. 4.15 – 4.19). Анализ графических зависимостей показал высокое качество маршрутов, рекомендуемых ПП ТРАНСМАР, что подтверждено экспертами.

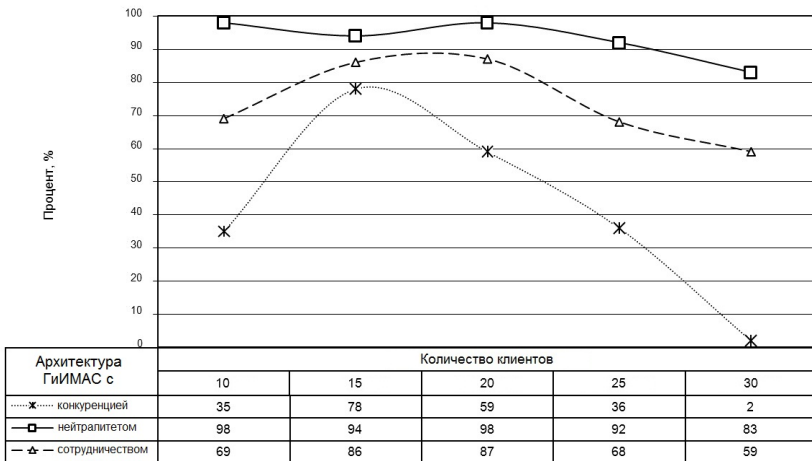
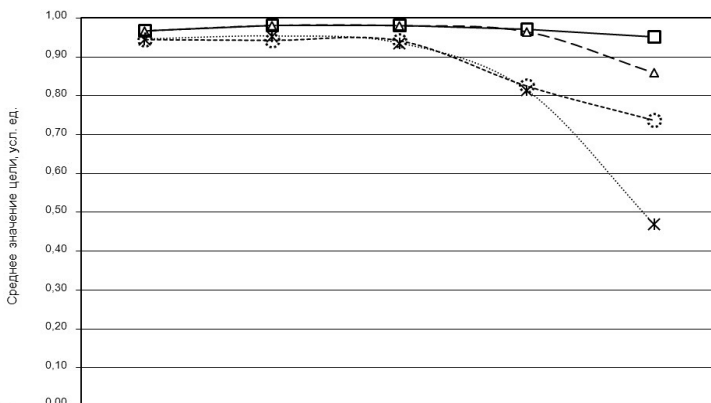
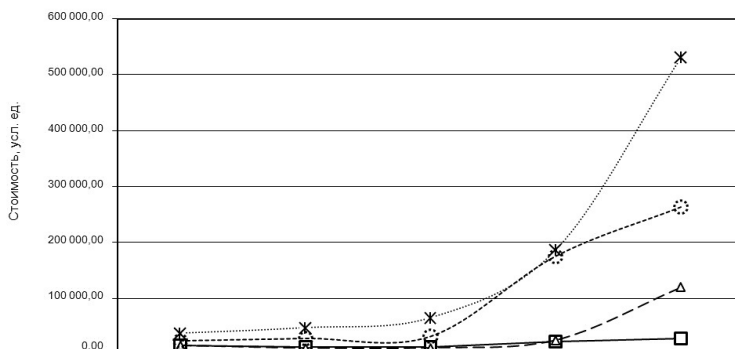


Рис. 4.14 – Процент решений ГиИМАС лучших, чем любое из частных решений агентов



Архитектура ГИИМАС	Количество клиентов				
	10	15	20	25	30
.....✕..... конкуренция	0,9449	0,9528	0,9348	0,8135	0,4687
—□— нейтралитет	0,9669	0,9802	0,9796	0,9699	0,9504
—△— сотрудничество	0,9661	0,9800	0,9795	0,9639	0,8592
---✕--- без взаимодействия	0,9439	0,9422	0,9411	0,8248	0,7370

Рис. 4.15 – Среднее значение цели агента, принимающего решения



Архитектура ГИИМАС	Количество клиентов				
	10	15	20	25	30
.....✕..... конкуренция	37 294	47 198	65 166	186 524	531 276
—□— нейтралитет	15 315	12 743	12 735	22 355	28 529
—△— сотрудничество	15 974	11 175	11 457	25 235	119 960
---✕--- без взаимодействия	24 107	28 269	31 918	175 169	262 958

Рис. 4.16 – Среднее значение стоимости маршрута, найденного ГИИМАС в целом

По итогам практического использования программного продукта, реализующего ГИИМАС, на двух объектах средняя суммарная себестоимость доставки грузов в день сократилась на 7,2%, средняя суммарная длительность доставки в день – на 12,13%, среднее время построения маршрутов в день уменьшилось на 23,14%.

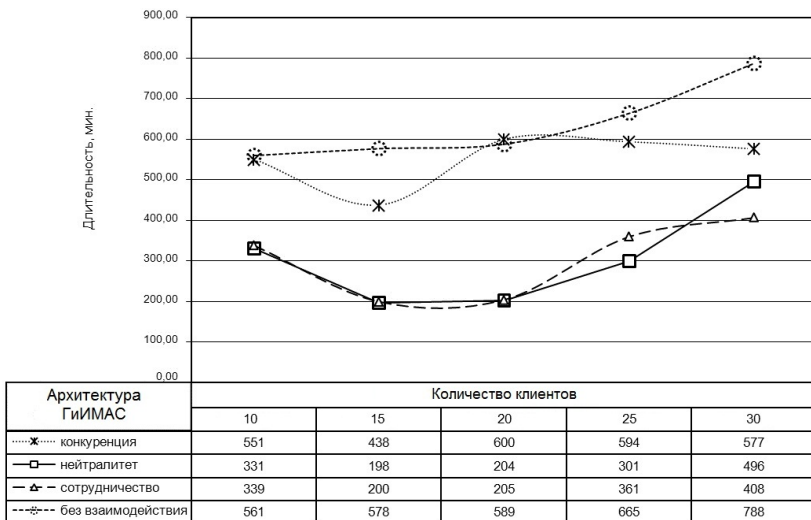


Рис. 4.17 – Среднее значение длительности маршрута, найденного ГИИМАС в целом

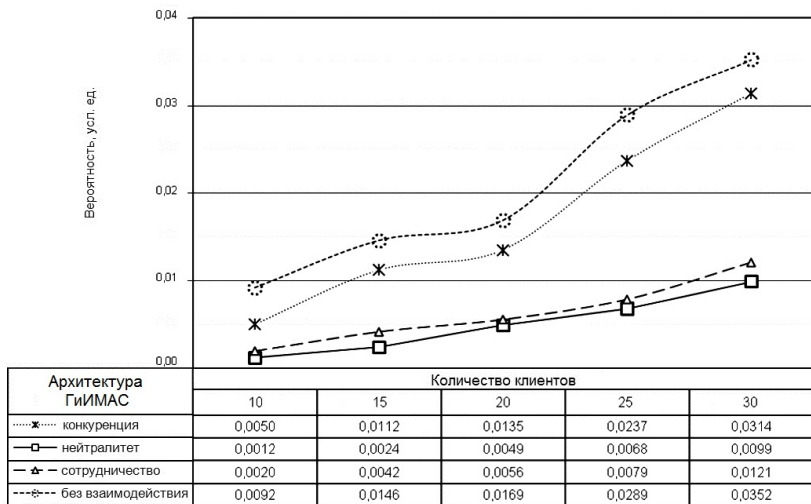


Рис. 4.18 – Среднее значение вероятности опоздания хотя бы к одному клиенту для маршрута, найденного ГИИМАС в целом

Как видно из рис. 4.14 – 4.19, в большинстве случаев любая из архитектур ГИИМАС предлагает более качественные решения, чем ГИИМАС без взаимодействия агентов. Однако для задач с 25 и 30 клиентами эффективность ГИИМАС с конкурирующими агентами резко

снижается, и она демонстрирует результаты хуже, чем ГиИМАС без взаимодействия. В данном случае можно говорить об эффекте дисергии, когда коллективное решение не лучше решений индивидуальных агентов. Очевидно, этот эффект обусловлен невозможностью конкурирующих агентов «договориться» на задачах с высокой комбинаторной сложностью. Таким образом, показано, что при правильной организации взаимодействия в ГиИМАС эффект самоорганизации позволяет повысить качество принимаемых решений по сравнению с ГиИМАС, в которой он не моделируется.

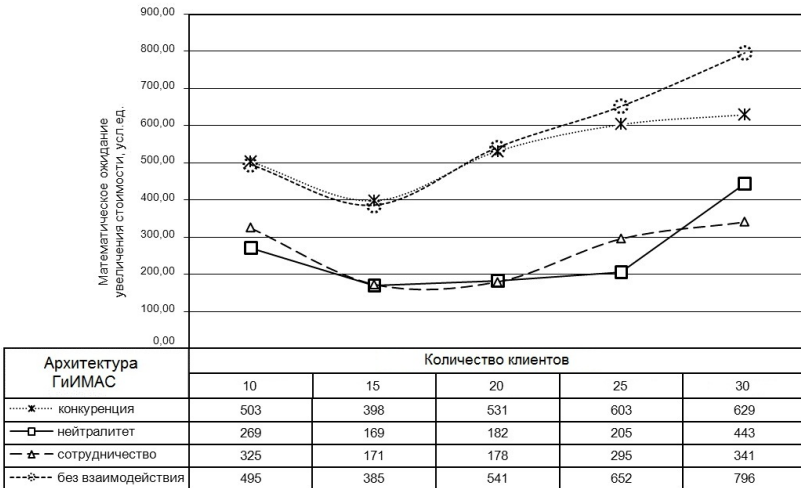


Рис. 4.19 – Среднее значение надежности (математического ожидания увеличения стоимости) маршрута, найденного ГиИМАС в целом

Анализ рис. 4.14 – 4.19 показывает, что независимо от размерности задачи синергетический эффект, т.е. ситуация, когда общее решение ГиИМАС лучше, чем любое из предложенных каждым отдельным агентом, наиболее часто возникает в ГиИМАС с нейтральными агентами. На втором месте – ГиИМАС с кооперирующими агентами. Чем меньше размерность СТЛЗ, тем меньше влияние синергетического эффекта на качество оптимального решения. На рис. 4.15 видно, что средние значения цели АПР (цели ГиИМАС в целом), для задач с 10 – 20 городами практически совпадают, однако, для задач с 25 и 30 городами выделяется ГиИМАС с нейтральными агентами [6, 124 – 126]. Таким образом, при малой размерности задачи можно выбирать архитектуру ГиИМАС случайно либо на основе анализа других параметров СТЛЗ: полнота матрицы смежности, топологические особенности и т.д., при размерно-



сти задачи 25 – 30 городов, когда возникающий синергетический эффект начинает играть определяющее значение, – лучше выбрать ГиИМАС с нейтральными или сотрудничающими агентами, а при размерности задачи выше 30 городов – с нейтральными агентами.

На основе анализа этих данных извлечены правила нечеткой базы знаний АПР. Эти знания полезны для организации эффективного выбора архитектуры ГиИМАС для решения СТЛЗ и подбора экспертов реальных СППР для решения сложных задач, аналогичных СТЛЗ. На основе лингвистических переменных (разд. 4.2) правила нечеткой базы знаний АПР формулируются следующим образом:

1. Если  $sz = \text{«малая»}$ , то  $pcp = \text{«средняя»}$ ;
2. Если  $sz = \text{«малая»}$ , то  $pnt = \text{«средняя»}$ ;
3. Если  $sz = \text{«малая»}$ , то  $pcn = \text{«средняя»}$ ;
4. Если  $sz = \text{«средняя»}$ , то  $pcp = \text{«средняя»}$ ;
5. Если  $sz = \text{«средняя»}$ , то  $pnt = \text{«высокая»}$ ;
6. Если  $sz = \text{«высокая»}$ , то  $pnt = \text{«высокая»}$ ,

где  $sz$  – лингвистическая переменная «размерность СТЛЗ»,  $pcp$  – лингвистическая переменная «степень уверенности в выборе ГиИМАС с сотрудничающими агентами  $org_{coop}$ »,  $pnt$  – лингвистическая переменная «степень уверенности в выборе ГиИМАС с нейтральными агентами  $org_{neu}$ »,  $pcn$  – лингвистическая переменная «степень уверенности в выборе ГиИМАС с конкурирующими агентами  $org_{conc}$ ».

Число правил в данной базе знаний невелико по сравнению с промышленными продукционными системами. Однако, как показано в [1], нечеткие правила более выразительны, нежели детерминированные продукционные, поэтому для описания одной и той же ситуации требуется на порядок меньше правил. Таким образом, в результате вычислительных экспериментов приобретены новые знания о поведении ЛПР по управлению коллективом СППР, что позволяет ГиИМАС выбирать архитектуру, релевантную решаемой задаче. Благодаря механизму самообучения (разд. 4.3) ГиИМАС способна корректировать функции принадлежности нечетких переменных, устраняя возможные погрешности при их определении экспертами. Кроме того, эти знания могут быть использованы ЛПР при решении сложных задач в реальной СППР для подбора экспертов при условии, что ЛПР знает предпочтения и цели экспертов. При необходимости расширения базы знаний аналогично могут быть получены знания «условия – архитектура» для других условий, например, топологических особенностей СТЛЗ, числа транспортов и степени обобщенности.

## **5 МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОРА В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Последнее из рассматриваемых в данной книге отношений взаимодействия экспертов в СППР — обмен мнениями по ходу спора и его отображение в компьютере имитацией спора моделей в гибридных интеллектуальных системах.

### **5.1 Понятие спора в психологии, лингвистике, философии, математике, искусственном интеллекте и системном анализе**

В [189] даются следующие определения понятия «спор»:

- 1) спор – словесное состязание, обсуждение чего-либо между двумя или несколькими лицами, при котором каждая из сторон отстаивает свое мнение, свою правоту;
- 2) спор – взаимное притязание на владение, обладание чем-либо, разногласие, разрешаемое судом;
- 3) спор – поединок, битва, единоборство (преимущественно в поэтической речи). Состязание, соперничество.

Общее для всех значений слова «спор» – разногласия, отсутствие единого мнения, противоборство. Спор – столкновение мнений, в котором стороны приводят аргументы в поддержку своих убеждений, критикуя несовместимые с последними представления оппонентов.

Спор – важное средство прояснения и разрешения вопросов, вызывающих разногласия, лучшего понимания того, что не является ясным и не нашло еще убедительного обоснования. Искусство ведения спора называется эристикой [190]. Эристика – интегральное искусство, возникающее на стыке знаний и умений, вырабатываемых философией, логикой [191 – 196], психологией [193, 197], этикой и риторикой [198 – 205]. Спор – одна из основных форм человеческой коммуникации, в которой уточняются позиции противоборствующих сторон, вырабатывается решение проблемы, «рождается истина».

Ценность спора как коммуникативного акта заключается в том, что:

- 1) поскольку в споре соревнуются идеи, то его участники обогащаются идейно: обмен идеями, в отличие от обмена вещами, более эффективен;
- 2) поспорив, стороны приходят к более глубокому уяснению как своей собственной позиции, так и позиции своего оппонента;
- 3) в споре можно получить новые знания и расширить кругозор.

Виды спора многообразны [206]: конструктивный или деструктивный, устный или письменный, организованный или стихийный, основательный или поверхностный, содержательный или формальный. Важный момент – выбор вида спора: дискуссии, диспута, дебатов, полемики, прений. Существуют общие признаки спора: наличие предмета, содержательная связность, открытость к аргументам другой стороны, очередность выступлений спорящих, недопустимость использования некорректных приемов и нарушения этических норм.

Спор изучается психологией, лингвистикой, философией, математикой, информатикой и искусственным интеллектом. Рассмотрим, как они трактуют понятие «спор».

**Психология.** В психологии [207] спор – это характеристика процесса общения людей, которая заключается в обсуждении проблемы, споре ее коллективного исследования, при котором каждая из сторон, аргументируя (отстаивая) и опровергая (оппонируя) мнение собеседника (противника), претендует на монопольное установление истины.

Детализируя принцип поэтапного продвижения к истине, в процессе ведения спора выделяют следующие стадии: 1) вводное информирование (информирование участников о проблеме); 2) аргументация сторон (оглашение аргументированных позиций сторон); 3) оппонирование, критические суждения (высказывание критических замечаний оппонентам); 4) активное противоборство сторон (поиск дополнительных аргументов и сторонников, контраргументация и сопоставление альтернатив); 5) поиск компромиссных вариантов решения задачи; 6) поиск приемлемого решения (активный поиск и обобщение всего конструктивного, позитивного, что было высказано в процессе спора, отслеживаются точки соприкосновения, сближаются позиции, вырабатываются взаимоприемлемые решения); 7) завершение спора, обобщение результатов.

**Лингвистика.** Лингвистика [206] рассматривает спор как речевое взаимодействие. Слышать и слушать – не одно и то же. Эффективность слушания определяется не только степенью понимания слов собеседника, но и умением правильно оценить поведение участников общения, их мимику, жесты, движения, позу, направленность взгляда, интонацию, темп речи, т.е. понять язык невербального общения. Этот язык может дать дополнительные сведения о внутреннем состоянии оппонента, об отношении к предмету обсуждения, о его реакции на наши слова, реплики других участников спора. Все это повышает эффективность слушания и позволяет лучше понять суть позиции оппонента, что, в свою очередь, повышает качество принимаемого в ходе спора решения.

**Философия.** Философия изучает спор через призму логики – науки о законах и формах мышления. Спор в логике – это последовательность доводов и убеждений, с помощью которых человек пытается убедить

оппонента в своей правоте. Спор – частный случай теории аргументации [191 – 194].

Спор, как частный случай аргументации, имеет характерные признаки: 1) на тезис пропонента оппонент отвечает противоположным утверждением («столкновение мнений»); 2) пропонент и оппонент выдвигают доводы в поддержку своих позиций; 3) каждый из спорящих подвергает критике позицию противной стороны. Если какой-либо из этих признаков отсутствует, нет и спора как особого случая аргументации.

С требованиями, предъявляемыми к спору с точки зрения логики можно познакомиться в [208].

В споре необходимо учитывать основные формально-логические законы. Требования этих законов кратко можно выразить следующим образом: правильное рассуждение должно быть определенным, обоснованным и доказательным.

**Математика. Информатика. Искусственный интеллект.** Математика включает специфический раздел: математическую логику, которая «выросла» из философской логики, как общенаучного языка. Первоначально преобладал детерминистский подход и однозначные («истина», «ложь») логики. В 1958 г. С. Тулмин предложил концептуальную модель аргументации [209] для юриспруденции. Его модель состояла из шести объектов: 1) притязание как заключение, которое должно быть установлено экспертами; 2) правомочие как формулировка правовой базы причинно-следственной связи посылки и заключения; 3) факты, данные, улики, которые используются в доказательствах; 4) подкрепление доказательствами как поддержка при формулировке правовой базы; 5) опровержение как ограничения на формулировку правовой базы; 6) уточнитель – слово или фраза, выражающая силу или уверенность в результате-заключении. Первые три объекта – неотъемлемые компоненты практической аргументации. Последние три – используются не всегда.

В 1974 – 1987 гг. Д. Поллок [210, 211] утверждал, что рассуждения аргументации выполняются в терминах доказательств, которые могут собираться в компромиссные аргументации. Он различал два вида доказательств: неуверенные и уверенные. Уверенные доказательства он определял через особый вид знаний – аннуляторы. Аннулятор – это новое доказательство, разрушающее аргументирующую силу, которую уверенное доказательство получило от его посылки. Д. Поллок ввел два вида аннуляторов: опровергающие и разрезающие. Первые – доказательство, разрушающее посылку, создавая ей оппозицию. Разрезающий аннулятор рвет связь между доказательством и заключением. Идеи Д. Поллока нашли развитие в ИИ: Д. Дойл [212] разработал системы правдоподобных рассуждений; Р. Рейтер [213] разработал логику умолча-

ний, В.К. Финн – логику аргументации и ДСМ-метод автоматического порождения гипотез [185 – 216]. Значительные перспективы для учета в рассуждениях многообразия мнений открыли в математике многозначные логики: Я. Лукасевича [217], Э.Поста, Л. Заде [218] и др.

Для учета в рассуждениях плюрализма мнений [219] Н.К. Косовским, А.В. Тишковым и В.В. Ярославским были разработаны плюралистическая и  $n$ -усредняющая логики [220, 221], чтобы отразить то обстоятельство, когда по какому-нибудь факту может быть несколько мнений экспертов. В  $n$ -усредняющей логике значения утверждения  $A$  – это упорядоченная последовательность из  $n$  рациональных чисел  $A_1, \dots, A_n$ . Полагается, что положительное число обозначает мнение «за». Чем больше это число, тем мнение сильнее, что моделирует больший авторитет эксперта. Если значение отрицательное, это мнение «против». Тогда среднее значение  $avg(A) = (A_1 + \dots + A_n)/n$  – отображает общее мнение. Значение усредненного отрицания определяется выражением:  $[not\_avg(A)] = (A_1 - 2 \cdot avg(A), \dots, A_n - 2 \cdot avg(A))$ , при этом:  $avg(not\_avg(A)) = -avg(A)$ . Переменная с нулевым средним значением  $avg(A) = 0$  обозначает наличие противоречий мнений, а максимум различия пар чисел в последовательности  $A_1, \dots, A_n$  задает степень противоречивости. На среднем арифметическом построены обобщения бинарных операций конъюнкции и дизъюнкции, если  $n = 2$  (дуальная логика), можно учесть «основное» и «оппозиционное» мнения.

Значительный интерес представляет развитие понятия обычной вероятности, ассоциирующееся с частотой воспроизводимых событий, и введение понятия эпистемистической вероятности или степени доверия, подтверждающей гипотезу на основании некоторого свидетельства. Это пример применения правдоподобия того, что гипотеза заслуживает доверия. Измерения выполняют с помощью коэффициента достоверности (фактора уверенности), как разницы между степенью доверия и недоверия [222 – 223]. Коэффициент уверенности используется в продукционных системах (системах с базами знаний) для организации рассуждений экспертов в условиях неопределенности.

Еще один метод нестрогих рассуждений – теория Демпстера – Шеффера [222 – 224], где моделируются рассуждения в условиях неопределенности, неточной и неправильной информации, в отличие от классического подхода безразличия, принятого в теории вероятности. В качестве оценок незнания используется степень отсутствия (нехватки) доверия. Взвешенные оценками свидетельства могут комбинироваться, что приводит к расчетам новых интегрированных оценок. В этой теории получает количественную оценку и понятие «сомнительность».

Концептуально иным подходом в ИИ к спору как к логике является многоагентный подход [9, 176]. Одно из важнейших свойств агента в МАС – его социальность, т.е. способность взаимодействовать с другими агентами. В результате решается задача, причем зачастую возникают такие формы социального взаимодействия, как споры, когда разные агенты по-разному представляют решение одной задачи. В МАС возможно отобразить такие стратегии взаимодействия экспертов для обмена знаниями, как кооперацию, компромисс, содействие, конкуренцию, конформизм, приспособление, солидарность и уклонение.

Еще один подход в ИИ, в рамках которого уже не одно десятилетие [12] развивается интеграция разнородной информации – это гибридные интеллектуальные системы [1, 4, 5, 10 – 11], в частности, ФГиИС. Если в МАС подзадачу решает агент, способный к взаимодействию с другими агентами, то в ФГиИС подзадача решается автономной моделью как частью гетерогенного модельного поля, на котором задана стратегия комбинирования моделей.

## **5.2 Спор в системах поддержки принятия решений**

В СППР эксперты и ЛПР взаимодействуют друг с другом, ЛПР координирует работу экспертов, эксперты предоставляют ЛПР информацию и обмениваются между собой информацией относительно решаемой проблемы. Зачастую такой обмен происходит в форме споров. Известно несколько видов спора, среди них: дискуссия, полемика, диспут, дебаты, прения, как показал анализ, дискуссия и полемика в СППР возникают чаще всего.

Дискуссия [34] – вид спора, в рамках которого рассматривается, исследуется, обсуждается некоторая проблема. Основные средства, используемые в дискуссии – логическое обоснование, терпимость к мнению оппонента, желание достигнуть компромисса и использование заведомо истинных предпосылок и аргументов. Цель любой дискуссии – достижение максимально возможной в данных условиях степени согласия ее участников по обсуждаемой проблеме. Итог дискуссии не сводится к сумме высказанных точек зрения, а должен быть синтезом (комбинацией) решений задачи, полученных от разных экспертов в результате спора.

Полемика (гр. *polemicos* воинственный, враждебный) [225, 226] – вид спора, в рамках которого основные усилия сторон направлены на утверждение (победу) своей позиции относительно обсуждаемого предмета. Отличительные черты полемики: 1) основная задача, которую решают полемизирующие стороны, – утверждение своей позиции; 2) участвующие в полемике стороны более чем в дискуссии, вольны в выборе

средств спора, его стратегии и тактики. В полемике допускается использование большего числа корректных приемов, таких, как захват инициативы, внезапность в использовании имеющихся в распоряжении спорящих доводов, в том числе и психологических, навязывание своего сценария спора и т.п. Победа в полемике может принести некоторое удовлетворение эксперту, но если спор ассоциируется со средством достижения истины, то победивший в полемике эксперт должен принять соответствующую меру ответственности за решение.

Главное различие между полемикой и дискуссией – это их цели и средства. Для СППР дискуссия – наиболее «подходящая» разновидность спора, так как здесь для решения сложной задачи важна коллективная выработка общего решения, нахождение компромисса, а не «слепое» утверждение своей позиции. В ходе дискуссии, диалога с оппонентами можно выработать эффективное решение сложной задачи.

На рис. 5.1 изображено место спора в СППР. Внешний прямоугольник обозначает внешнюю среду СППР. Элементы СППР – ЛПР и эксперты – изображены овалами, а стрелки указывают на их участие в споре. ЛПР и эксперты представлены своими моделями личности: опытом, знаниями, особенностями мышления, присущими им действиями. Элемент «Владелец задачи» – организация или лицо, которому необходимо решить задачу, он – источник задачи и потребитель результатов ее решения. Элемент «СПОР» реализует механизм взаимодействия экспертов и ЛПР в процессе решения задачи для получения результата. Это механизм преобразования модели «неоднородная задача» [5] посредством опыта, знаний и действий ЛПР и экспертов в результат решения.

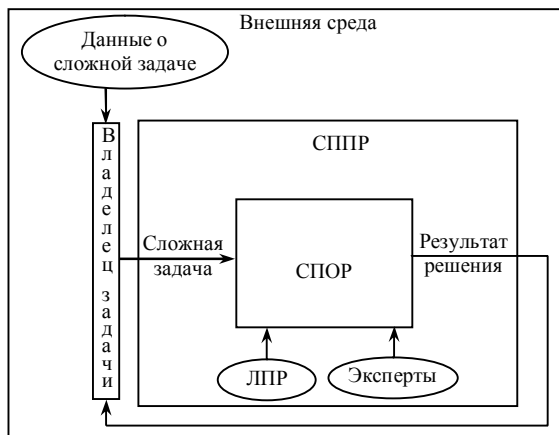


Рис. 5.1 — Спор в СППР

В символическом виде спор в СППР можно представить выражением:

$$(EXP, dm, prb^u) \xrightarrow{mer^u} dec^u, \quad (5.1)$$

где  $EXP = \{exp_1, exp_2, \dots, exp_{N_{exp}}\}$  – «модели личностей экспертов» (их знания и опыт),  $EXP \subseteq RES$  ( $RES$  – множество ресурсов [5]),  $N_{exp}$  – число экспертов в СППР;  $dm$  – «модель личности ЛПР»,  $dm \in RES$ ;  $prb^u$  – концептуальная модель сложной задачи как неоднородной задачи;  $met^u$  – метод решения задачи  $prb^u$ , т.е. механизм преобразования  $EXP$ ,  $dm$  и  $prb^u$  в  $dec^u$ ;  $dec^u$  – результат решения задачи  $prb^u$ , одно из множества  $DEC^u$  возможных решений  $dec^u \in DEC^u \subseteq RES$ , при этом  $dec^u$  само может представляться множеством, например, мультимножеством или нечетким множеством.

Таким образом, в любом споре, возникающем в СППР, участвуют эксперты ( $EXP$ ) и ЛПР ( $dm$ ), решающие задачу ( $prb^u$ ) с помощью определенного механизма ( $met^u$ ), и получающие определенный результат ( $dec^u$ ). Будем различать два варианта механизма спора: 1) механизм полемики, 2) механизм дискуссии.

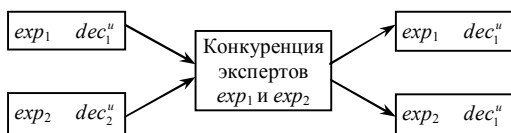


Рис. 5.2 — Механизм преобразования информации в полемике

$exp_1$  и  $exp_2$  и соответствующие им результаты решения исходной задачи  $dec_1^u$  и  $dec_2^u$ . Взаимодействие экспертов в полемике – конкуренция, когда каждый из экспертов доказывает свою точку зрения и не идет на компромисс. В результате «побеждает» один из экспертов, и дальнейшее решение задачи продолжается с предложенными им результатами, т.е. решение эксперта-победителя принимается всеми экспертами. На рис. 5.2 в ходе полемики победил первый эксперт  $exp_1$ , и его решение  $dec_1^u$  принято вторым.

Конкуренцию на рис. 5.2 можно представить моделью «черный ящик». На входе – эксперты  $exp_1$  и  $exp_2$  со своими частными решениями исходной задачи  $dec_1^u$  и  $dec_2^u$ , на выходе –  $exp_1$  и  $exp_2$  с одним общим решением исходной задачи  $dec_1^u$  или  $dec_2^u$ . Передаточную функцию в частично формализованном виде запишем следующим образом:

- 1) Если до конкуренции ( $exp_1 dec_1^u$ ) и ( $exp_2 dec_2^u$ ) и  $dec_1^u > dec_2^u$ , то после конкуренции ( $exp_1 dec_1^u$ ) и ( $exp_2 dec_1^u$ );
- 2) Если до конкуренции ( $exp_1 dec_1^u$ ) и ( $exp_2 dec_2^u$ ) и  $dec_1^u < dec_2^u$ , то после конкуренции ( $exp_1 dec_2^u$ ) и ( $exp_2 dec_2^u$ ).

Вариант 1 – «Механизм полемики». Механизм преобразований информации ( $met^u$ ) для полемики представлен на рис. 5.2, где схематично определены два эксперта



Вариант 2 – «Механизм дискуссии». Как видно из рис. 5.3, модель «черный ящик» для дискуссии отличается. Взаимодействие экспертов имеет характер интеграции, объединения и восстановления целостности.

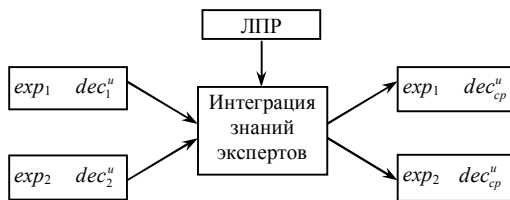


Рис. 5.3 — Механизм преобразования информации в дискуссии

Именно такая форма взаимодействия наиболее точно отражает процесс решения задачи, когда эксперты хотят выработать общее эффективное решение и прийти к консенсусу. В результате интеграции эксперты принимают решение  $dec_{cp}^u$ , формируемое из частных решений экспертов  $dec_1^u$  и  $dec_2^u$ . Отличительная особенность такого взаимодействия – интегратором выступает ЛПР, которое помогает экспертам из различных вариантов сформировать общее решение, удовлетворяющее стороны спора: экспертов и ЛПР.

Если  $dec_1^u$  по всем критериям оценки решения, имеющимся у ЛПР, лучше, чем  $dec_2^u$ , то  $dec_{cp}^u = dec_1^u$  и, наоборот, если  $dec_2^u$  по всем критериям лучше, чем  $dec_1^u$ , то  $dec_{cp}^u = dec_2^u$ . В этом случае дискуссия схожа с конкуренцией. Разница в том, что одна из сторон одерживает «победу» (ЛПР выбирает решение эксперта среди других, и это решение становится общим решением СППР) лишь в случае объективного превосходства (доминирования по Слейтеру [227] или слабого доминирования по Парето [227]), в остальных же случаях ЛПР и эксперты формируют  $dec_{cp}^u$ , комбинируя различные параметры решений и выбирая рациональное решение, исходя из целевой функции для решения задачи. Под комбинацией параметров в дискуссии понимается следующее: если из решений, предложенных экспертами ( $dec_1^u$ ,  $dec_2^u$ ), нельзя выбрать лучшее, то  $dec_{cp}^u$  будет формироваться из решений  $dec_1^u$  и  $dec_2^u$  по механизму, зависящему от специфики задачи. Возможны следующие виды комбинирования (интеграции) решений: 1) объединение мнений экспертов, при котором  $dec_{cp}^u = dec_1^u \cup dec_2^u$ ; 2) пересечение мнений экспертов, при котором  $dec_{cp}^u = dec_1^u \cap dec_2^u$ ; 3) разность мнений экспертов, при которой  $dec_{cp}^u = dec_1^u \setminus dec_2^u$ ; 4) симметрическая разность мнений экспертов, при которой  $dec_{cp}^u = dec_1^u \Delta dec_2^u$ . Применимость каждого вида комбинирования решения зависит от специфики решаемой задачи.

Поскольку спор возникает, когда есть несколько различных взглядов на одну и ту же проблему, то в СППР для того, чтобы организовать спор, необходимо наличие ЛПР и, как минимум, двух экспертов. Рассмотрим два варианта организации спора в СППР: 1) позадачно-редуцированный спор и 2) стратифицировано-редуцированный спор.

*Позадачно-редуцированный спор.* ЛПР до начала работы СППР должно редуцировать сложную задачу на подзадачи, выбрать, кого из экспертов пригласить к участию в обсуждении и продумать порядок их выступлений. В таком режиме СППР могут работать только над «регулярными» задачами, решаемыми с постоянными временными горизонтами.

*Стратифицировано-редуцированный спор.* Этот организационный вариант характеризуется, прежде всего, спонтанностью возникновения сложной задачи. В такой ситуации ЛПР не может заранее подготовиться, понять и редуцировать сложную задачу. Максимум, на что у него хватает времени – это стратифицировать задачу по профессиям экспертов или, иными словами – подумать, экспертов каких профессий и кого конкретно нужно привлечь к обсуждению. При этом варианте нет «домашних работ» и основные действия разворачиваются за круглым столом. После того как ЛПР расскажет о проблеме, у каждого эксперта формируется профессиональный, упрощенный образ (аспект) задачи. Чем больше в СППР профессиональное разнообразие, тем больший объем информации будет обработан и тем больше может быть уверенности в качестве результата.

В СППР вводится функциональная избыточность, позволяющая эксперту решать задачу со своей профессиональной точки зрения, а затем обмениваться полученными результатами и находить верное решение в результате дискуссии. Роль ЛПР при этом заключается в контроле за процессом, его регламентировании, принятии промежуточных и окончательного решения.

В итоге вместо одной модели сложной задачи получается несколько относительно простых моделей, количество которых соответствует числу участвующих в решении задачи экспертов. Такая редукция задачи называется стратификацией [101], а упрощенное представление задачи – стратой. Поскольку каждый эксперт обладает опытом и знаниями в пределах своей профессии, т.е. некоторой однородной модели предметной области, то спор экспертов в СППР вне зависимости от его варианта может быть заменен понятием «спор моделей» в КСППР.

Для того чтобы можно было говорить о споре в СППР, ЛПР должно определенным способом редуцировать сложную задачу. При решении задачи в СППР организацией спора ЛПР задает порядок решения задачи: 1) эксперты независимо решают упрощенные профессиональные

образы сложной задачи; 2) в определенные моменты решения задачи эксперты обмениваются промежуточными результатами, выясняют позицию, тем самым разрешают возникающий спор или сложившееся противоречие; 3) принимают общее на этом этапе решение; 4) корректируют данные для продолжения рассуждения; 5) продолжают решать задачу до следующего спорного момента или до ее завершения. «Точки разногласия» как моменты времени, в которые происходит взаимодействие экспертов, выбираются в зависимости от специфики задачи ЛППР и являются для него точками «вмешательства» в процесс решения.

Ключевые, определяющие элементы процесса спора – его участники (рис. 5.4). ЛППР – человек, руководящий мероприятием и выбирающий наилучшее решение сложной задачи. Владелец проблемы – лицо, которое должно решать задачу в силу служебных обязанностей и отвечает за качество решения. Активные группы – объединения людей с общими интересами по отношению к решаемой задаче. Эксперты – специалисты, знающие отдельные аспекты задачи, обладающие определенным объемом специальных знаний и опыта, данными, необходимыми для выработки и принятия решения. Консультант-аналитик – лицо, выполняющее следующие функции: 1) оказание помощи ЛППР и владельцу проблемы в понимании задачи; 2) выявление предпочтений ЛППР и преодоление несовершенства системы обработки информации у человека; 3) организация работы с экспертами; 4) выявление роли и позиции активных групп; 5) разработка и применение методов принятия решения. Окружение ЛППР – сотрудники организации с общими взглядами, системой ценностей.

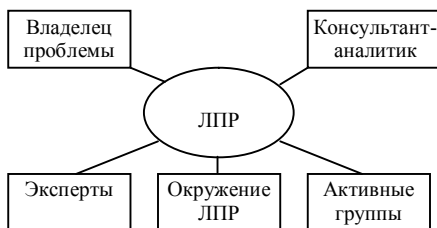


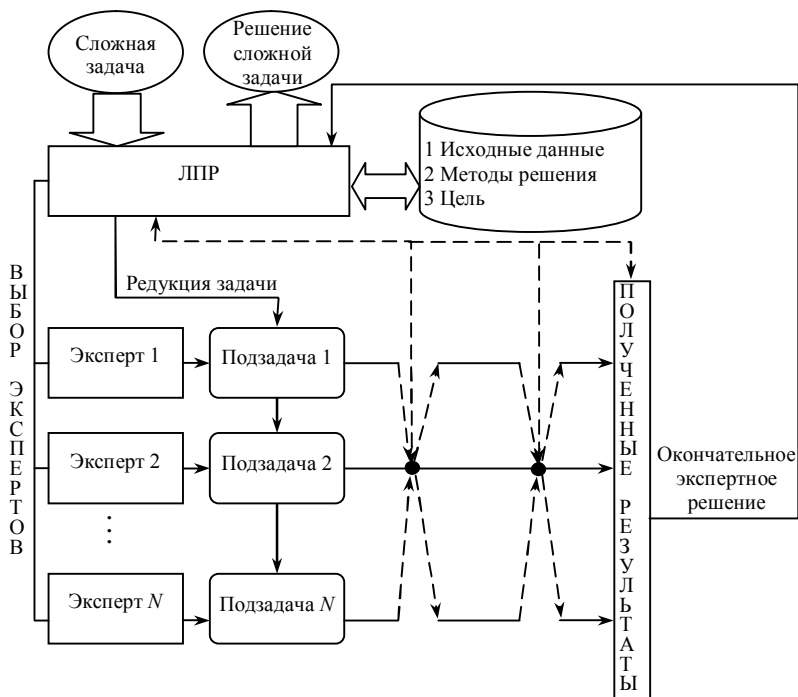
Рис. 5.4 — Состав участников для коллективного принятия решения

Так как спор — механизм СППР (рис. 5.1), то в нем участвуют не все лица, задействованные в принятии решений, а только ЛППР и эксперты.

Изобразим процесс стратифицировано-редуцированного спора в СППР, а также место в нем экспертов и ЛППР графически (рис. 5.5). Спор представляет собой часть общего процесса работы СППР:

1) получение задачи. Сведения о задаче из внешней среды поступают к ЛППР, которое сообщает ее экспертам. Эксперт анализирует задачу, выделяет исходные данные, цель решения задачи (предполагаемый результат) и определяет возможные методы ее решения;

2) подбор экспертов. Главное для ЛППР – выбрать экспертов, знания которых помогут в ходе дискуссии эффективно решить задачу, они должны быть специалистами в сферах, которые затрагивает задача;



Обозначения: ● — точка разногласия; - - > — обмен мнениями;  
 ————— — выполнение действия (рассуждение, редукция задачи, выдача решения и т.д.)

Рис. 5.5 — Структура спора в СППР

3) редукция задачи на страты. Эксперты – специалисты в своей области со своими ЯПД. Решаемая в СППР задача – полиязыковая, и ЛПР должно редуцировать задачу на профессиональные образы (страты), т.е. сформировать набор подзадач, понятных экспертам;

4) решение задачи экспертами. Каждый эксперт решает подзадачу в пределах своей страты. Для организации спора необходимо, чтобы эксперты вступали в дискуссии. Спор в СППР состоит из решений подзадач экспертами и разрешения возникающих противоречий. Он возникает на определенных этапах решения (в точках разногласия), когда эксперты прекращают свои рассуждения, чтобы поделиться промежуточными решениями с другими участниками спора. Количество и моменты времени точек разногласия определяются ЛПР и зависят от специфики задачи и разбиения ее на подзадачи. На рис. 5.5 к «точкам разногласия» ведут пунктирные стрелки от основных линий рассуждений экспертов. В точках разногласия спор экспертов наблюдаем ЛПР, что определено

пунктирной линией, стрелки на концах которой показывают, что в точках разногласия ЛПР не только получает информацию, но и может влиять на принятие решения. По итогам спора в точке разногласия возможны несколько вариантов продолжения решения задачи: а) принятие результатов одного из экспертов; б) продолжение решения задачи без изменений, т.е. каждый эксперт остается «при своей точке зрения»; в) принятие интегрированного решения, учитывающего мнения всех экспертов. Когда спор в «точке разногласия» завершен, принятое промежуточное решение становится отправной точкой для следующих рассуждений экспертов;

5) получение результатов, принятие окончательного решения. Результаты дискуссии предоставляются ЛПР. Они могут быть разными: а) эксперты пришли к консенсусу, и получено одно решение, удовлетворяющее всех экспертов; б) эксперты не пришли к консенсусу. По этой причине на рис. 5.5 «окончательное решение» принимается ЛПР: принятие результата экспертов, отклонение их результата и самостоятельная выработка результата на основе полученных от экспертов сведений. Обратная связь на рис. 5.5 показывает, что по результатам решения задачи ЛПР может инициировать повторно процесс спора, поменяв состав экспертов или изменив параметры задачи.

### 5.3 Нечеткая система спора моделей в функциональной гибридной интеллектуальной системе

Рассмотрим организацию спора в СППР в терминах ФГиИС. Автономные модели – модели, имитирующие линии рассуждения экспертов при решении подзадач, полученных в результате стратификации. Решая подзадачу и получая частное (промежуточное) решение, автономная модель в ходе спора взаимодействует с другими моделями, в ходе которого происходит интеграция частных решений и получение окончательного решения. Таким образом, в терминах ФГиИС спор – механизм интеграции частных решений подзадач, полученных автономными моделями.

Взаимодействие автономных моделей ФГиИС в споре, представленное на рис. 5.6, есть отношение на тройке «Кооперация – Компромисс – Консенсус». Кооперация означает, что автономная модель при выработке частного решения подзадачи учитывает аргументированную позицию модели-оппонента для принятия наиболее эффективного решения. Компромисс предполагает, что автоном-



Рис. 5.6 — Стратегия взаимодействия автономных моделей в споре

ная модель может отказаться от своего частного решения подзадачи в пользу частного решения модели-оппонента в случае предоставления убедительных аргументов. Консенсус означает, что принимаемое окончательное решение должно соответствовать в той или иной степени решениям подзадач всех моделей, т.е. принимаемое решение должно учитывать интересы всех участников спора.

Таким образом, спор в ФГиИС представляет собой гибридную модель интеграции знаний экспертов в условиях, когда их мнения не совпадают. Спор – механизм коммуникации и взаимодействия автономных моделей в ФГиИС. Стратегия их взаимодействия в споре выражается через «Кооперацию – Компромисс – Консенсус», а способ формирования окончательного решения из частных – интеграция как агрегирующий и комбинирующий элемент.

При решении задачи ФГиИС со спором моделей выделяются два уровня интеграции знаний: 1) интеграция в точке разногласий, когда модель, решающая подзадачу с определенной целевой функцией, «сталкивается» в споре с другой моделью, каждая имеет свою «точку зрения», целевую функцию и набор параметров, характеризующих решение задачи этой моделью; в точке разногласий происходит сопоставление знаний (их сравнение для определения более «сильного»), их комбинирование по основной целевой функции и выработка дальнейшего пути решения задачи; формула интеграции знаний в этом случае – продукционные правила вида «Если ..., то ...»; 2) интеграция в ходе формирования результирующего решения задачи из результатов решения подзадач в точках разногласия, когда общее решение представляется последовательностью решений на разных моделях, приводящей к нужному результату; формула интеграции знаний в этом случае будет иметь вид теоретико-множественного объединения решений экспертов, полученных на разных этапах решения задачи  $dec_1^u \cup dec_2^u \cup dec^u$ , где  $dec_1^u$ ,  $dec_2^u$ ,  $dec^u$  – решения, полученные на разных этапах разными моделями.

Первый вид интеграции назовем интеграцией вглубь, когда «сталкиваются» знания моделей (рис. 5.7,а), а второй вид – интеграцией вширь, агрегирующей решения, полученные на разных этапах разными моделями (рис. 5.7,б).

Интеграция вширь обеспечивается последовательностью споров в процессе решения сложной задачи. Интеграция в точке разногласия (вглубь) достигается за счет того, что эксперты (модели) готовы идти на компромисс, вступать в дискуссии, чтобы в конечном итоге прийти к консенсусу. Каждая модель не просто предоставляет в процессе спора свое решение, а указывает область компромиссных решений, некоторую функцию  $f^t$  доверия или субъективной оценки качества решения (рис.

5.8), показывающую, насколько модель доверяет тому или иному решению из множества возможных.

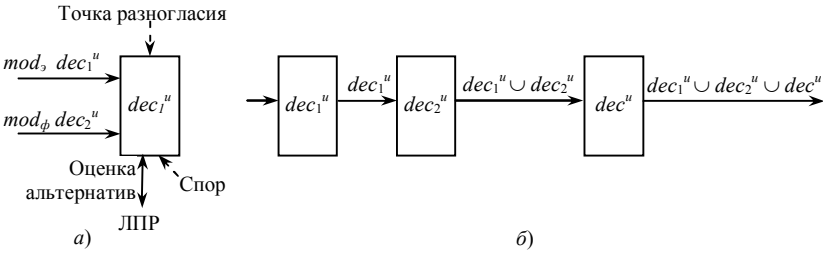


Рис. 5.7 — Два вида интеграции в споре моделей

Нужно отметить, что, несмотря на схожесть названия, рассматриваемая функция доверия не связана с функцией, введенной в теории Демпстера-Шеффера [222 — 224] и активно используемой в работах, развивающих эту теорию [228 — 230]. Предлагаемая функция доверия ближе к результатам, обобщающим теорию Демпстера-Шеффера на нечеткие множества [231, 232], однако, в данной работе предлагается оригинальный подход к интеграции функций доверия различных моделей для моделирования процесса спора в СППР.

Легко заметить (рис. 5.8), что функция доверия  $f'$  напоминает функцию принадлежности, используемую в нечетких системах [1]. С помощью этой функции каждая модель для каждого искомого параметра задает интервал допустимости слева и справа от полученного ею решения. На рис. 5.8 это интервалы  $(b-a, b)$  и  $(b, b+c)$ , где  $b$  – решение подзадачи для данного численного параметра, полученное моделью,  $a$  и  $c$  – интервалы допустимости слева и справа от решения  $b$ , соответственно. Для решения  $b$  функция доверия равна 1, модель доверяет этому решению, но считает допустимыми и решения, лежащие в интервалах  $(b-a, b)$  и  $(b, b+c)$ . Степень доверия к этим решениям меньше, а, соответственно, ниже и значение функции доверия.

Функция доверия задается каждой моделью для каждого параметра решаемой задачи. Пусть задача

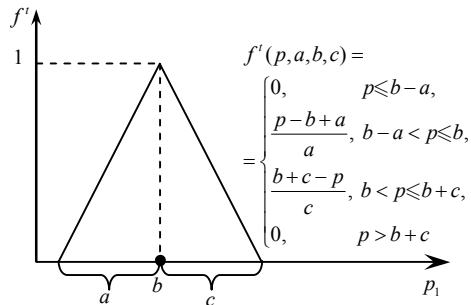


Рис. 5.8 – Функция доверия модели решению

$Z = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ , решение которой – совокупность значений параметров  $p_1, \dots, p_n$ , а поиск решения выполняют две модели ( $M_1, M_2$ ), тогда должны быть заданы функции доверия для первой модели:  $f_1^{t^1}, f_1^{t^2}, \dots, f_1^{t^n}$  – и для второй модели:  $f_2^{t^1}, f_2^{t^2}, \dots, f_2^{t^n}$ . Чтобы задать функцию доверия для каждого из параметров, необходимо задать допустимые диапазоны доверия для каждого аргумента. На рис. 5.8 эти диапазоны отмечены литерами  $a$  и  $c$ .

Функция доверия модели для каждого параметра определяется диапазонами ее доверия для этого параметра и значением параметра для решения, принимаемого моделью на конкретном этапе автономной работы, т.е. функция доверия модели  $j$  по параметру  $i$  определяется как  $f_j^{t^i}(p_i, a_{ji}, b_{ji}, c_{ji})$ , где  $a_{ji}$  – диапазон доверия модели  $j$  для параметра  $i$  слева от значения  $b_{ji}$ ,  $b_{ji}$  – значение параметра  $i$  для решения, предлагаемого моделью  $j$  в точке разногласия,  $c_{ji}$  – диапазон доверия модели  $j$  для параметра  $i$  справа от значения  $b_{ji}$ . Для задания всех функций доверия перед началом решения задачи каждая модель должна определить интервалы доверия для каждого параметра.

В качестве примера, рассмотрим спор моделей в точке разногласия. Пусть две модели ( $M_1, M_2$ ) решают задачу  $Z = \{p_1\}$ , решение которой – значение единственного параметра  $p_1$ ;  $b_{11}$  и  $b_{21}$  – значения параметра  $p_1$  для первой и второй модели, с которыми они подошли к точке разногласия;  $a_{11}$  и  $c_{11}$  – диапазоны доверия для первой модели;  $a_{21}$  и  $c_{21}$  – для второй модели;  $f_1^{t^1}(p_1, a_{11}, b_{11}, c_{11})$  – функция доверия для первой модели:

$$f_1^{t^1}(p_1, a_{11}, b_{11}, c_{11}) = \begin{cases} 0, & b_{21} + c_{21} < p_1 \leq b_{11} - a_{11}, \\ (p_1 - b_{11} + a_{11})(a_{11})^{-1}, & b_{11} - a_{11} < p_1 \leq b_{11}, \\ (b_{11} + c_{11} - p_1)(c_{11})^{-1}, & b_{11} < p_1 \leq b_{11} + c_{11}, \end{cases} \quad (5.2)$$

а  $f_2^{t^1}(p_1, a_{21}, b_{21}, c_{21})$  – для второй модели:

$$f_2^{t^1}(p_1, a_{21}, b_{21}, c_{21}) = \begin{cases} 0, & b_{21} + c_{21} < p_1 \leq b_{21} - a_{21}, \\ (p_1 - b_{21} + a_{21})(a_{21})^{-1}, & b_{21} - a_{21} < p_1 \leq b_{21}, \\ (b_{21} + c_{21} - p_1)(c_{21})^{-1}, & b_{21} < p_1 \leq b_{21} + c_{21}, \end{cases} \quad (5.3)$$

где  $p^*$  – значение параметра, принимаемое в результате процесса спора. Общий вид функции доверия представлен на рис. 5.8. Каждая модель в



точке разногласия предоставляет свое решение и свою функцию доверия. При этом возможны следующие варианты:

1) Значение  $b_{11}$  совпало со значением  $b_{21}$ , т.е. спор излишен, это значение параметра (одинаковое для обеих моделей) станет отправной точкой для последующего решения подзадач каждой моделью:

$$p^* = b_{11} = b_{21}.$$

2) Значения параметра  $p_1$  решений экспертов, не совпали:

$$b_{11} \neq b_{21}.$$

В этом случае возможны варианты: а) значение параметра решения одной модели входит в область доверия другой, но не наоборот; б) значение параметра решения одной из моделей входит в область функции доверия другой и наоборот; в) области функций доверия моделей пересекаются, но значения параметров решений моделей находятся вне зоны пересечения; г) функции доверия моделей не пересекаются.

Рассмотрим подробнее перечисленные в п.2 ситуации спора.

Ситуация, когда значение параметра одной модели входит в область доверия другой, но не наоборот (рис. 5.9), записывается выражением:

$$\begin{cases} b_{l1} \notin (b_{j1} - a_{j1}, b_{j1} + c_{j1}), \\ b_{j1} \in (b_{l1} - a_{l1}, b_{l1} + c_{l1}), \end{cases}$$

где  $j, l \in \mathbb{N}$ ,  $j, l \in [1, 2]$ ,  $l \neq j$ .

На рис. 5.9 результат решения первой модели –  $b_{11}$ , ее интервал доверия –  $(b_{11} - a_{11}, b_{11} + c_{11})$ , результат второй модели –  $b_{21}$ , ее интервал доверия –  $(b_{21} - a_{21}, b_{21} + c_{21})$ . Как видно из рисунка, интервал доверия второй модели включает решение первой модели  $b_{11}$ . Эта ситуация означает, что вторая модель доверяет решению первой модели, а первая модель не доверяет решению второй. В этом случае вторая модель соглашается с первой и принимает ее вариант решения.

Проводя аналогию со спором экспертов в СППР, это ситуация, когда аргументы первого эксперта убеждают второго пойти на компромисс. Если один из экспертов очертил свою зону доверия, а результат другого попал в эту зону доверия, справедливо говорить, что аргументация последнего эксперта оказалась сильнее.

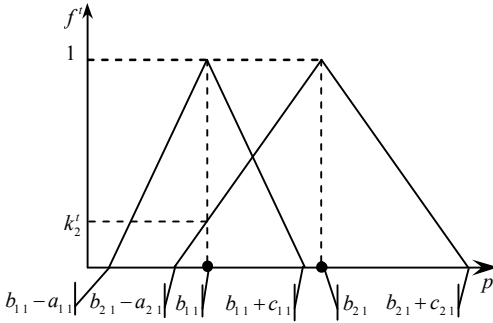


Рис. 5.9 – Частичное согласие второй модели с аргументами первой модели

Степень согласия второй модели с первой  $k_2'$  – значение функции доверия второй модели для значения параметра  $p_1$  соответствующего решению первой модели. В случае на рис. 5.9 для нахождения степени согласия второй модели с первой нужно найти значение функции доверия для второй модели (5.3) для  $p_1 = b_{11}$ :

$$k_2' = f_2^{-1}(b_{11}, a_{21}, b_{21}, c_{21}) = (b_{11} - b_{21} + a_{21})(a_{21})^{-1}.$$

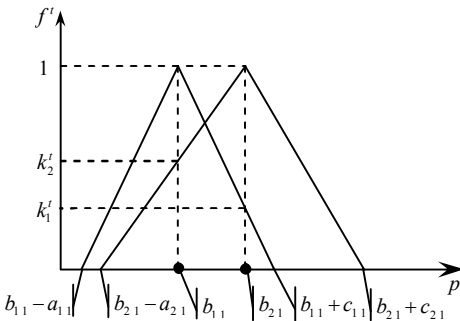


Рис. 5.10 – Частичное согласие обеих моделей с аргументами друг друга

В результате спора произошла интеграция знаний моделей, и вторая модель согласилась с первой. Результат спора — коллективное решение, соответствующее решению первой модели ( $p^* = b_{11}$ ), и коэффициент согласия второй модели с этим решением –  $k_2'$ .

Ситуация, когда значение параметра решения одной модели входит в область функции доверия другой и наоборот (рис. 5.10), записывается выражением:

$$\begin{cases} b_{l1} \in (b_{j1} - a_{j1}, b_{j1} + c_{j1}), \\ b_{j1} \in (b_{l1} - a_{l1}, b_{l1} + c_{l1}), \end{cases}$$

где  $j, l \in \mathbb{N}, j, l \in [1, 2], l \neq j$ .

На рис. 5.10 результат решения первой модели –  $b_{11}$ , ее интервал доверия –  $(b_{11} - a_{11}, b_{11} + c_{11})$ , результат решения второй модели –  $b_{21}$ , ее интервал доверия –  $(b_{21} - a_{21}, b_{21} + c_{21})$ . Интервал доверия второй модели включает решение  $b_{11}$  первой модели, а интервал доверия первой

модели включает решение  $b_{21}$  второй, т.е. вторая модель доверяет решению первой и наоборот. Остается решить вопрос о степени доверия каждой из моделей решению оппонента.

Степень согласия первой модели со второй  $k_1^t$  – значение функции доверия первой модели для значения параметра  $p_1$  соответствующего решению второй модели. В случае, представленном на рис. 5.10, для нахождения степени согласия первой модели со второй нужно найти значение функции доверия для первой модели (5.2) для  $p_1 = b_{21}$ :

$$k_1^t = f_1^t(b_{21}, a_{11}, b_{11}, c_{11}) = (b_{11} + c_{11} - b_{21})(c_{11})^{-1}.$$

Степень согласия второй модели с первой  $k_2^t$  – значение функции доверия второй модели для значения параметра  $p_1$  соответствующего решению первой модели. В случае, представленном на рисунке 5.10, для нахождения степени согласия второй модели с первой нужно найти значение функции доверия для второй модели (5.3) для  $p_1 = b_{11}$ :

$$k_2^t = f_2^t(b_{11}, a_{21}, b_{21}, c_{21}) = (b_{11} - b_{21} + a_{21})(a_{21})^{-1}.$$

Теперь необходимо сравнить коэффициенты  $k_1^t$  и  $k_2^t$ . В результате чего, будет выбрано решение, коэффициент доверия к которому выше:

$$p^* = \begin{cases} b_{11}, & k_1^t < k_2^t, \\ b_{21}, & k_1^t > k_2^t. \end{cases}$$

Ситуация, когда  $k_1^t = k_2^t$  должна разрешаться с помощью одной из стратегий разрешения конфликта в споре. На текущем этапе работы стратегией разрешения такого рода противоречий была выбрана стратегия по приоритету. Для ее реализации необходимо, чтобы до начала решения задачи одна из моделей имела больший приоритет. Тогда при возникновении конфликта в споре, преимущество в выборе окончательного решения  $p^*$  будет отдано модели, приоритет которой выше.

На рис. 5.10 видно, что  $k_2^t$  больше, чем  $k_1^t$ , поэтому, так как коэффициент доверия второй модели к решению первой больше, чем коэффициент доверия первой модели к решению второй, то результатом спора стало принятие значения параметра первой модели  $p^* = b_{11}$ . Коэффициент согласия второй модели с этим решением –  $k_2^t$ .

Если говорить в терминах СППР, в результате спора произошла интеграция знаний экспертов, при которой второй эксперт согласился с первым. В этом случае необходимо выбрать решение того эксперта, решению которого другой эксперт доверяет с наибольшим коэффициентом доверия. В данном случае принято решение первого эксперта, т.е. в споре его доводы и аргументы были сильнее.

Ситуация, когда области функций доверия моделей пересекаются, однако значения параметров решений обеих моделей находятся вне зоны пересечения, может быть записана выражением (рис. 5.11):

$$\begin{cases} b_{l1} \notin (b_{j1} - a_{j1}, b_{j1} + c_{j1}), \\ b_{j1} \notin (b_{l1} - a_{l1}, b_{l1} + c_{l1}), \\ b_{j1} - a_{j1} < b_{l1} + c_{l1}, \end{cases} \quad (5.4)$$

где  $j, l \in \mathbb{N}, j, l \in [1, 2], l \neq j$ .

На рис. 5.11 результат первой модели –  $b_{11}$ , ее интервал доверия –  $(b_{11} - a_{11}, b_{11} + c_{11})$ , результат второй модели –  $b_{21}$ , ее интервал доверия –  $(b_{21} - a_{21}, b_{21} + c_{21})$ . Интервал доверия второй модели не включает решение  $b_{11}$  первой, а интервал доверия первой модели не включает решение  $b_{21}$  второй, однако функции доверия моделей пересекаются. Эта

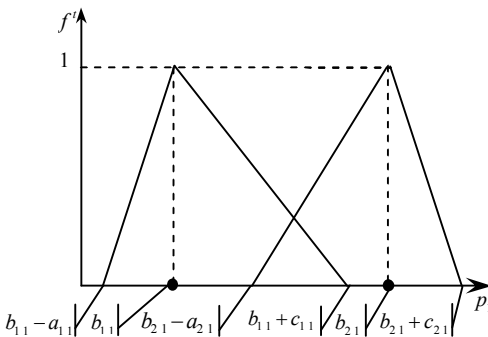


Рис. 5.11 – Пересечение функций доверия моделей, при котором в области пересечения не лежит решение ни одной модели

ситуация означает, что вторая модель не доверяет решению первой модели, а первая модель – решению второй, но существует множество компромиссных решений, которым в некоторой степени доверяют обе модели. В этом случае, модели могут выработать новое решение, которое будет устраивать обеих и лежать в области пересечения их функций доверия:

$$p^* \in (b_{21} - a_{21}, b_{11} + c_{11}).$$

Таким образом, пересечение функций доверия моделей задает интервал дискуссии – область, в пределах которой модели могут выработать удовлетворяющее их решение.

В реальности эксперты СППР спорят, аргументируя свои точки зрения, и, в итоге, приходят к общему решению, пусть оно и будет отличаться от тех точек зрения, которых эксперты придерживались в начале спора. Это решение будет компромиссным, устраивающим обоих экспертов, а при моделировании спора оно будет лежать в пределах интервала дискуссии.

Определим функцию дискуссии как операцию пересечения функций доверия моделей:

$$f_{12}^{d1} = f_1^{c1} \cap f_2^{c1}.$$

В графической интерпретации функция дискуссии – треугольник, образованный в результате пересечения функций доверия, основанием которого является интервал  $(b_{21} - a_{21}, b_{11} + c_{11})$ . Для того чтобы найти вершину треугольника, задаваемого функцией дискуссии, необходимо найти точку пересечения функций доверия. Учитывая условие  $b_{21} - a_{21} < b_{11} + c_{11}$  (5.4) и зная функции доверия моделей (5.2) и (5.3), для значения  $p_1^u$  параметра  $p_1$  в точке пересечения функций доверия можно записать равенство:

$$(p_1^u - b_{21} + a_{21})(a_{21})^{-1} = (b_{11} + c_{11} - p_1^u)(c_{11})^{-1},$$

из которого следует значение  $p_1^u$ :

$$p_1^u = (b_{21}c_{11} + b_{11}a_{21})(a_{21} + c_{11})^{-1}. \quad (5.5)$$

Таким образом, функцию дискуссии при взаимодействии двух моделей можно задать выражением:

$$f_{12}^{d1}(p_1, a_{21}, b_{21}, c_{21}) = \begin{cases} 0, & b_{11} + c_{11} < p_1 \leq b_{21} - a_{21}, \\ \frac{p_1 - b_{21} + a_{21}}{a_{21}}, & b_{21} - a_{21} < p_1 \leq \frac{b_{21}c_{11} + b_{11}a_{21}}{a_{21} + c_{11}}, \\ \frac{b_{11} + c_{11} - p_1}{c_{11}}, & \frac{b_{21}c_{11} + b_{11}a_{21}}{a_{21} + c_{11}} < p_1 \leq b_{11} + c_{11}. \end{cases} \quad (5.6)$$

Функция дискуссии, задающая интервал дискуссии, в пределах которого будет находиться решение задачи для одного параметра на конкретном этапе, определена. Однако это еще не решение задачи. Рассмотрим, каким образом в результате дискуссии вырабатывается решение, в той или иной степени устраивающее обе модели. Для этого обратимся к теории нечетких систем, в которой введено понятие дефазсификации [1] – преобразования нечеткого множества в единственное (четкое) значение, которое можно передать в объект управления непосредственно на исполнительные механизмы или через ЛПР.

Рассмотрим два метода дефазсификации функции дискуссии: 1) центра тяжести функции дискуссии; 2) максимума функции дискуссии.

Метод «центра тяжести функции дискуссии» основывается на идеях механики и исходит из предположения, что четкое значение  $p_1^d$  параметра  $p_1$  и, соответственно, решение  $p^*$ , вырабатываемое в результате дискуссии моделей, располагается в центре тяжести функции дискуссии (5.6). Центр тяжести функции дискуссии определяется следующим образом:

$$p_1^d = \left( \int p_1 \cdot f_{1,2}^{d,1}(p_1, a_{2,1}, b_{2,1}, c_{2,1}) dp_1 \right) \left( \int f_{1,2}^{d,1}(p_1, a_{2,1}, b_{2,1}, c_{2,1}) dp_1 \right)^{-1}. \quad (5.7)$$

Подставляя (5.6) в (5.7), получаем:

$$p_1^d = \frac{\int_{b_{2,1}-a_{2,1}}^{b_{2,1}c_{1,1}+b_{1,1}a_{2,1}} p_1 \frac{p_1 - b_{2,1} + a_{2,1}}{a_{2,1}} dp_1 + \int_{\frac{b_{2,1}c_{1,1}+b_{1,1}a_{2,1}}{a_{2,1}+c_{1,1}}}^{b_{1,1}+c_{1,1}} p_1 \frac{b_{1,1} + c_{1,1} - p_1}{c_{1,1}} dp_1}{\int_{b_{2,1}-a_{2,1}}^{b_{2,1}c_{1,1}+b_{1,1}a_{2,1}} \frac{p_1 - b_{2,1} + a_{2,1}}{a_{2,1}} dp_1 + \int_{\frac{b_{2,1}c_{1,1}+b_{1,1}a_{2,1}}{a_{2,1}+c_{1,1}}}^{b_{1,1}+c_{1,1}} \frac{b_{1,1} + c_{1,1} - p_1}{c_{1,1}} dp_1}.$$

Рассчитав интегралы и упростив выражение, получаем:

$$p_1^d = \frac{((a_{2,1} + c_{1,1})^2 (c_{1,1} (b_{2,1} - a_{2,1})^3 + a_{2,1} (b_{1,1} + c_{1,1})^3) - (b_{2,1} c_{1,1} + b_{1,1} a_{2,1})^3)}{3(a_{2,1} + c_{1,1})(a_{2,1} + c_{1,1})(c_{1,1} (a_{2,1} - b_{2,1})^2 + a_{2,1} (b_{1,1} + c_{1,1})^2) - (b_{2,1} c_{1,1} + b_{1,1} a_{2,1})^2}.$$

В этом случае центр тяжести фигуры будет означать некое компромиссное решение, принятое обеими моделями в ходе спора  $p^* = p_1^d$ , которое было выработано в результате дискуссии и отличается от пер-

воначально предложенных моделями вариантов. При этом коэффициенты согласия первой и второй модели будут вычисляться по формулам:

$$k_1^t = f_1^{t-1}(p_1^d, a_{11}, b_{11}, c_{11}) = (b_{11} + c_{11} - p_1^d)(c_{11})^{-1},$$

$$k_2^t = f_2^{t-1}(p_1^d, a_{21}, b_{21}, c_{21}) = (p_1^d - b_{21} + a_{21})(a_{21})^{-1}.$$

Таким образом, функции доверия задают области потенциального взаимодействия. Результат совмещения функций доверия – функция дискуссии. Функция дискуссии – область, ограничивающая варианты решения задачи, приемлемые для обеих моделей. Центр тяжести функции дискуссии – решение, уравнивающее эту функцию, т.е., переходя на язык спора, решение, которое будет удовлетворять требованиям обоих экспертов, учитывающее их точки зрения, аргументацию и возможность дискуссии. Точка равновесия (центр тяжести) функции дискуссии – точка интеграции знаний экспертов. Таким образом, если функция дискуссии – интеграция функций доверия экспертов (их пересечение), которая задает область поиска совместного решения, то точка равновесия – это решение, «уравнивающее» спорные мнения экспертов. Это точка, которая интегрирует знания и позволяет говорить о том, что, как бы ни был один из экспертов сильнее другого, решение будет принято с учетом мнений обоих.

Метод «максимума функции дискуссии» основывается на предположении, что наилучшее из полученных в ходе дискуссии решений, удовлетворяющее требованиям обеих моделей, должно обеспечивать максимально возможные при конкретных условиях задачи значения коэффициента согласия для каждого из экспертов.

Так как в случае двух экспертов функция дискуссии (5.6) имеет вид треугольника, то максимум этой функции будет находиться в его вершине, образованной пересечением функций доверия экспертов (5.5). Именно это значение будет значением параметра, принятым на данном этапе решения задачи в ходе дискуссии:

$$p^* = p_1^u = (b_{21}c_{11} + b_{11}a_{21})(a_{21} + c_{11})^{-1}.$$

Коэффициенты согласия первой и второй модели равны и вычисляются в соответствии с выражением:

$$k_1^t = k_2^t = (b_{11} - b_{21})(a_{21} + c_{11})^{-1} + 1.$$

Ситуация, когда функции доверия моделей не пересекаются (рис. 5.12), может быть записана следующим образом:

$$b_{j_1} - a_{j_1} > b_{l_1} + c_{l_1}, \quad (5.8)$$

где  $j, l \in \mathbb{N}, j, l \in [1, 2], l \neq j$ .

При такой ситуации спор не возникает, так как у моделей нет точек взаимодействия, т.е. не определена функция дискуссии. При этом возможны следующие варианты решения:

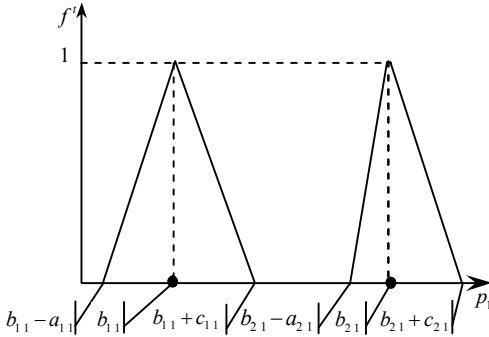


Рис. 5.12 – Функции доверия моделей не пересекаются

1) модель ЛПР сама выбирает решения  $p^*$ , так как модели в данной точке разногласия не могут выработать решение, не вступают в дискуссию;

2) модель ЛПР предлагает одной или обеим моделям расширить свои интервалы доверия для решения проблемы в текущей точке разногласия

для того, чтобы конфликтная ситуация была разрешена;

3) модель ЛПР останавливает процесс решения и выбирает другие модели с функциями доверия, позволяющими эффективно решить задачу.

В любом случае, все конфликтные ситуации и способы их разрешения записываются, чтобы при повторном решении этой задачи или похожей задачи, модель ЛПР подбирала модели так, чтобы между ними в процессе решения задачи не возникало конфликтов или их число сводилось к минимуму.

Таким образом, при моделировании процесса спора в точке разногласия, возможны три стратегии разрешения спора:

1) *Стратегия принятия.* Одна из моделей принимает решение, предложенное другой, при этом степень согласия с этим решением  $p^*$  выражается коэффициентом согласия  $k^l$ . Для этого необходимо, чтобы функции доверия моделей пересекались и решение, принимаемое одной из моделей, входило в функцию доверия другой, но не наоборот. При этом окончательное значение параметра, принятое на этом этапе –  $p^*$  – значение параметра, предложенное одной из моделей, а  $k^l$  – это коэффициент согласия другой модели. Таким образом, при использовании стратегии принятия выбирается единственная альтернатива для продолжения спора – решение, предложенное одной из моделей.



2) *Стратегия взаимного принятия.* Обе модели принимают решение, предложенное другой моделью, при этом степень согласия с этим решением выражается коэффициентами согласия первой и второй модели –  $k_1^t, k_2^t$ . Для этого необходимо, чтобы функции доверия моделей пересекались, и решения каждой модели принимались другой, т.е. решения моделей должны взаимно входить в функции доверия друг друга. В этом случае можно говорить о том, что при использовании стратегии взаимного принятия существуют две альтернативы для продолжения спора: решение, предложенное первой моделью –  $b_{11}$  с коэффициентом доверия второй модели этому решению –  $k_2^t$  и решение, предложенное второй моделью –  $b_{11}$  с коэффициентом доверия первой модели этому решению –  $k_2^t$ , т.е. есть альтернативы:  $(b_{11}, k_2^t)$  и  $(b_{21}, k_1^t)$ . При этом окончательное значение параметра, принятое на этом этапе –  $p^*$  – значение параметра, предложенное одной из моделей, коэффициент доверия к которому со стороны другой модели выше.

3) *Стратегия дискуссии.* Обе модели не принимают решение, предложенное третьей моделью. В этом случае рассматривается функция дискуссии и вырабатывается новое решение, удовлетворяющее требованиям обеих моделей. Для продолжения спора есть одна альтернатива – совместно принятое решение –  $p^*$ , причем каждая модель будет иметь свой коэффициент доверия к этому решению –  $k_1^t$  и  $k_2^t$ . Важно, что это решение устраивает обе модели.

Рассмотрим ситуацию, когда в точке разногласия при принятии решения заранее задан набор альтернатив, из которых нужно сделать выбор. Назовем эту стратегию «стратегией выбора из альтернатив». Эта ситуация может возникнуть по следующим причинам. В процессе рассуждения перед моделью не ставится никаких ограничений (кроме ограничений, накладываемых условиями задачи на численное представление результата), и параметр, полученный моделью, может принять любое значение из всей области его значений. Однако зачастую в процессе спора необходимо выбрать одну из заранее predeterminedных альтернатив, которые могут отличаться от «понятия» модели о максимально эффективном решении. Например, в результате спора модели получили решение, представляющее собой некий набор параметров, который не соответствует альтернативам выбора на данном этапе. Они могут задаваться моделью ЛПР.

Рассмотрим, как решается задача в этом случае. Пусть в определенной точке разногласия моделью ЛПР задано множество альтернатив

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_S\}$ , каждая из которых содержит значения параметров решаемой задачи, соответствующих этой альтернативе:

$$A_s = \{p_{1 A_s}, \dots, p_{n A_s}\},$$

где  $s$  – номер альтернативы  $s = \{1, 2, \dots, S\}$ ,  $i$  – номер параметра решаемой задачи  $i = \{1, 2, \dots, n\}$ . Количество экспертов, решающих задачу – два, количество параметров –  $n$

Для каждого параметра должна быть задана функция дискуссии экспертов. Тогда можно говорить о множестве функций дискуссии для всех параметров в точке разногласия:

$$F^d = \{f^{d 1}, f^{d 2}, \dots, f^{d n}\}.$$

Естественно, что в ходе решения задачи будут рассматриваться те альтернативы, у которых значения всех параметров включены в соответствующие этим параметрам функции дискуссии. Обозначим множество рассматриваемых альтернатив как подмножество основного множества  $A$ , т.е.  $A' \subset A$ , при условии, что для всех элементов  $A'$  выполняется условие:  $\forall p_{i A_s} \in f^{d i}$ . Таким образом, во множестве  $A'$  содержатся только те альтернативы, которые могут быть выбраны в процессе спора двух экспертов:

$$A' = \{A'_1, A'_2, \dots, A'_M\},$$

где  $m$  – номер альтернативы,  $m = \{1, 2, \dots, M\}$ .

Так как каждое значение параметра, предлагаемое альтернативой, лежит в области функции дискуссии, то оно имеет свою оценку у каждой модели, выраженную коэффициентом доверия, что позволяет записать каждую альтернативу как набор пар – коэффициентов доверия экспертов к каждой альтернативе:

$$\overline{A'_m} = \{(k_{1 A'_m}^1, k_{2 A'_m}^1), \dots, (k_{1 A'_m}^n, k_{2 A'_m}^n)\}.$$

По каждому параметру для каждой альтернативы есть две оценки – коэффициенты доверия каждого эксперта. При выборе альтернатив будем использовать метод суммы наименьших коэффициентов по каждо-

му параметру. При этом сравнение альтернатив сводится к сравнению этих сумм. Оценка альтернативы вычисляется по формуле:

$$\overline{OA}_m = \sum_{i=1}^n \min(k_{1 A_m}^{i P_i}, k_{2 A_m}^{i P_i}),$$

а лучшая альтернатива имеет большую оценку:

$$A^* = \max_m(\overline{OA}_m).$$

В итоге приведем алгоритм моделирования спора в СППР с использованием ГИИС:

- 1) формулировка задачи: выбор количества моделей, определение формата исходных и выходных данных (параметры задачи – положительные числа);
- 2) декомпозиция задачи на страты методов спорящих моделей;
- 3) определение количества точек разногласия, количества и характеристик параметров, которые будут определяться в этих точках; определение альтернатив для выбора в точках разногласия;
- 4) задание функций доверия каждой модели для каждого параметра;
- 5) инициирование решения задачи каждой моделью;
- 6) решение каждой моделью своей подзадачи;
- 7) точка разногласия: эксперты должны определить значения требуемых параметров, организуя спор;
- 8) если альтернативы выбора заданы, переходим к п. 9, иначе к п. 10;
- 9) определение лучшей альтернативы по стратегии «выбора из альтернатив». Если решение успешно, параметры лучшей альтернативы становятся исходными параметрами для дальнейшего решения задачи, переход к п. 11; если решение не успешно, модель ЛПР принимает решение о смене альтернатив, выборе новых оппонентов или задании новых функций доверия моделей, после чего задача решается сначала, либо переход к п. 6;
- 10) решение задачи в точке разногласия методами «принятия», «взаимного принятия» и «дискуссии». Если решение успешно, параметры, полученные при решении задачи в точке разногласия, становятся исходными параметрами для дальнейшего решения задачи, переход к п. 11; если решение не успешно, модель ЛПР принимает решение о смене альтернатив, выборе новых оппонентов или задании новых функций доверия моделей, после чего задача решается сначала, либо переход к п. 6;
- 11) если решение задачи не завершено, переход к п. 6, или результаты решения задачи передаются модели ЛПР, которая может принять реше-

ние о повторном решении задачи с новыми моделями или принятии полученных результатов.

Резюмируя раздел, авторы отмечают его практическую незавершенность: к сожалению, на момент написания книги не удалось реализовать и апробировать алгоритм функционирования ГиИС с нечеткой системой спора автономных моделей. Это объясняет содержание разд. 5.4, в котором механизм спора моделируется без нечеткой логики.

#### **5.4 Решение сложной логистической задачи методом организации спора моделей**

Рассмотрим пример решения СЛЗ доставки товаров со склада в торговые точки методом спора моделей с единственной точкой разногласия в конце рассуждений.

Водитель загружает в грузовик товары со склада и развозит их по торговым точкам, пункт со складом – отправная точка движения. У водителя есть список пунктов для доставки товаров, которые связаны между собой дорогами. Необходимо развезти товары и вернуться, посещая каждый пункт один раз. Водителю выдаются командировочные и оговариваются сроки завершения работы. При движении из одного пункта в другой тратится часть командировочных. В идеальной ситуации водитель должен посетить все пункты, но это может быть невозможным из-за нехватки денег, времени или того и другого. Ставится задача выбора маршрута движения с посещением максимального числа пунктов при минимальных затратах и минимальном пройденном расстоянии.

Водитель, находясь в отправной точке, сюда же и возвращается. На выбор последующего пункта влияют: длина маршрутов, время и стоимость движения до очередного пункта, возможность наличия пробок на дороге. Посетить все торговые точки водитель должен за ограниченное время, рабочую смену.

Сформулируем постановку задачи.

Заданы  $n$  городов, расстояния, стоимость и время перемещения между городами. Водитель должен выехать из первого города, посетить по разу все города и вернуться в исходный. В каком порядке нужно объезжать города, чтобы затраты на перемещения не превысили командировочных, время прохождения маршрута было не больше срока выполнения задания и пройденное расстояние было минимальным?

Пусть длина дороги –  $l_{ij}$ ; время движения –  $t_{ij}$ ; стоимость движения –  $c_{ij}$  между городами  $i, j$ . Сформируем матрицы: расстояний ( $L$ ), времен ( $T$ ) и стоимостей ( $C$ ) на переезд из одного города в другой. Требуется найти маршрут  $\pi$ , длина и стоимость которого будут стремиться к минимальным значениям:

$$\begin{cases} l^\pi = \min(\sum_{i=1}^{n-1} l_{\pi(i) \pi(i+1)} + l_{\pi(n) \pi(1)}), \\ c^\pi = \min(\sum_{i=1}^{n-1} c_{\pi(i) \pi(i+1)} + c_{\pi(n) \pi(1)}), \end{cases}$$

при условии, что время поездки не превысит интервала  $T_{zp}$  :

$$\sum_{i=1}^{n-1} t_{\pi(i) \pi(i+1)} + t_{\pi(n) \pi(1)} \leq T_{zp}.$$

Для решения СЛЗ методом спора моделей в ФГиИС разработана «Система компьютерного моделирования (СКМ)» для имитационных экспериментов и комбинирования рассуждений экспертов.

В системе реализованы три метода рассуждения экспертов:

- 1) на основе продукционных правил «Если ... то ...» [1];
- 2) на основе опыта [233];
- 3) с применением фактора уверенности [233].

«Система компьютерного моделирования (СКМ)» – это интегрированная среда для решения пользователем задачи с применением трех методов рассуждения и наблюдений за спором функционально избыточных моделей.

Каждая модель рассуждения обеспечивает автономное решение задачи. Пользователь может сравнить результаты моделей рассуждения и разрешить спор моделей. СКМ дает возможность решить задачу автоматически, имитируя три линии рассуждений эксперта под управлением модели ЛПР.

Имитируется решение СЛЗ в СППР, состоящей из ЛПР и трех экспертов: экспедитора, финансиста и аналитика. Эксперту транспортного отдела соответствует модель рассуждений на основе опыта, эксперту экономического отдела – на основе продукционных правил вида «Если ... то ...», а эксперту аналитического отдела – с использованием фактора уверенности. Назовем эти модели э-, ф- и а-моделью.

В СКМ каждая линия рассуждения имитирует решение задачи экспертом. Так как он видит задачу профессионально, исходная задача разделена на три подзадачи, соответствующие представлениям о ней трех экспертов. Эксперт для решения подзадачи формирует набор исходных данных. Результаты решения подзадач поступают в модель ЛПР, сравниваются, и выбирается подходящий. В качестве дополнительной информации ЛПР предоставляются сведения об уверенности в выборе

маршрута, сформированном рассуждениями на основе правил. В модели ЛПР вычисляется «победитель» спора. Выбрать решение сложно, поскольку: 1) результат может быть представлен лингвистическими переменными; 2) в результатах решения есть оценки параметров задачи, не позволяющие однозначно оценить принятые частные решения. Эксперты обосновывают свои решения, чтобы повысить доверие к ним ЛПР, а в СКМ для этого имитируется аргументация. Рассмотрим три модели, используемые в системе: модель рассуждений на основе опыта, продукционную базу знаний и модель рассуждений с использованием фактора уверенности.

*Модель рассуждений с использованием опыта.* Принимая решение на основе опыта, эксперт не строит цепочек рассуждений, а оперирует знаниями о решениях подобных задач. Его память позволяет быстро найти подходящий прецедент [5], он сопоставляет ситуации и формирует решение согласно условиям задачи. Рассуждения на основе опыта в СКМ имитируются аналогично «жизненному циклу» СВР-систем [5].

В системе СКМ при моделировании решения задачи методом имитации рассуждений эксперта на основе опыта роль памяти человека играет база прецедентов, в которой содержатся условия задач и результатов их решения. При необходимости решения задачи происходит поиск в базе такого прецедента, который наиболее похож на ее условия. Сходство прецедента выражается коэффициентом подобия  $K_{ms}$ , значение которого лежит в интервале  $[0, 1]$ ; чем больше его значение, тем прецедент релевантнее условию подзадачи.

Суть механизма – сопоставление данных задачи с прецедентами, описывающими решение задач, из базы прецедентов. База прецедентов – текстовый файл, состоящий из секции условия и секции решения. Секция условия начинается со слова *Precedent* и определяет: список городов; начальный город маршрута; время, выделенное на прохождение маршрута; отношения между парами городов. Отношение между двумя городами задается расстоянием, временем, стоимостью и имеет формат:

<Пункт отправления><Пункт назначения>  $l$  <Значение длины>,  
<Пункт отправления><Пункт назначения>  $t$  <Значение времени>,  
<Пункт отправления><Пункт назначения>  $c$  <Значение стоимости>.

Сведения о результате решения задачи для исходных данных из секции условия содержит секция решения. Она начинается словом «Result» и включает результаты решения: рациональный маршрут-решение, длину, время и стоимость.

Модель рассуждений на основе опыта в системе СКМ функционирует следующим образом. Пользователь задает исходные данные и выбирает файл базы прецедентов. Для выбора прецедента параметры исходной задачи сравниваются с параметрами прецедента, по результатам сравнения вычисляется коэффициент подобия. Алгоритм сравнения:

- 1) проверяется совпадение списка городов в прецеденте и в задаче;
- 2) проверяется совпадение начального города в прецеденте и в задаче;
- 3) сравниваются параметры задачи и прецедента: граничное время, расстояние, время и стоимость перемещения между парами городов;
- 4) рассчитывается для пары городов и для параметра коэффициент подобия  $K_n$ , который умножается на «значимость» параметра  $w$  (задаются экспертами для расстояния, времени и стоимости);
- 5) рассчитывается коэффициент подобия прецедента  $K_m$  по формуле:

$$K_m = \frac{K_{np} \cdot w_{zp} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ((K_{npj} \cdot w_p) + (K_{n\delta j} \cdot w_\delta) + (K_{ncij} \cdot w_c))}{i \cdot (j-1) \cdot 3}, \quad i \neq j,$$

где  $K_{np}$ ,  $K_{n\delta}$ ,  $K_{nc}$ ,  $K_{npj}$  – коэффициенты подобия расстояния, времени, стоимости, граничного времени;  $w_{zp}$ ,  $w_p$ ,  $w_\delta$ ,  $w_c$  – веса параметров «граничное время», «расстояние», «время», «стоимость».

Прецедент с максимальным значением коэффициента подобия выбирается для решения задачи, после чего он адаптируется к текущей ситуации: в качестве рационального маршрута выбирается маршрут из прецедента, но его параметры рассчитываются исходя из данных задачи. Например, для пяти городов  $A, B, C, D, E$  в результате решения на основе опыта был выбран прецедент с маршрутом  $ABDECA$ . Так как прецедент не совпадает с задачей, то характеристики его маршрута будут отличаться от характеристик маршрута в задаче. Чтобы маршрут отвечал условиям задачи, последовательность пунктов маршрута берется из прецедента, а параметры его рассчитываются на основе данных задачи.

Для пользователя дополнительно выдается информация о коэффициенте подобия. Чем выше значение коэффициента, тем больше доверия у ЛПР вызывает результат решения задачи.

*Модель рассуждения на основе продукционных правил вида «Если ... то ...».* Разработана база знаний, содержащая правила «Если ... то ...».

Правила делятся на группы: 1) выбора лучшей альтернативы из множества возможных; 2) добавления лучшей альтернативы к текущему маршруту; 3) завершения рассуждения, когда все города пройдены; 4) остановки рассуждений, когда время прохождения маршрута превысит

лимит. Всего в базе знаний 39 правил. На рис. 5.13 показан фрагмент графа И/ИЛИ для базы знаний.

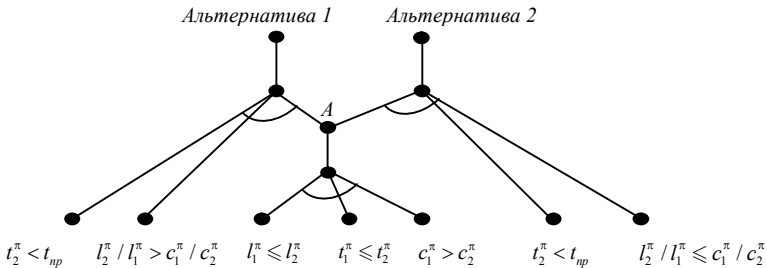


Рис. 5.13 — Фрагмент графа И/ИЛИ выбора лучшего из двух альтернативных маршрутов

Этот подграф отражает процесс сравнения и выбора лучшего из двух альтернативных маршрутов. Первый маршрут имеет параметры: длина ( $l_1^\pi$ ), время ( $t_1^\pi$ ), стоимость ( $c_1^\pi$ ), второй маршрут – длина ( $l_2^\pi$ ), время ( $t_2^\pi$ ), стоимость ( $c_2^\pi$ ). Параметр  $A$  – служебный параметр для сокращения пространства поиска на графе И/ИЛИ, параметр  $t_{np}$  – эвристическая оценка времени передвижения между любыми двумя пунктами. Подграф на рис. 5.13 отображает правила: 1) Если  $l_1^\pi \leq l_2^\pi$  и  $t_1^\pi \leq t_2^\pi$  и  $c_1^\pi > c_2^\pi$ , то  $A$ ; 2) Если  $A$  и  $t_2^\pi \leq t_{np}$  и  $l_2^\pi / l_1^\pi > c_1^\pi / c_2^\pi$ , то Альтернатива 1; 3) Если  $A$  и  $t_2^\pi \leq t_{np}$  и  $l_2^\pi / l_1^\pi \leq c_1^\pi / c_2^\pi$ , то Альтернатива 2. Альтернатива 1 и Альтернатива 2 – правая часть продукционного правила для выбора первого или второго маршрута для продолжения движения.

Моделирование задачи в СКМ рассуждениями на основе правил вида «Если ... то ...» выполняется с привлечением информации об уверенности эксперта в принятом решении и имитируется экспертной системой, разработанной в оболочке КАРРА РС [234].

*Модель рассуждений на основе фактора уверенности.* В системе СКМ рассуждения на основе фактора уверенности моделируются в стэнфордской алгебре фактора уверенности [233]. Рассуждения а-модели – это «рассуждения на рассуждениях», она анализирует факты и рассуждения ф-модели, делает вывод об уверенности в принятом ф-моделью решении. Процесс решения задачи формирования рационального маршрута разбивается на два этапа: выбор пункта следования из множества альтернатив и добавление пункта к маршруту. Пункт следования ищется попарным сравнением альтернатив. После сравнения лучшая альтернатива остается для дальнейшего поиска. Когда в списке остается одна альтернатива, она признается лучшей и соответствующий



ей город добавляется к маршруту. При попарном сравнении альтернатив лучшая выбирается в результате применения некоторого правила, например, *Rule1*. Известны фактор уверенности в предпосылках этого правила (*CFp*) и фактор уверенности в самом правиле (*CFr*) [233]. Фактор уверенности в выборе лучшей альтернативы определяется как (*Cfa*) = (*CFp*) \* (*CFr*). Так как лучшая альтернатива определяется попарными сравнениями, имеем факторы уверенности (*CFa1*), ..., (*CFaN*). Поскольку она находится применением правил: *Rule1* и *Rule2* и ... и *RuleN*, то обобщенный фактор уверенности в ее выборе рассчитывается по формуле  $\min\{CFa1, CFa2, \dots, CFaN\}$ . При добавлении альтернативы (пункта) к маршруту фактор уверенности эксперта в маршруте вычисляется по формуле [233]:

$$CFm + Cfa - (CFm * Cfa),$$

где *CFm* и *Cfa* – факторы уверенности а-модели в маршруте до и после добавления нового города. После получения результата вычисляется значение фактора уверенности а-модели в качестве этого маршрута.

Таким образом, гетерогенное модельное поле для решения СЛЗ методами ФГиИС включает три модели: э-модель, ф-модель и а-модель.

Сформулируем СЛЗ. Пусть водителю необходимо посетить 10 городов: *A, B, C, D, E, F, G, H, J, K*. Движение начинается и заканчивается в городе *A*. Известны расстояния, время движения и стоимость движения между городами. Время движения включает: время на перемещение между городами, простои в ожидании разгрузки товара, в ожидании отправки. Стоимость движения включает стоимость топлива, амортизацию автомобиля, зарплату водителя. На рис. 5.14 представлен граф СЛЗ, а в табл. 5.1 – 5.3 – расстояния, времена движения и стоимости движения между городами на рис. 5.14.

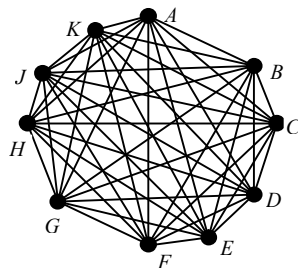


Рис. 5.14 — Граф СЛЗ

Исходные данные в табл. 5.1 – 5.3, сгенерированы программно. Диапазон значений данных: расстояние  $10 < l_{ij} < 120$  (км); время  $30 < t_{ij} < 180$  (мин); стоимость  $100 < c_{ij} < 400$  (усл.ед.). На выполнение задания водителю – лимит  $T_{ep} = 1480$  мин. Для решения задачи методом рассуждений на основе правил вида «Если ... то ...» используется эвристическая оценка  $t_{np}$  – предположительное время переезда между двумя любыми городами ( $t_{np} = 120$  мин). На основании этой оценки выбирается правило, продолжающее рассуждение.

Таблица 5.1 – Расстояния между городами  $l_{ij}$ (км)

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
A		18	11	75	54	17	26	110	108	20
B	18		89	45	51	39	14	37	22	61
C	11	89		115	88	51	87	58	104	114
D	75	45	115		79	100	112	64	98	85
E	54	51	88	79		45	81	101	89	66
F	17	39	51	100	45		93	102	45	29
G	26	14	87	112	81	93		11	83	58
H	110	37	58	64	101	102	11		55	91
J	108	22	104	98	89	45	83	55		91
K	20	61	114	85	66	29	58	91	91	

Таблица 5.2 – Время движения между городами  $t_{ij}$ (мин)

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
A		126	110	157	165	121	64	175	171	147
B	126		177	169	126	119	65	95	64	159
C	110	177		175	140	124	158	116	162	177
D	157	169	175		136	166	172	142	161	175
E	165	126	140	136		133	163	170	163	145
F	121	119	124	166	133		174	162	139	170
G	64	65	158	172	163	174		85	153	103
H	175	95	116	142	170	162	85		110	146
J	171	64	162	161	163	139	153	110		155
K	147	159	177	175	145	170	103	146	155	

Таблица 5.3 – Стоимость движения между городами  $c_{ij}$ (усл.ед.)

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
A		202	132	329	328	175	332	398	398	391
B	202		391	395	215	292	354	231	315	321
C	132	391		388	314	275	328	323	399	385
D	329	395	388		367	366	381	278	355	382
E	328	215	314	367		298	399	361	362	298
F	175	292	275	366	298		393	356	376	296
G	332	354	328	381	399	393		128	390	361
H	398	231	323	278	361	356	128		229	322
J	398	315	399	355	362	376	390	229		327
K	391	321	385	382	298	296	361	322	327	

Для оценки полученных результатов найдем методом ближайшего соседа оптимальные маршруты по трем критериям: времени, стоимости и расстоянию. Эти результаты используются для оценки качества решений, полученных методом спора моделей. Было проведено три эксперимента.

*Эксперимент 1.* Исходные данные – значения параметров из табл. 5.1 – 5.3. Учтены следующие факты:

- 1) При движении по дорогам от или к пункту *B* время движения возросло на 40 мин, а стоимость движения – на 150 усл. ед.
- 2) При движении по дорогам от или к пункту *D* время движения возросло на 10 мин, а стоимость движения – на 120 усл. ед.
- 3) При движении по дорогам от или к пункту *H* время движения возросло на 40 мин, а стоимость движения – на 100 усл. ед.
- 4) При движении по дорогам от или к пункту *F* время движения возросло на 50 мин, а стоимость движения – на 150 усл. ед.

Имитация линии рассуждений с использованием правил вида «Если ... то ...» (ф-модель и а-модель).

Поскольку а-модель дополняет рассуждения ф-модели, эта линия рассуждений в отдельную не оформлена. Можно говорить, что линии рассуждений ф-модели и а-модели сотрудничают, так как линия рассуждений на основе фактора уверенности помогает аргументировать решения, принятые при рассуждении с использованием правил «Если ... то ...».

Маршрут формируется применением правил из базы знаний. На этапе решения задачи следования выбирается с использованием одного из правил.

На ф-модели получим маршрут: *ACEKGHJBFDA*. Его характеристики: длина  $l^\pi$  – 525 км; затраченное время  $t^\pi$  – 1479 мин; стоимость  $c^\pi$  – 3804 усл. ед.

Уверенность а-модели в этом маршруте – 0,9376 – вычислена перемножением уверенностей а-модели в каждом правиле, применяемом при решении задачи. Маршрут изображен жирной линией на рис. 5.15, пунктиром показаны невыгодные переходы, стоимость и время которых возросли, а сплошной тонкой линией изображены переходы, характеристики которых не изменились по сравнению с переходами на рис. 5.14.

С использованием э-модели получим маршрут: *ACHGBJFKEDA*. Его характеристики: длина  $l^\pi$  – 410 км; затра-

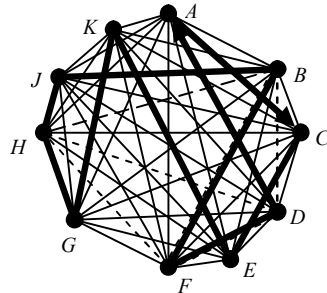


Рис. 5.15 — Маршрут при решении задачи с помощью правил «Если ... то ...»

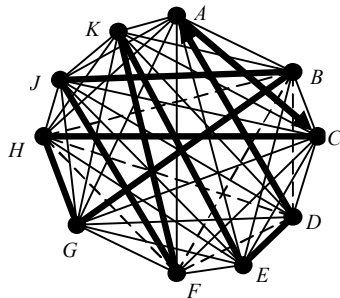


Рис. 5.16 — Маршрут при решении задачи на основе опыта

ченное время  $t^{\pi} = 1467$  мин; стоимость  $c^{\pi} = 3958$  усл. ед. Маршрут изображен жирной линией на рис. 5.16, пунктиром показаны невыгодные переходы, стоимость и время которых возросли, а сплошной тонкой линией – переходы, характеристики которых не изменились по сравнению с рис. 5.14.

Результаты эксперимента 1 сведены в табл. 5.4, а на рис. 5.17 дана графическая интерпретация результатов сравнительного анализа маршрутов.

Таблица 5.4 – Результаты решения СЛЗ в эксперименте 1

Описание маршрута	Маршрут	Длина (км)	Время (мин)	Стоимость (усл.ед.)
Решение задачи с помощью правил «Если ... то ...» Коэффициент уверенности, полученный на основе фактора уверенности = 0,94	<i>ACEKGH</i> <i>JBFDA</i>	525	1479	3804
Решение задачи на основе опыта Коэффициент подобия = 0,94	<i>ACHGBJ</i> <i>FKEDA</i>	410	1467	3958
Метод ближайшего соседа (критерий – расстояние)	<i>ACFKGH</i> <i>BJEDA</i>	462	1487	3836
Метод ближайшего соседа (критерий – время)	<i>AGKECJ</i> <i>BHDFA</i>	582	1482	4106
Метод ближайшего соседа (критерий – стоимость)	<i>ACEKJH</i> <i>GFBD A</i>	574	1644	3877

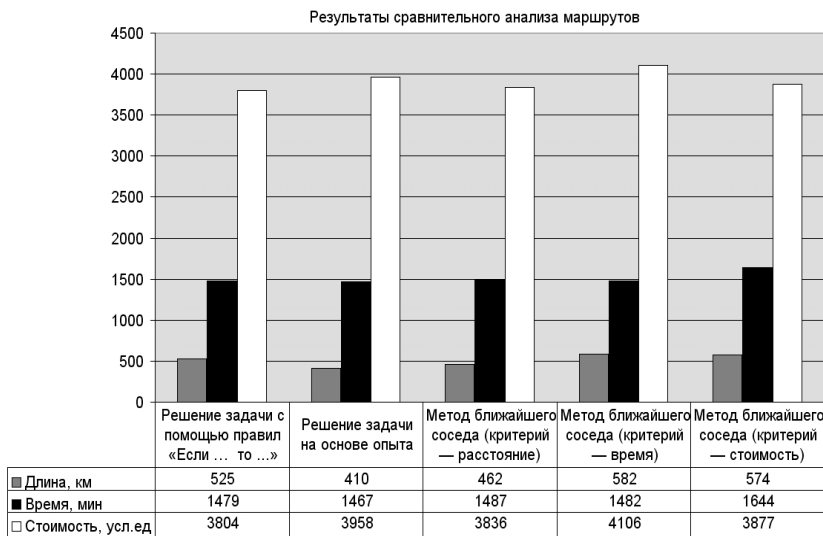


Рис. 5.17 – Сравнение маршрутов в эксперименте 1

По итогам эксперимента 1 можно сделать следующие выводы. Результаты решения на основе опыта и с помощью правил позволяют организовать рациональные маршруты, время движения по которым  $T_{сп} = 1480$ . Минимальный по расстоянию – маршрут, полученный рассуждениями на основе опыта, а минимальный по стоимости – полученный с помощью правил. О хорошем качестве результатов говорит то, что по критерию расстояния маршрут, полученный с помощью правил, уступает только лучшему маршруту по расстоянию. В этом примере разными методами получены разные маршруты, один из которых лучше по стоимости, а другой – по расстоянию. Выбор зависит от ЛПР. Предпочтительнее вариант, предложенный э-моделью, так как он не использует переходы, параметры которых были увеличены.

*Эксперимент 2.* Исходные данные – значения параметров из табл. 5.1 – 5.3, возросла стоимость передвижения по дорогам:  $AC$  на 150 усл.ед.;  $CF$  на 250 усл.ед.;  $BJ$  на 100 усл.ед.;  $FB$  на 100 усл.ед.;  $JH$  на 300 усл.ед.;  $HG$  на 150 усл.ед.;  $GK$  на 200 усл.ед.;  $KE$  на 50 усл.ед.;  $ED$  на 100 усл.ед.;  $DA$  на 150 усл.ед. Эти факты учтены для того, чтобы задача была приближена к практической, так как в реальности параметры задач редко остаются неизменными.

С использованием ф-модели получим маршрут:  $ACFBGHDKEJA$ . Он показан жирной линией на рис. 5.18, а сплошной тонкой линией изображены переходы, характеристики которых не изменились по сравнению с переходами на рис. 5.14. Характеристики маршрута: длина  $l^\pi$  – 538 км; затраченное время  $t^\pi$  – 1299 мин; стоимость  $c^\pi$  – 3549 усл.ед.

Маршрут формируется рассуждениями на базе знаний. На каждом этапе решения задачи выбор пункта следования осуществляется с использованием одного из правил. Уверенность а-модели в этом маршруте – 0,8496.

Применяя э-модель, получим маршрут:  $ACFKGHBVEDA$ . Он показан жирной линией на рис. 5.19. Сплошной

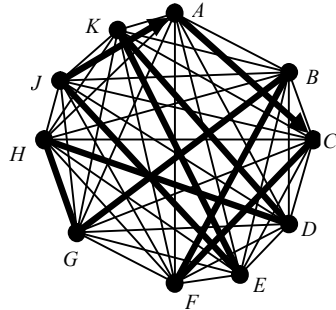


Рис. 5.18 – Маршрут при решении задачи с помощью правил «Если ... то ...»

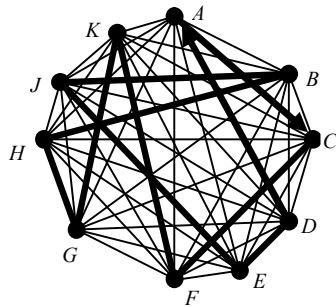


Рис. 5.19 – Маршрут при решении задачи на основе опыта

тонкой линией изображены переходы, характеристики которых не изменились по сравнению с рис. 5.14. Характеристики маршрута: длина  $l^\pi$  – 462 км; затраченное время  $t^\pi$  – 1207 мин; стоимость  $c^\pi$  – 3836 усл. ед. Коэффициент подобия при выборе прецедента = 0,9866.

Для оценки результатов вычислим оптимальные маршруты для эксперимента 2 по критериям времени, стоимости и расстояния, вычисления – по методу ближайшего соседа. Результаты эксперимента 2 представлены в табл. 5.5, а на рис. 5.20 дана их графическая интерпретация.

Таблица 5.5 – Результаты решения СЛЗ в эксперименте 2

Описание маршрута	Маршрут	Длина (км)	Время (мин)	Стоимость (усл.ед.)
Решение задачи с помощью правил «Если ... то ...» Коэффициент уверенности, полученный на основе фактора уверенности = 0,8496	<i>ACFBG</i> <i>HDKEJA</i>	538	1299	3549
Решение задачи на основе опыта Коэффициент подобия = 0,9866	<i>ACFKG</i> <i>HBJEDA</i>	462	1207	3846
Метод ближайшего соседа (критерий – расстояние)	<i>ACFKG</i> <i>HBJEDA</i>	462	1207	3846
Метод ближайшего соседа (критерий – время)	<i>AGBJH</i> <i>CFEDKA</i>	455	1134	3966
Метод ближайшего соседа (критерий – стоимость)	<i>ACEKJ</i> <i>HGFBDA</i>	575	1452	2999

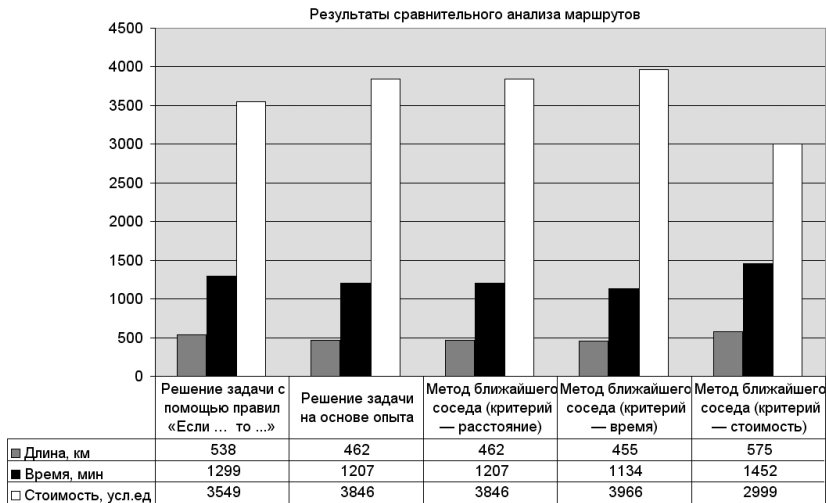


Рис. 5.20 – Сравнение маршрутов в эксперименте 2

По итогам эксперимента 2 можно сделать следующие выводы. Результаты решения СЛЗ на основе опыта и с помощью правил позволяют организовать рациональные маршруты обхода городов. Время движения по этим маршрутам не больше лимита  $T_{zp} = 1480$ . Маршрут, полученный при решении с помощью опыта, совпал с маршрутом, лучшим по расстоянию. О хорошем качестве результатов говорит и то, что по критерию стоимости маршрут, полученный при решении с помощью правил, уступает только лучшему маршруту по стоимости. В результате решения разными методами получены разные маршруты, один из которых лучше по стоимости, другой – по расстоянию, оба маршрута дают хорошее решение. Выбор одного из них зависит от предпочтений ЛПП.

*Эксперимент 3.* Исходные данные – значения параметров из табл. 5.1 – 5.3, возросли расстояния, стоимости и время передвижения по следующим дорогам:

- 1)  $AC$ : расстояние на 5 км, время на 10 мин, стоимость на 70 усл.ед.;
- 2)  $CF$ : расстояние в два раза, время на 40 мин, стоимость на 40 усл.ед.;
- 3)  $BJ$ : расстояние на 20 км, время на 70 мин, стоимость на 200 усл.ед.;
- 4)  $FB$ : расстояние в два раза, время в два раза, стоимость на 40 усл.ед.;
- 5)  $JH$ : расстояние на 30 км, время на 50 мин, стоимость на 150 усл.ед.;
- 6)  $HG$ : расстояние на 10 км, время на 60 мин, стоимость на 80 усл.ед.;
- 7)  $GK$ : расстояние в два раза, время на 80 мин, стоимость на 200 усл.ед.;
- 8)  $KE$ : расстояние на 50 км, время на 50 мин, стоимость на 120 усл.ед.;
- 9)  $ED$ : расстояние на 30 км, время на 60 мин, стоимость на 300 усл.ед.;
- 10)  $DA$ : расстояние на 5 км, время на 20 мин, стоимость на 90 усл.ед.

С использованием ф-модели получен маршрут:  $ACHGBEFKJDA$ , показан жирной линией на рис. 5.21. Сплошной тонкой линией изображены переходы, характеристики которых не изменились по сравнению с рис. 5.14. Характеристики маршрута: длина  $l^\pi$  – 503 км; затраченное время  $t^\pi$  – 1368 мин; стоимость  $c^\pi$  – 2997 усл.ед. Маршрут формируется применением правил из базы знаний, уверенность а-модели в маршруте – 0,95.

С использованием э-модели получен маршрут:  $ACHGBEFKJDA$ . Его характеристики: длина  $l^\pi$  – 503 км; затраченное время  $t^\pi$  – 1368 мин; стоимость  $c^\pi$  – 2997 усл.ед. Коэффициент подобия при выборе прецедента = 0,9776. Полу-

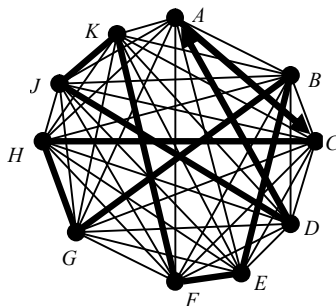


Рис. 5.21 – Маршрут при решении задачи с помощью правил «Если ... то ...»

ченный маршрут совпадает с маршрутом, который получен при решении с помощью правил.

Для оценки результатов вычислим оптимальные маршруты для эксперимента 3 по критериям: времени, стоимости и расстоянию (вычисления – методом ближайшего соседа). Результаты эксперимента 3 сведены в табл. 5.6, а на рис. 5.22 дана их графическая интерпретация.

Таблица 5.6 – Результаты решения СЛЗ в эксперименте 3

Описание маршрута	Маршрут	Длина (км)	Время (мин)	Стоимость (усл.ед.)
Решение задачи с помощью правил «Если ... то ...» Коэффициент уверенности, полученный на основе фактора уверенности = 0,95	<i>ACHGBE</i> <i>FKJDA</i>	503	1368	2997
Решение задачи на основе опыта Коэффициент подобия = 0,9776	<i>ACHGBE</i> <i>FKJDA</i>	503	1368	2997
Метод ближайшего соседа (критерий – расстояние)	<i>ACHGBJ</i> <i>FKDEA</i>	473	1425	3551
Метод ближайшего соседа (критерий – время)	<i>AGBHCE</i> <i>FJKDA</i>	569	1259	3356
Метод ближайшего соседа (критерий – стоимость)	<i>AFKBEC</i> <i>HGDJA</i>	643	1391	2986

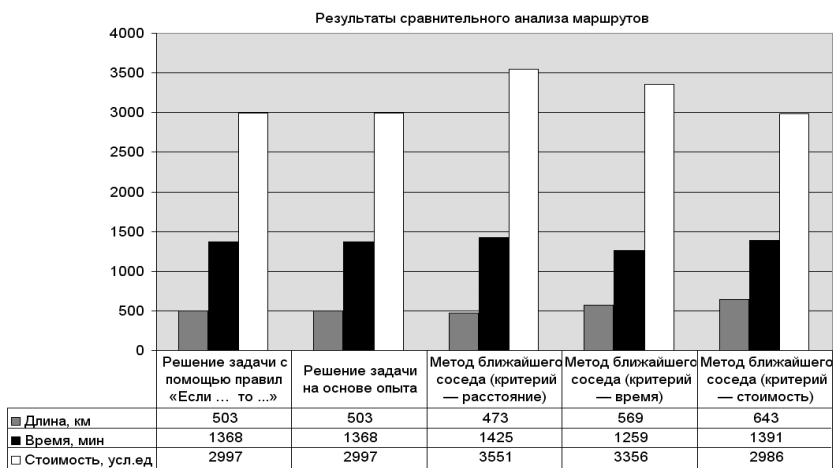


Рис. 5.22 – Сравнение маршрутов в эксперименте 3

По итогам эксперимента 3 можно сделать следующие выводы. Результаты, полученные при решении на основе опыта и с помощью правил, позволяют организовать рациональный маршрут обхода городов, время движения по этим маршрутам не больше  $T_{sp} = 1480$ . Маршрут, полученный при решении с помощью опыта, совпал с маршрутом, полу-



ченным при решении с использованием правил, что указывает на хорошее качество решения. Об этом говорит и то, что полученные решения по критерию стоимости незначительно уступают только лучшему маршруту по стоимости, а по критерию расстояния – лучшему маршруту по расстоянию. По остальным характеристикам они превосходят другие маршруты.

Экспериментально установлено, что при решении методами рассуждений на основе опыта и на основе продукционных правил получены релевантные результаты. Маршруты не уступают, а иногда и лучше маршрутов, рассчитанных оптимизацией одного параметра.

Удалось организовать спор моделей, так как решение задачи разными методами приводило к разным результатам, однако оба результата были релевантны. Дополнительными параметрами для выбора модели рассуждения служат информация об уверенности эксперта в решении (решение с помощью продукционных правил) и информация о степени подобия задачи прецеденту (решение на основе опыта). Решение на основе опыта позволяет быстро получать хорошие результаты, но требует наличия большой базы прецедентов. Использование ф-модели дает решение в любой ситуации, но требует больше времени.

Применение а-модели позволяет оценить маршрут, полученный с помощью правил. Оценка выражается в уверенности в выборе этого маршрута, самое низкое ее значение получено в эксперименте 2 и равно 0,84: анализ альтернативных маршрутов позволяет сделать вывод, что это решение по качеству уступает им незначительно. Самое высокое значение фактора уверенности равно 0,95 и получено в эксперименте 3: анализ альтернативных маршрутов показывает, что этот маршрут – один из лучших, причем его параметры совпали с параметрами маршрута, полученного при решении на основе опыта.

В результате проведенных экспериментов подтверждены теоретическое обоснование необходимости учета эффекта спора при решении сложных задач и релевантность разработанных моделей сложной логистической задаче, т.е. показано преимущество микроуровневых моделей СППР со спором автономных моделей  $\widetilde{DSS}_{disp} \subseteq \widetilde{DSS}$  (разд. 2.4) перед моделями без такового  $\widetilde{DSS}_{disp} \subseteq \widetilde{DSS}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Появление экспертных систем в 60-х гг. прошлого века должно было, по мнению их создателей, произвести переворот в процессах принятия решений, в результате которого компьютер смог бы решать практические задачи не хуже человека. Однако вскоре этот подход показал свою ограниченность. Позже появился бионический, а затем и синергетический подход к ИИ. Очевидно, что это не последняя смена парадигмы в исследованиях по ИИ, но уже сейчас видно, что моделирование рассуждений коллектива специалистов открывает более широкие перспективы, чем моделирование на том или ином уровне рассуждений одного человека.

В рамках синергетического подхода к ИИ развивается многообразие методов: гибридные системы, интегрированные экспертные системы, многоагентные системы, гибридные интеллектуальные системы и другие. Изучению гибридных интеллектуальных систем, в частности функциональных гибридных интеллектуальных систем и гибридных интеллектуальных многоагентных систем, посвящена настоящая монография. В этом смысле она продолжает серию работ, опубликованных в 2001, 2007 и 2011 гг., по интеграции разнородных методов и моделированию коллективных процессов и эффектов, возникающих в СППР, с целью повышения эффективности взаимодействия автономных методов решения задач.

В этой связи исследованы особенности коллективного принятия решений в СППР и разработаны концептуальные модели 12 наиболее часто выделяемых в СППР коллективных эффектов. С их помощью была показана основополагающая роль эффекта самоорганизации для синергии, адаптации и самообучения. Предложена модель эффекта самоорганизации в СППР как действия ЛПП по смене организационной структуры СППР в зависимости от условий решаемой задачи. Эта модель имитирует самостоятельное изменение автоматизированной системой алгоритма своей работы в зависимости от условий поставленной задачи.

В рамках изучения эффекта самоорганизации в СППР были исследованы его взаимосвязи с процессами как координации, согласованности и спора. Построены концептуальные модели этих процессов в СППР, предложены алгоритмы их моделирования в КСППР, разработаны программные средства. Кроме того, проведены вычислительные эксперименты для оценки влияния процессов координации, согласованности и

спора на интенсивность эффекта самоорганизации и качество принимаемых решений.

В результате анализа результатов этих экспериментов сформулированы правила нечеткой базы знаний агента, принимающего решения, т.е. решена задача получения объективных знаний лица, принимающего решения, по организации взаимодействия экспертов при коллективном решении сложной задачи, на которые не оказывает влияние неискренность участников и другие нежелательные факторы, возникающие в системах поддержки принятия решений. Результаты вычислительных экспериментов показали эффективность моделирования процессов координации, согласованности и спора при решении сложных задач оперативного производственного планирования и транспортной логистики.

В 2014 – 2015 гг. работы по тематике моделирования коллективных эффектов самоорганизации в системах поддержки принятия решений с целью решения сложных задач в ИПИ РАН будут продолжены.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. – СПб.: СПбГТУ, 2001.
2. *Kolesnikov A., Yashin A.* Hybrid modelling in stratified decision support systems-1//Mathematical Modelling and Analysis. 2000. Vol. 5. pp. 108 – 118.
3. *Борисов А.Н.* Принципы построения и реализации гибридных экспертных систем // Сб. "Гибридные экспертные системы в задачах проектирования сложных технических объектов. Материалы краткосрочного научно-технического семинара "Гибридные экспертные системы в задачах проектирования сложных технических объектов. – СПб: Дом НТП, 1992. С.6 – 9.
4. *Гаврилов А.В.* Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
5. *Колесников А.В., Кириков И.А.* Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. – М.: ИПИ РАН, 2007.
6. *Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В., Румовская С.Б., Доманицкий А.А.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А.В. Колесникова. – М.: ИПИ РАН, 2011.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А.Поспелова. – М.: Наука, 1986.
8. *Рыбина Г.В.* Интегрированные экспертные системы: современное состояние, проблемы и тенденции // Известия РАН. Теория и системы управления, 2002. №5. С. 111 – 126.
9. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002.
10. *Ярушкина Н.Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004.
11. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / Под ред. Н.Г. Ярушкиной. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
12. *Goonatilake S., Khebbal S.* Intelligent Hybrid Systems // The First Singapore Int. Conference on Intelligent Systems: proceedings. – 1992. pp. 356 – 364.
13. *Medsker L.R.* Hybrid Intelligent Systems. – Boston: Kluwer Academic Publ., 1995.
14. Категория «целое» в истории философии. <<http://focusnik.nsk.ru/theory/page-48.html>>. 31.10.2013.
15. *Шеллинг Ф.В.* Введение к наброску системы натурфилософии, или О понятии умозрительной физики и о внутренней организации системы этой науки // Шеллинг Ф.В. Сочинения. – М., 1998.
16. *Гегель Г.В. Ф.* Феноменология духа. – М., 2000.
17. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972. - 544 с.

18. *Копысов С.П., Красноперов И.В., Рынков В.Н.* Объектно-ориентированный метод декомпозиции области // Вычислительные методы и программирование, 2003. Т. 4. № 1. С. 176–193.
19. *Przemieniecki J.S.* Theory of matrix structural analysis. — New York: McGraw-Hill, 1968.
20. *Вабищевич П.Н.* Итерационные методы декомпозиции областей с наложением для эллиптических краевых задач // Дифф. уравнения, 1996. Вып. 32. № 1. С. 923-927.
21. *Гергель В.П.* Теория и практика параллельных вычислений: учебное пособие. — М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007.
22. *Немнюгин С.А.* Модели и средства программирования для многопроцессорных вычислительных систем. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2009.
23. Self-organization in multiagent systems: from agent interaction to agent organization / M. Schillo, B. Fley, M. Florian, etc. // Proceedings of the 3rd International Workshop on Modeling Artificial Societies and Hybrid Organizations (MASHO'02), Workshop at KI2002, the 25th German Conference on Artificial Intelligence. — Aachen, 2002. pp. 47 – 56.
24. *Хиценко В.Е.* Инновационный потенциал социальной самоорганизации. <<http://spkurdyumov.narod.ru/Hitsenko10.htm>>. 06.05.2013.
25. *Русин С.П.* Выбор как результат процесса самоорганизации. <<http://spkurdyumov.narod.ru/ruuusin30.htm>>. 06.05.2013.
26. *Адамар Ж.* Исследование психологии процесса изобретения в области математики. — М.: Советское радио, 1970.
27. *Пуанкаре А.* О науке. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 2-е изд.
28. *Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A.* Self-organization in multi-agent systems // The Knowledge Engineering Review, 2005. Vol. 20:2. pp. 165 – 189.
29. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991.
30. *Акимова Т.А., Мосейкин Ю.Н.* Экономика устойчивого развития: учебное пособие. — М.: Экономика, 2009.
31. *Пугачева Е.Г., Соловьев К.Н.* Самоорганизация социально-экономических систем: Учеб. пособие. — Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2003.
32. *Мoiseev Н.Н.* Универсальный эволюционизм и самоорганизация. <<http://www.ecolife.ru/journal/echo/2003-2-1.shtml>>. 06.05.2013.
33. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. — М.: Наука, 1994.
34. Большой энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия, 1991.
35. *Хиценко В.Е.* Феномен социальной самоорганизации. <<http://spkurdyumov.narod.ru/Hits.pdf>>. 06.05.2013.
36. *Heylighen F.* Self-organization in Communicating Groups: the emergence of coordination, shared references and collective intelligence. <<http://pcp.vub.ac.be/papers/Barcelona-LanguageSO.pdf>>. 06.05.2013.

37. *Jantsch E.* The self-organizing universe: Scientific and human implications of the emerging paradigm of evolution. – Oxford: Pergamon Press, 1980.
38. *Шредер М.* Фракталы, хаос, степенные законы: Миниатюры из бесконечно-го рая. – Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
39. *Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х.* Красота фракталов. – М.: Мир, 1993.
40. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. – М.: Едиториал УРСС, 2004. 4-е изд., стер.
41. *Шредингер Э.* Что такое жизнь? С точки зрения физика: Перев. с англ. – М.: Атомиздат, 1972. изд. 2.
42. *Калужский М.Л.* Общая теория систем: Учеб. пособ. – Омск: ОмГТУ, 2001.
43. *Хакен Г.* Синергетика: Пер с англ. – М.: Мир, 1980.
44. *Халатур П.Г.* Самоорганизация полимеров // Соровский образовательный журнал, 2001. Т. 7, № 4. С. 36 – 43.
45. *Odum H.T.* Ecological Engineering and Self-Organization // Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology / Mitsch W.J., Jorgensen S.E. (Eds). – New York: John Wiley & Sons, 1989. pp. 79-101.
46. *Матурана У.Р., Варела Ф.Х.* Дерево познания. – М.: Прогресс-Традиция, 2001.
47. *Эйген М., Шустер П.* Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул. – М.: Мир, 1982.
48. *Редько В.Г.* Лекция 5. Модель гиперциклов М.Эйгена и П.Шустера. <<http://www.keldysh.ru/pages/BioCyber/Lecture5.html>>. 06.05.2013.
49. *Файстель Р., Романовский Ю.М., Васильев В.А.* Эволюция гиперциклов Эйгена, протекающих в коацерватах // Биофизика, 1980. Т. 25. № 5. С. 882 – 887.
50. *Camazine S., Deneubourg J.L., Franks N.R., Sneyd J., Theraulaz G., Bonabeau E.* Self-organization in biological systems. – Princeton Univ Press, 2003.
51. *Coffey D.S.* Self-organization, complexity and chaos: the new biology for medicine // Nature Medicine, 1998. № 4(8). pp. 882–885.
52. *Steels L.* The emergence and evolution of linguistic structure: from lexical to grammatical communication systems // Connection Science, 2005. №17(3). pp. 213–230.
53. *De Boer B.* Self-organization in vowel systems // Journal of Phonetics, 2000A. № 28(4). pp. 441–465.
54. *Thelen E.* Self-organization in developmental processes: Can systems approaches work? // Systems and development: The Minnesota symposium on child psychology / M. R. Gunnar and E. Thelen (Eds.). – Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1989. Vol. 22. pp. 77–117
55. Концепция самоорганизации в исторической ретроспективе. – М.: Наука, 1994.
56. *Смит А.* Исследование о природе и причинах богатства народов. – М., 1993.
57. *Coleman H.J.* What enables self-organizing behavior in businesses // Emergence, 1999. № 1(1). pp. 33–48.
58. *Allen P.M.* Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity. – London: Taylor and Francis, 1997.
59. *Ashby W.R.* Principles of the Self-Organizing Dynamic System // Journal of General Psychology, 1947. Vol. 37. pp. 125 – 128.

60. *Ashby W.R.* Principles of the self-organizing system // Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium / H. Von Foerster, G. W. Zopf, Jr. (eds.). – London: Pergamon Press, 1962. pp. 255 – 278.
61. *Turing A.* The chemical basis of morphogenesis // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1952. Vol. 237, № 641. pp. 37 – 72.
62. *Gierer A., Meinhardt H.* A theory of biological pattern formation // Kybernetik. 1972. Vol. 12. pp. 30 – 39.
63. *Чернавский Д.С.* Биоинформатика <<http://emag.iis.ru/arc/infosoc/emag.nsf/BPA/d5127b3351596d90c3257704003d65d3>>. 06.05.2013.
64. *Харкевич А.А.* Теория информатики. Оpozнание образов. – М.: Наука, 1973.
65. *Holland O., Melhuish C.* Stigmergy, self-organization, and sorting in collective robotics. Artificial Life, 1999. № 5(2). pp. 173-202.
66. *Grassberger P.* Toward a quantitative theory of self-generated complexity // International Journal of Theoretical Physics, 1986. Vol. 25. № 9. pp. 907 – 928.
67. *Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г.* Синергетика и прогнозы будущего. – М.: Наука, 1997.
68. *Волькенштейн М.В.* Энтропия и информация. – М.: Наука, 1986.
69. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. – М.: Наука, 2001.
70. *Мелик-Гайказян И.В.* Информационные процессы и реальность. – М.: Наука, 1997.
71. *Климонтович Н.Ю.* Без формул о синергетике. – Минск, 1986.
72. *Василькова В.В.* Порядок и хаос в развитии социальных систем. – СПб.: Издательство «Лань», 1999.
73. *Чешков М.А.* Синергетика: за и против хаоса (заметки о науке эпохи глобальной смуты) // Общественные науки и современность, 1999. № 6. С. 128 – 140.
74. *Сачков Ю.В.* Поствероятностные базовые модели // Проблемы методологии постнеклассической науки. – М.: ИФРАН, 1992. С. 97 – 108.
75. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика как новое мировоззрение: диалог с И.Пригожиным // Вопросы философии, 1992. № 12. С. 3 – 20.
76. *Аршинов В.И., Войцехович В.Э.* Синергетическое знание: между сетью и принципами // Синергетическая парадигма; Многообразие поисков и подходов. – М.: Прогресс-Традиция, 2000. С. 113 – 114
77. *Geyer F., Zouwen J.* Cybernetics and Social Science: Theories and Research in Sociocybernetics // Kybernetes, 1991. Vol. 20, № 6. pp. 81 – 92.
78. *Holland J.H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems. – Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan, 1975.
79. Sociocybernetic Paradoxes: Observation, Control and Evolution of Self-steering Systems / F. Geyer, J. van der Zouwen (eds.). – London: Sage, 1988.
80. Sociocybernetics: An actor oriented social systems theory / F. Geyer, J. van der Zouwen (eds.). – Amsterdam, 1979.
81. *Турчин В.Ф.* Феномен науки. Кибернетический подход к эволюции. – М.: Наука, 1993.
82. *Емельянов В.В., Курейчик В.М., Курейчик В.В.* Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003.
83. *Veyer H.-G.* The Theory of Evolution Strategies. – Berlin: Springer, 2001.

84. *Goldberg D.E.* Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. – USA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.
85. Handbook of genetic algorithms. – New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
86. *Колесников А.В.* Исследование и разработка методов, моделей и алгоритмов компьютерной имитации явлений и процессов самоорганизации в системах поддержки принятия решений методами гибридных интеллектуальных систем. Отчет о НИР (промежут.). КФ ИПИ РАН. – Калининград, 2010. № ГР 01.2.010 00911.
87. *Мак-Каллок У.С., Питтс В.* Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // В сб.: «Автоматы» под ред. К.Э.Шеннона и Дж. Маккарти. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – С. 363 – 384.
88. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
89. *Уоссермен Ф.* Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика: Пер. с англ. – М.: Наука, 1992.
90. *Zuse K.* Rechnender Raum. – Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, 1969.
91. *Neumann J.* Theory of Self-Reproducing Automata. – Illinois: University of Illinois Press, 1966.
92. *Тоффоли Т., Марголюс Н.* Машины клеточных автоматов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991.
93. *Hilario M.* An overview of strategies for neurosymbolic integration // The IJCAI Workshop on Connectionist – Symbolic Integration: From Unified to Hybrid Approaches. – Montreal, 1995. pp. 234 – 250.
94. *Kasabov N., Kozma R.* Hybrid Intelligent Adaptive Systems: a Framework and a Case Study on Speech Recognition // Intelligent Systems, 1998. Vol. 13. pp. 455 – 466.
95. The HEARSAY–2 Speech Understanding System: Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty / L. Erman, F. Hayes–Roth, V. Lesser, etc. // ACM Computers Surveys, 1980. Vol.12, Issue 2. pp. 213 – 253.
96. *Hewitt C.* Viewing Control Structures as Patterns of Message Passing // Artificial Intelligence, 1977. Vol. 8, №3. pp. 323 – 364.
97. *Lenat D.* BEINGS: Knowledge as Interacting Experts // The 1975 IJCAI Conf.: proceedings. – 1975. pp. 126–133.
98. *Канторович Л.В.* Математические методы организации и планирования производства. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1959.
99. *Данциг Дж.* Линейное программирование, его обобщения и применения. – М.: Прогресс, 1966.
100. *Беллман Р., Дрейфус С.* Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965.
101. *Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973.
102. *Акофф Р., Эмери Ф.* О целеустремленных системах. – М.: Советское радио, 1974.
103. *Алиев Р.А., Либерзон М.И.* Методы и алгоритмы координации в промышленных системах управления. – М.: Радио и связь, 1987.



104. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.Л.* Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989.
105. *Бухвалов О.Л., Городецкий В.И., Карсаев О.В., Кудрявцев Г.И., Самойлов В.В.* Распределенная координация в производственных В2В сетях // Известия ЮФУ. Технические науки, 2013. №3. с.193 — 203.
106. *Тележкин В.Ф., Угаров П.А.* Верифицированный алгоритм координации для иерархических гибридных систем управления. <<http://www.ict.edu.ru/ft/003136/034.pdf>>. 28.01.2014.
107. *Алтунин А.Е., Семухин М.В.* Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2000.
108. *Джорратано Д., Райли Г.* Экспертные системы: принципы разработки и программирования: Пер. с англ. — М.: ООО «Издательский дом Вильямс», 2007. 4-е изд.
109. *Колесников А.В., Солдатов С.А.* Теоретические основы решения сложной задачи оперативно-производственного планирования с учётом координации // Вестник Российского государственного университета им. Иммануила Канта. Сер. Физико-математические науки, 2009. С. 82 – 98.
110. *Колесников А.В., Солдатов С.А.* Моделирование решения задачи оперативно-производственного планирования для машиностроительных предприятий с мелкосерийным, заказным характером производства // Труды VII юбилейной международной научной конференции «Инновации в науке и образовании – 2009». – Калининград: Издательство КГТУ, 2009. Ч. 2. С. 177-180.
111. *Колесников А.В., Солдатов С.А.* Моделирование коллективного интеллекта, решающего сложную задачу планирования на машиностроительном предприятии // В мире научных открытий. Серия «Математика. Механика. Информатика», 2011. №12. С. 172 – 181
112. *Колесников А.В., Солдатов С.А.* Алгоритм координации для гибридной интеллектуальной системы решения сложной задачи оперативно-производственного планирования // Научный журнал «Информатика и её применение», 2010. Т. 4. С. 58 – 64.
113. *Солдатов С.А.* Гибридная интеллектуальная система оперативно-производственного планирования // Информационные технологии в образовании, технике и медицине: материалы междунар. конф. – Волгоград: ВГТУ, 2009. С. 75.
114. *Солдатов С.А.* Гибридная интеллектуальная система поддержки принятия оперативных плановых решений для машиностроительных предприятий с мелкосерийным заказным производством // Инновации в науке и образовании – 2007: V Международная научная конференция: доклады номинации «Участник молодежного научно-инновационного конкурса У.М.Н.И.К.». – Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. С. 58-61.
115. *Колесников А.В., Солдатов С.А.* Интеллектуальная система оперативно-производственного планирования предприятий с мелкосерийным характером производства // НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2006. – М.: МИФИ, 2006. Т. 3, Интеллектуальные системы и технологии. С. 120 – 121.

116. *Olson E.E., Eoyang G.H.* Facilitating organization change: Lessons from complexity science. – San Francisco: Jossey-Bass/Pfeiffer, 2001.
117. *Stacey R.* Complexity and creativity in organizations. – San Francisco: Berrett-Koehler Publishers, 1996.
118. *Eoyang G.* Coping with chaos: Seven simple tools. – Cheyenne: Lagumo, 1999.
119. *Pascale R.T., Millemann M., Gioja L.* Surfing the edge of chaos: The laws of nature and the new laws of business. – New York: Crown Business, 2000.
120. *Колесников А.В., Листопад С.В.* Метод оценки степени сплоченности коллектива интеллектуальных агентов, принимающих решения // Труды VII юбилейной международной научной конференции «Инновации в науке и образовании-2009». – Калининград: КГТУ, 2009. Ч. 2. С. 175 – 177.
121. *Колесников А.В., Листопад С.В.* Метод оценки степени взаимодействия интеллектуальных агентов в компьютерных системах поддержки принятия решений // Известия КГТУ, 2010. № 17: Материалы VII Международной научной конференции «Инновации в науке и образовании-2009». С.166–170.
122. *Кириков И.А., Колесников А.В., Листопад С.В.* Моделирование самоорганизации групп интеллектуальных агентов в зависимости от степени их взаимодействия // Информатика и её применения, 2009. Т. 3. Вып. 4. – М., 2009. – С. 76 – 86.
123. *Demazeau Y., Rocha Costa A.C.* Populations and organizations in open multi-agent systems // In 1st Nat. Symposium on Parallel and Distributed AI (PDAI '96). – Hyderabad, India: 1996.
124. *Kirikov I., Kolesnikov A., Listopad S.* Computer decision support system modeling self-organisation effects based on the analysis of experts' goals // Proceedings of the 17th International Conference on Information and Software Technologies, IT 2011. – Kaunas: Kaunas University of Technology, 2011. pp. 39 – 44.
125. *Листопад С.В.* Моделирование коллективного решения сложных задач гибридными интеллектуальными многоагентными системами // Вторая школа молодых ученых ИПИ РАН. Сборник докладов. – М.: ИПИ РАН, 2011. С. 42 – 52.
126. *Кириков И.А., Колесников А.В., Листопад С.В.* Исследование эффекта самоорганизации в компьютерных системах поддержки принятия решения на примере многоагентных систем // Вестник Российского государственного университета им. Иммануила Канта. – Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2010. Вып. 10: Сер. Физико-математические науки. С. 79 – 90.
127. *Колесников А.В.* исследование и разработка методов, моделей и алгоритмов компьютерной имитации явлений и процессов самоорганизации в системах поддержки принятия решений методами гибридных интеллектуальных систем. Отчет о НИР (промежут.). КФ ИПИ РАН. – Калининград, 2011. № ГР 01.2.010 00911.
128. *Листопад С.В.* Интеллектуальная система моделирования коллективного принятия решений для сложной транспортно-логистической задачи: Дис. ... канд. техн. наук. – М., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем информатики Российской академии наук, 2012. – 151с.

129. *Coulter N.A.* Human synergetics. <<http://www.synearth.net/coulter/synergetics.pdf>>. 06.05.2013.
130. *Козелецкий Ю.* Психологическая теория решений / Ю. Козелецкий. – М.: Прогресс, 1979. – 503с.
131. *Корнилова Т.В.* Психология риска и принятия решений. – М.: Аспект Пресс, 2003.
132. *Глушков В.М.* Кибернетика. Вопросы теории и практики. – М.: Наука, 1986.
133. *Колпаков В.М.* Теория и практика принятия управленческих решений: Учеб. пособие. – М.: Издательство МАУП, 2004. 2-е изд., перераб. и доп.
134. *Почебут Л.Г., Чикер В.А.* Организационная социальная психология: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Речь», 2002.
135. *Майерс Д.* Социальная психология. – СПб.: Питер, 1997.
136. *Кричевский Р.Л., Дубовская Е.М.* Социальная психология малой группы. – М., 2001.
137. Социальная психология / Под ред. А.Л. Журавлева. – М.: ПЕР СЭ, 2002.
138. *Аймаутова Н.Е., Ушнев С.В.* Специфика группового принятия решения // Вестник РУДН, серия Социология, 2003, №1(4). С. 195-200.
139. *Платонов Ю.П.* Групповые эффекты и методы повышения эффективности совместной работы. <[http://www.elitarium.ru/2008/05/23/grupповые\\_jeffekty.html](http://www.elitarium.ru/2008/05/23/grupповые_jeffekty.html)>. 06.05.2013.
140. *Растрюгин Л.А.* Адаптация сложных систем. – Рига: Зинатне, 1981.
141. *Heylighen F.* The Science of Self-organization and Adaptivity // Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity / L.D. Kiel (ed.). – Oxford: Eolss Publishers, 2001. p. 184 – 211.
142. *Латфуллин Г.Р., Райченко А.В.* Теория организации: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2004.
143. *Zachary P.* Showstopper! The Breakneck Race to Create Windows NT and the Next Generation at Microsoft. – New York: The Free Press, 1994.
144. *Сидоренков А.В., Захарченко Н.А., Сидоренкова И.И.* Социально-психологические теории малой группы – М.: Вузовская книга, 2011.
145. *Brunner E., Tschacher W.* Distanzregulierung und Gruppenstruktur beim Prozeß der Gruppenentwicklung. Theoretische Grundlagen und methodische Überlegungen // Zeitschrift für Socialpsychologie, 1991. Vol. 22. № 2. pp. 87–101.
146. *Cranach M. von.* Toward a theory of the acting group // Understanding group behavior: Small group processes and interpersonal relations / E. Witte, J.H. Davis (Eds). – Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1996. pp. 147–187.
147. *Arrow H., McGrath J.E., Berdahl J.L.* Small groups as complex systems: Formation, coordination, development, and adaptation. – NP, CA: Sage, 2000.
148. *McGrath J.E., Tschan F.* Temporal matters in social psychology. Examining the role of time in the lives of groups and individuals. – Washington: APA, 2004.
149. *Poole M.S., Seibold D.R., McPhee R.D.* The structuration of group decisions // Communication and group decision-making / R.Y. Hirokawa, M.S. Poole. – Thousand Oaks, CA: Sage, 1996. pp. 114–146.
150. *Хорошавина С.Г.* Концепции современного естествознания: курс лекций. – Ростов н/Д: Феникс, 2005.

151. *Кнорринг В.И.* Теория, практика и искусство управления. – М.: Изд-во НОРМА, 2001.
152. *Горский Ю.М., Степанов А.И., Теслинов А.Г.* Гомеостатика: гармония в игре противоречий. — Иркутск: Репроцентр А1, 2008.
153. *Сивова С.А.* Нуждается ли самоорганизация в управленческом обеспечении? (анализ актуальных направлений развития организационных структур) // Проблемы теории и практики управления, 1997. № 3. С. 82 – 83.
154. Толковый словарь по искусственному интеллекту / А.Н. Аверкин, М.Г. Гаазе–Рапопорт, Д.А. Поспелов. – М.: Радио и связь, 1992.
155. *Колесников А.В.* Концептуальная модель – инструмент познания внешнего мира в системах искусственного интеллекта // Человек техногенной цивилизации на рубеже двух тысячелетий. – Калининград: КГТУ, Калининградское отделение МАИ, 2000. С. 152–175.
156. *Трахтенгерц Э.А.* Методы генерации, оценки и согласования решений в распределенных системах поддержки принятия решений // Автоматика и телемеханика, 1995. №4. С. 3 – 52.
157. *Evangelos T.* Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
158. *Marakas G.H.* Decision Support Systems in the 21th Century. – New Jersey: Pearson Education, Inc., 2003.
159. *Fishburn P.C.* Utility Theory for Decision Making. – Robert E. Krieger Publishing Company, 1979
160. *Fishburn P.C.* The Theory of Social Choice. – Princeton University Press, 1973.
161. *Вентцель Е.С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1988.
162. *Алексеев П.В., Панин А.В.* Философия: Учебник. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2003.
163. *Lbov G., Dolozov N., Maslov P.* Analysis and coordination of expert statements in the problems of intellectual information search // International Journal «Information Theories & Applications», 2007. Vol.14. pp. 95 – 99.
164. *Schmid B., Stanoevska-Slaveva K., Yu L.* Supporting Distributed Corporate Planning through New Coordination Technologies. <<http://www.alexandria.unisg.ch/Publikationen/9453>>. 06.05.2013.
165. *Гультияев А.К.* MS Office Project 2007. Управление проектами. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008.
166. Сайт по программам Microsoft Office. Краткая история управления проектами. <<http://office.microsoft.com/ru-ru/project-help/HA001135342.aspx>>. 06.05.2013.
167. *Ненейвода Н.Н.* Стили и методы программирования <<http://www.intuit.ru/departament/se/progstyles/>>. 06.05.2013.
168. *Шальто А.А.* Автоматное проектирование программ. Алгоритмизация и программирование задач логического управления // Журнал Известия РАН. Теория и системы управления, 2000. № 6. С. 63 – 81.
169. *Шальто А., Туккель Н.* Танки и автоматы // Журнал «ВУТЕ/Россия», 2003. № 2. С. 69 – 73.

170. Общество с ограниченной ответственностью завод «Калининградгазавтоматика». <<http://www.kga.ru/>>. 06.05.2013.
171. Infor SyteLine ERP. <<http://www.erp-online.ru/software/infor/>>. 06.05.2013.
172. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ: учеб. пособие. – Киев: МАУП, 2003.
173. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: Учебное пособие. – М.: Финансы и статистика, 2002.
174. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982.
175. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений. – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 81с.
176. Multiagent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence / G. Weiss (ed.). – London: The MIT Press Cambridge, 1999.
177. Abonyi J., Nagy L., Szeifert F. Adaptive fuzzy inference system and its application in modelling and model based control // Chemical engineering research and design, 1999. Vol. 77. № 4. pp. 281–290.
178. Jang R. Neuro-fuzzy modeling: architectures, analyses and applications. Ph.D. Thesis. – Berkeley: University of California, 1992.
179. Berenji H.R., Khedkar P. Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements // IEEE Transactions on Neural Networks, 1992. Vol. 3. pp. 724–740.
180. Feng J.C., Teng L.C. An online self constructing neural fuzzy inference network and its applications // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1998. Vol. 6, № 1. pp. 12–32.
181. Tran C., Jain L., Abraham A. Adaptation of Mamdani fuzzy inference system using neuro-genetic approach for tactical air combat support system // 15th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence (AI'02). – Berlin: Springer, 2002. pp. 402 – 410.
182. Штовба С.Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB // Математика в приложениях, 2003. № 2 (2). С. 9 – 15.
183. Сладкевич В.П., Чернявский А.Д. Современный менеджмент (в схемах): Опорный конспект лекций (в схемах). – К.: МАУП, 2003.
184. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети: Учеб. пособие. – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001.
185. Терехов С.А. Лекции по теории и приложениям искусственных нейронных сетей. Лекция 6. Многослойный перцептрон. <[http://alife.narod.ru/Lectures/neural/Neu\\_ch06.htm](http://alife.narod.ru/Lectures/neural/Neu_ch06.htm)>. 06.05.2013.
186. Zhang Z., Zhang C. Agent-Based Hybrid Intelligent Systems: An Agent-Based Framework for Complex Problem Solving // Lecture Notes in Artificial Intelligence / J. G. Carbonell, J. Siekmann (eds.). – Berlin: Springer, 2004. Vol. 2938.
187. Листонад С.В. Решение сложной практической задачи коммивояжера методами гибридных интеллектуальных систем // Искусственный интеллект: философия, методология, инновации. Материалы 2-ой международной молодежной конференции. – СПб, 2007. С. 199–201.

188. *Листопад С.В.* Философско-методологический анализ синергетического эффекта в симбиозе интеллектуальности и реактивности в системах искусственного интеллекта // Образование, наука и инженерная деятельность в социокультурном пространстве эксклавного региона: история, актуальные проблемы, перспективы развития. – Калининград, 2007. С. 51 – 53.
189. *Ефремова Т.Ф.* Новый словарь русского языка. Толково-словообразовательный. – М.: Русский язык, 2000.
190. *Шопенгауэр А.* Эристика или искусство побеждать в спорах: пер. с нем. Н.Л. д'Андре. – СПб., 1990.
191. *Перерва В.В.* Логические основы аргументации: Учебное пособие. – М.: Изд-во «Международный юридический институт», 2005.
192. *Тимофеев А.И.* Аргументация: теория и практика: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУАП, 2005.
193. *Арно А., Николь П.* Логика или искусство мыслить. – М.: 1991.
194. *Ивин А.А.* Теория аргументации. – М.: Высшая школа, 2007.
195. *Абачиев С.К., Делия В.П.* Теория и практика аргументации (к учебному курсу для специалистов по связям с общественностью). – М.: Едиториал УРСС, 2004.
196. *Шипунова О.Д.* Логика и теория аргументации. – М.: Гардарики, 2005.
197. *Поварнин С.И.* Искусство спора. О теории и практике спора. – Петроград: КТ «Начатки знаний», 1923.
198. *Волков А.А.* Курс русской риторики: пособие для духовных учебных заведений. – М.: Изд-во МДА, 2009.
199. *Волков А.А.* Теория риторической аргументации. – М.: Изд-во МГУ, 2009.
200. *Михальская А.К.* Основы риторики. – М.: Просвещение, 1996.
201. *Введенская Л.А.* Риторика и культура речи. – М.: Феникс, 2009.
202. *Линдсей К.* Искусство убеждать словами. Как пишутся гениальные тексты. – М.: Попурри, 2009.
203. *Лобанов И.Б., Хазачеров Г.Г.* Риторика: Учебник. – М.: Феникс, 2008.
204. *Родос В.Б.* Теория и практика полемики. – Томск: Изд-во ТГУ им. В.В. Куйбышева, 1989.
205. *Рождественский Ю.В.* Принцип современной риторики / под ред. В.И. Аннушкина. – М.: Флинта: Наука, 2003.
206. *Павлова Л.Г.* Спор, дискуссия, полемика. – М., 1991.
207. *Андреев В.И.* Конфликтология (Искусство спора, ведения переговоров, разрешения конфликтов). – М., 1995.
208. *Ивин А.* Эристика: наука побеждать в споре. <<http://www.hrliga.com/index.php?module=news&op=view&id=5733>>. 06.05.2013.
209. *Toulmin S.* The uses of argument. – Cambridge: Cambridge university press, 2003.
210. *Pollock J.* Knowledge and justification. – Princeton, 1974.
211. *Pollock J.* Defeasible reasoning // Cognitive science, 1987. Vol. 11. pp. 481–518.
212. *Doyle D.* A model for deliberation, action and introspection: PhD Thesis. – Massachusetts: MIT, 1980.
213. *Reiter R.* Nonmonotonic reasoning // Exploring artificial intelligence. – San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1988. pp. 439–481.

214. Финн В.К. Интеллектуальные системы и общество. – М.: Изд-во РГГУ, 2001.
215. Финн В.К. Автоматическое порождение гипотез в интеллектуальных системах. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
216. Финн В.К. Правдоподобные выводы и правдоподобные рассуждения // Итоги науки и техники. Серия Теория вероятности. Математическая статистика. Техническая кибернетика, 1988. Т. 28. С. 3–84.
217. *Lukasiewicz J.* O logice trójwartościowej // *Ruch Filozoficzny*, 1920. № 5. pp. 170–171.
218. *Zadeh L.* Fuzzy sets // *Inform. and Control*, 1965. №8. pp. 338–353.
219. *Field H.* Pluralism in logic // *The review of symbolic logic*, 2009. Vol. 2. № 2. pp. 342–359.
220. *Косовский Н.К., Тишков А.В.* Выводимость в плюралистической логике // Современная логика: проблемы теории, истории и применения в науке: V Общероссийская научная конференция: материалы. – СПб, 1998. С. 151 – 154.
221. *Косовский Н.К., Ярославский В.В.* Булевы операции усредняющей логики. <[http://www.ksu.ru/gum\\_konf/ot2z.htm](http://www.ksu.ru/gum_konf/ot2z.htm)>. 06.05.2013.
222. *Shafer G.* A Mathematical Theory of Evidence. — Princeton University Press, 1976.
223. *Dempster A.P.* Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping // *The Annals of Mathematical Statistics*. 1967. Vol. 38. № 2. pp. 325–339.
224. *Джорджатано Дж., Райли Г.* Экспертные системы: принципы разработки и программирования: пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2007.
225. *Стешов А.В.* Как победить в споре: о культуре полемики. – Л., 1991.
226. *Константинова Л.А.* Русский язык и культура речи: Курс лекций. – Тула: Тульский гос. ун-т, 2007.
227. *Лотов А.В., Поспелова И.И.* Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2008.
228. *Smets P.* Analyzing the Combination of Conflicting Belief Functions. <[http://iridia0.ulb.ac.be/~psmets/Combi\\_Confl.pdf](http://iridia0.ulb.ac.be/~psmets/Combi_Confl.pdf)>. 30.10.2013.
229. *Flaminio T., Godo L., Marchioni E.* Logics for belief functions on MV-algebras. <<http://www.iiia.csic.es/files/pdfs/flaminio-godo-marchioni-belief-functions-logic.pdf>>. 30.10.2013.
230. *Xiao J., Tong M., Fan Q., Xiao S.* Generalization of Belief and Plausibility Functions to Fuzzy Sets. <<http://www.naturalspublishing.com/files/published/t6kli28tt61x6m.pdf>>. 30.10.2013.
231. *Biacino L.* Fuzzy Belief Functions Defined by a Graded Inclusion. <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.96.5883&rep=rep1&type=pdf>>. 30.10.2013.
232. *Kreinovich V.* Combining Fuzzy and Probabilistic Knowledge Using Belief Functions. <[http://digitalcommons.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1414&context=cs\\_techrep](http://digitalcommons.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1414&context=cs_techrep)>. 30.10.2013.
233. *Люгер Д.Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.
234. *Kappa-PC Ver. 2.4 User Manual.* – CA: IntelliCorp Inc, 1997.

Научное издание

**Колесников Александр Васильевич  
Кириков Игорь Александрович  
Листопад Сергей Викторович**

**ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
С САМООРГАНИЗАЦИЕЙ:  
КООРДИНАЦИЯ, СОГЛАСОВАННОСТЬ, СПОР**

**Редактор:**

доктор технических наук В.М. Ченцов

Оригинал-макет подготовлен в ИПИ РАН  
А.Л.Юдичевой

**Подписано в печать 11.04.2014**

**Тираж 100 экз.**

**Заказ № 14-02.**

Все вопросы и замечания по содержанию книги  
авторы просят направлять по электронному адресу  
[baltbipiran@mail.ru](mailto:baltbipiran@mail.ru)

Издательство ИПИ РАН  
119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, корп.2



