



А. Н. Салугин

ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ.  
МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ  
УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Учебное пособие

Волгоград. ВолГАСУ. 2015



УДК 681.51  
ББК 22.18  
С16

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор экономических наук, профессор *А. И. Гришин*, заведующий кафедрой менеджмента Волгоградского государственного университета;  
доктор физико-математических наук, профессор *И. В. Журавлев*, заведующий кафедрой математических методов и компьютерных технологий Волгоградского института экономики, социологии и права;  
доктор экономических наук, профессор *О. В. Максимчук*

*Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия*

- Салугин, А. Н.**  
С16 Введение в системный анализ. Методы принятия управленческих решений [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. Н. Салугин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. — Электронные текстовые и графические данные (5,6 Мбайт). — Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. — Учебное электронное издание сетевого распространения. — Систем. требования: PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0. — Официальный сайт Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Режим доступа: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/> — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-98276-696-0

Рассмотрены вопросы математического моделирования при принятии оптимальных решений. Приведены практические приложения метода анализа иерархий при решении задач выбора оптимального варианта с учетом множества решений.

Для студентов-ускоренников, а также студентов дневного обучения направления «Информационные системы и технологии».

Для удобства работы с изданием рекомендуется пользоваться функцией Bookmarks (Закладки) в боковом меню программы Adobe Reader.

Имеется печатный аналог (Салугин, А. Н. Введение в системный анализ. Методы принятия управленческих решений : учебное пособие / А. Н. Салугин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. — Волгоград : ВолгГАСУ, 2015. — 292, [2] с.).

**УДК 681.51  
ББК 22.18**

ISBN 978-5-98276-696-0



© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	10
1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ .....	12
1.1. Системный анализ как наука .....	12
1.2. Развитие системных представлений .....	16
1.3. Системный анализ деятельности организации .....	18
1.3.1. Понятие «организация» .....	18
1.3.2. Функциональная структура строительной организации .....	19
1.3.3. Процессно-ориентированная организация .....	20
1.3.4. Строительные бизнес-системы и стандарты ИСО .....	21
1.3.5. Системный подход .....	23
1.3.6. Принципы системного анализа .....	23
1.4. Математические модели бизнес-процессов в строительстве .....	25
1.4.1. ЭВМ в системном анализе .....	25
1.4.2. Анализ структуры систем .....	29
1.4.3. IDEF-технология структурного анализа .....	31
1.4.4. Функциональные модели в строительстве .....	32
Вопросы и задания .....	37
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ .....	40
2.1. Определение модели .....	40
2.2. Модели функционирования систем .....	43
2.3. Дифференциальные модели с управлением. Конфликтные модели .....	45
2.4. Динамические модели и прогноз .....	48
2.4.1. Логистический прогноз .....	48
2.4.2. Модель эпидемии .....	53
2.4.3. Математическое моделирование процессов эрозии .....	54
2.4.4. Математическое моделирование динамических переходов в экосистемах .....	55
2.4.5. Дифференциальные модели в экономике .....	57
2.5. Имитационное моделирование случайных процессов .....	59
2.5.1. Методика имитационного моделирования .....	59
2.5.2. Виды распределений .....	62
2.6. Стохастические потоки .....	65
2.6.1. Виды стохастических потоков .....	65
2.6.2. Одноканальная система с отказами. Распределение Пуассона .....	65
2.6.3. Метод Монте-Карло .....	72
2.6.4. Пример принятия решений с помощью имитационного эксперимента .....	73
2.7. Структурные модели в управлении строительством .....	75
2.7.1. Построение структурной модели .....	75
2.7.2. Примеры структурных моделей .....	77
Вопросы и задания .....	86
3. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ И ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ .....	88
3.1. Модели функционирования систем .....	88
3.2. Дискретное описание систем с помощью графов .....	90
3.3. Топологический анализ структур .....	94

3.3.1. Анализ вершин как элементов структуры .....	94
3.3.2. Диаметр структуры .....	96
3.3.3. Степень централизации .....	97
3.4. Модели оптимизации и их реализация .....	98
3.4.1. Реализация математической модели .....	98
3.4.2. Кратчайший путь на ориентированном графе .....	99
3.4.3. Пример использования алгоритма кратчайшего пути .....	103
3.4.4. Кратчайший остов дерева .....	106
3.4.5. Максимальный поток в сети .....	108
3.4.6. Пример применения алгоритма максимального потока. Проектирование централизованной водоочистой станции .....	111
3.4.7. Многополюсная кратчайшая цепь .....	112
3.4.8. Задача коммивояжера .....	116
Вопросы и задания .....	117
4. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ .....	123
4.1. Управление и выбор .....	123
4.2. Проблема многокритериальности .....	127
4.2.1. Общая постановка .....	127
4.2.2. Сведение множества критериев к суперкритерию .....	130
4.2.3. Свертка критериев .....	131
4.2.4. Компромиссы Парето .....	132
4.2.5. Решение многокритериальных задач на ЭВМ с использованием интерактивного метода .....	135
4.3. Линейное программирование в задачах выбора .....	138
4.3.1. Общие положения .....	138
4.3.2. Задача использования ресурсов .....	141
4.3.3. Транспортная задача .....	142
4.3.4. Задача о назначениях .....	143
4.3.5. Оптимизация с помощью «Поиска решения» .....	144
4.4. Разработка моделей линейного программирования .....	147
4.4.1. График работы служащих (задача о назначениях) .....	147
4.4.2. Планирование трудовых ресурсов .....	149
4.4.3. Применение ЛП в маркетинге: выбор средств массовой информации .....	151
Вопросы и задания .....	152
5. ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА .....	157
5.1. Экспертизы и неформальные процедуры .....	157
5.2. Эвристические методы в дискретных задачах .....	158
5.2.1. Формальные и неформальные приемы .....	158
5.2.2. Метод ранжирования работ (метод Н. Н. Моисеева) .....	159
5.2.3. Разработка маршрута доставки материалов .....	162
5.2.4. Алгоритм ближайшего соседа .....	163
5.2.5. Эвристическая экономия .....	166
5.2.6. Составление маршрута для строительного транспорта .....	167
5.2.7. Разработка расписания доставки стройматериалов .....	171
5.3. Неопределенность при формировании целей управленческого решения .....	177
5.3.1. Проблема формулирования цели .....	177
5.3.2. Коллективное принятие решений (метод Дельфи) .....	179

5.4. Искусственный интеллект в управлении .....	183
5.4.1. Новые информационные технологии .....	183
5.4.2. Экспертные системы .....	184
5.4.3. Продукционные экспертные системы .....	187
5.4.4. Экспертная система SANEX .....	190
5.4.5. Работа с экспертной системой .....	191
5.5. Экспертные методы в задаче упорядочения (ранжирования) .....	194
5.5.1. Общие соображения .....	194
5.5.2. Метод экспертного оценивания .....	195
Вопросы и задания .....	197
6. МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ .....	201
6.1. Теоретические основы метода анализа иерархий .....	201
6.2. Описание метода .....	202
6.2.1. Описание метода на уровне пользователя .....	202
6.2.2. Парные сравнения .....	206
6.2.3. Шкала относительной важности .....	208
6.2.4. Локальный вектор приоритетов .....	208
6.2.5. Индекс согласованности .....	209
6.3. Принятие решений с использованием МАИ .....	212
6.3.1. Вычисление вектора приоритетов .....	212
6.3.2. Вычисление приоритета альтернатив для каждого критерия .....	214
6.3.3. Вычисление глобального вектора приоритетов .....	217
6.4. Примеры использования МАИ .....	218
6.4.1. Измерение качества .....	218
6.4.2. Выбор типа клиентурного рынка .....	219
6.4.3. Применение МАИ при использовании объективных данных .....	219
6.4.4. Принятие решения о покупке мебели .....	222
6.4.5. Ценообразование .....	223
6.4.6. Выбор вида транспорта .....	223
6.4.7. Маркетинг идей .....	223
6.4.8. Применение МАИ для согласования мнений экспертов при оценке стоимости недвижимости .....	224
6.5. Принятие решений в условиях неопределенности .....	231
6.5.1. Методы оценки и выбора решений на основе зон неопределенности (зоны риска) .....	232
6.5.2. Принятие решений в условиях неопределенности со многими критериями .....	233
6.6. Перспективы развития МАИ .....	238
Вопросы и задания .....	243
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	246
Библиографический список .....	250
Приложение 1. КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЕТЕВЫХ ЗАДАЧ .....	251
П.1.1. Структура системы .....	251
П.1.2. Алгоритм о кратчайшем пути .....	252
П.1.3. Кратчайший остов дерева .....	253
П.1.4. Многополюсная кратчайшая цепь .....	255
П.1.5. Задача о максимальном потоке .....	256
П.1.6. Задача коммивояжера .....	258

Приложение 2. СРЕДСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....	260
П.2.1. Методика работы с BPWin .....	260
П.2.2. Практическая реализация модели .....	266
П.2.2.1. Создание контекстной диаграммы .....	266
П.2.2.2. Создание диаграммы декомпозиции .....	267
П.2.2.3. Создание диаграммы узлов .....	270
П.2.2.4. Создание диаграммы IDEF3 .....	271
П.2.2.5. Создание сценария .....	272
П.2.2.6. Затратный (cost) анализ .....	273
П.2.2.7. Оценка затрат с категориями UDP .....	275
Приложение 3. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ .....	278
П.3.1. Создание плана нового проекта .....	278
П.3.2. Задачи проекта .....	279
П.3.2.1. Определение проекта .....	279
П.3.2.2. Определение рабочего времени проекта .....	280
П.3.2.3. Ввод задач проекта .....	281
П.3.2.4. Организация этапов проекта .....	283
П.3.2.5. Планирование задач .....	284
Словарь терминов и понятий.....	289

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методология системного анализа как наука, которая является не только теоретической основой принятия решений, но и практическим руководством для управления строительным производством, решает проблемы неопределенности и успешно применяется при выходе из «узких мест».

Необходимость адаптации к изменениям, которые происходят в России как на макроэкономическом уровне, так и на уровне каждого предприятия, требует специальных методов и средств для «настройки» их деятельности к быстро меняющимся внешним и внутренним условиям и правилам ведения бизнеса. Строительство как отрасль производства, имеющая сложную структуру социальных и экономических связей, особо нуждается в такой адаптации. Методы системного анализа призваны обеспечивать здесь адекватное управление строительным предприятием, предоставляя возможность эффективно управлять производственными процессами, следить за качеством, оптимизировать и прогнозировать текущую ситуацию.

Системный анализ — молодая наука. Имеющаяся в настоящее время немногочисленная литература по этому предмету не в состоянии удовлетворить всех тех, кто изучает данную дисциплину. Литература скудна как в перечне наименований, так и по количеству экземпляров. Кроме того, имеющиеся учебные издания имеют сугубо теоретическую направленность и предназначены в основном для классических университетов. Это обстоятельство побудило автора к написанию данного учебного пособия. Вышедшее в 2002 году учебное пособие «Введение в системный анализ» нуждалось в существенном дополнении и изменении стиля изложения.

Новые направления компьютерных технологий, призванные решать сложные проблемы распределительных сетей, осуществляют поддержку управленческих решений, позволяют оптимизировать конфигурации систем информации. Системный анализ при этом позволяет упрощать поставленную задачу за счет использования адекватной математической модели, что весьма важно для специалистов по информационным системам и строительным технологиям. Для студентов экономических специальностей он служит методологической основой принятия решений с использованием математического аппарата исследования операций и дискретного анализа. Связь системного анализа с другими дисциплинами заложена в его методологических приемах. Она основана на экспертных оценках специалистов из различных отраслей знаний, грамотном формулировании цели и поиске методов их достижения. Поэтому предлагаемое учебное пособие необходимо не только студентам, но и преподавателям экономического анализа и строительного менеджмента. Оно предназначено также для студентов, занимающихся по программе дистанционного обучения.

В настоящее время все большую популярность приобретают инженерные методы реорганизации предприятий. Термин «бизнес-процесс» в технологии строительства вошел в лексикон аналитиков и экономистов всех уровней. Расширяется спектр компьютеризованных инструментальных методов анализа экономических процессов и бизнес-процессов строительства.

В обиход аналитиков вошло новое понятие «структурный системный анализ». Это практический метод, который служит инструментом для анализа ситуаций в строительном производстве безотносительно к его содержанию. Научный подход в этой области системного анализа сложился сравнительно недавно. В настоящее время под этим термином понимаются исследования, которые начинаются с общего обзора системы, затем ее структура детализируется по иерархической схеме с возрастающим числом объектов в уровнях. При этом развивается идея разбиения исследуемого процесса на функциональные блоки с декомпозицией в виде блок-схем с разъясняющими комментариями.

В настоящем учебном пособии кратко излагаются основные моменты структурного анализа в варианте, базирующемся на хорошо известных методологиях, позволяющих анализировать процессы строительного бизнеса с трех точек зрения: IDEF0-технологии структурного анализа и проектирования, согласно которой любой производственный процесс представляется как совокупность взаимосвязанных действий; IDEF3-метод сбора данных для проведения структурного анализа системы; DFD — структурный анализ потоков данных, процессов обмена информацией между элементами системы. Все они имеют открытую компьютерную поддержку, что превращает их в единый инструментальный метод, применимый к любым видам деятельности строительных организаций.

Издание состоит из введения и шести глав. В первых трех главах рассмотрены некоторые вопросы теории систем и математических методов решения формализованных задач. В доступной форме для студентов, обучающихся в системе с ускоренной подготовкой, изложены основные положения дискретной математики и исследования операций. Приведены основные алгоритмы оптимизации на графах при решении задач принятия решений. Даны примеры решений задач на практике.

В четвертой и пятой главах рассмотрены и изложены проблемы оптимального управления в условиях неопределенности и методы их решения, излагаются многокритериальные экспертные оценки и эвристики.

Последняя, шестая глава посвящена решению многокритериальной проблемы методом анализа иерархий, который положен в основу процедуры проведения системного анализа проблемы безотносительно к ее происхождению.

Все теоретические положения системного анализа иллюстрируются наглядными практическими приложениями. Приводятся примеры решений задач с использованием приемов сетевой оптимизации. Каждая глава заканчивается контрольными вопросами и заданиями.

Книга, на мой взгляд, будет востребована не только студентами, но и преподавателями дисциплин по принятию решений в управлении строительством, часто сталкивающимися с проблемами неопределенностей в многокритериальных задачах.

Моделирование бизнес-процессов, ставшее обычным явлением на Западе, в России используется редко, чаще специалистами внешних консалтинговых компаний.

В последние годы экономическая практика все ярче выявляет несоответствие между огромным спросом на квалифицированных менеджеров в экономической сфере и реальным, часто неудовлетворительным уровнем их подготовки. Подготовка строительных менеджеров и экономистов высшей квалификации, способных эффективно управлять всеми этапами жизненного цикла строительного бизнеса, стоит в настоящий

момент особенно остро. Вместе с тем число подготавливаемых в этой системе высококвалифицированных специалистов явно недостаточно. Практическая реализация этой идеи в высшем образовании потребует неизбежно корректировки образовательного стандарта и рабочих программ вузов, выпускающих специалистов по строительной экономике, планов издательств и требований к направленности издаваемой литературы. Поток литературы по менеджменту и смежным дисциплинам год от года растет, но проблема, описанная выше, не становится менее острой.

Возвращаясь к качеству подготовки специалистов, следует отметить важность соответствия цели и средств. Большинство учебников написано либо преподавателями, не имеющими достаточного практического опыта, либо специалистами по компьютерным технологиям без достаточного педагогического стажа.

Практически отсутствуют учебники по инструментальным методам моделирования и оптимизации бизнес-процессов в строительстве, ориентированные на вузы РФ. Существующая литература нацелена на формирование мировоззрения менеджера, а не на пополнение его инструментального багажа.

Крайне желательно, как нам представляется, чтобы именно эти направления были отражены в первую очередь в планах издательств, ответственных за выпуск литературы по строительному менеджменту.

*Доктор экономических наук, профессор М. Беляев*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Принятие обоснованных и грамотных решений усложняется многомерностью и сложностью систем, где они реализуются. Управление есть грамотный выбор из множества вариантов, когда необходимо учитывать одновременно несколько условий в виде критериев, определяемых поставленной задачей.

Системный анализ является научной дисциплиной, которая занимается проблемами принятия решений в сложных системах и организациях в режиме анализа большого количества информации. Сложность систем, с которыми приходится иметь дело руководителю строительного предприятия, определяется не только большим числом объектов, но также их богатой разнородностью и многообразием взаимодействия между ними. Каждой системе с ее специфическими внутренними связями и реакцией на внешние воздействия соответствует целевое предназначение. Исследование систем различной природы показало, что они имеют общие свойства в своем функционировании и иерархическом устройстве. Управление экономической и процесс проектирования технического или строительного объекта, например, объединяются в своем решении структурными схемами, изоморфными друг другу, а также алгоритмами продвижения к цели, иерархией связи элементов структуры между собой и т. д.

Современный системный анализ использует основные положения теории систем и является прикладной наукой, с помощью которой руководитель пытается устранить проблемную ситуацию. Неправильное принятие решений порождает проблему. Как правило, разрешение возникшей новой проблемы предоставляется тому лицу, которое это допустило, и число нерешенных задач возрастает. Происходит это оттого, что руководитель не мыслит системно, не охватывает все стороны проблемы и, в конце концов, заходит в тупик. Необходимость повышения системности возникает буквально во всех областях деятельности человека: экономике и управлении, проектировании сооружений, дорожных и информационных сетей, маркетинговых исследованиях и строительной логистике.

Интенсивное внедрение компьютерных технологий привело к значительному увеличению эффективности инструментальной базы и программного сопровождения в обучении и научных исследованиях. Аппаратная реализация принятия решений предусматривает использование ЭВМ как в режиме диалога с пользователем, так и в режиме программирования проблемной ситуации.

Важным аспектом системного анализа как дисциплины является объединение формальных и неформальных действий лица, принимающего решения (ЛПР). Логические вербальные рассуждения в сочетании с формальными алгоритмами совместно с диалоговыми системами поддержки решений приводят ЛПР к цели или приближают его к ней.

Освоение методологии системного анализа, его приемов и процедур связано с трудностями, обусловленными междисциплинарностью решаемых проблем. Учебники и учебные пособия, вышедшие к настоящему времени, ориентированы в основном на студенческую аудиторию безотносительно к ее специализации, что затрудняет использование метода системного анализа в конкретных предметных приложениях. Данное учебное пособие посвящается конкретному направлению — экономике строительства и управлению строительным производством.

Перечень специальностей, где активно используются технологии системного анализа, первоначально ориентированный в основном на специальности «Информационные системы в экономике», постоянно расширяется. В этом списке в данный момент уже нашли себе место такие специальности, как «Бухгалтерский учет и аудит», «Финансы и кредит», «Мировая экономика», «Антикризисное управление», «Экономика строительства» и т. д.

Автор выражает глубокую признательность профессору М. Беляеву за многочисленные обсуждения материала учебного пособия и помощь в продвижении данного издания, Л. Салугиной за помощь в оформлении рукописи.

# 1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ

*Системный анализ как наука. — Развитие системных представлений. — Системный анализ деятельности организации. — Математические модели бизнес-процессов в строительстве.*

## 1.1. Системный анализ как наука

Адаптация российских строительных предприятий к изменениям, связанным с новыми экономическими условиями, а также к глобальным изменениям, происходящим в мире, требует новых методов организации бизнес-процессов. Быстро меняющиеся внешние и внутренние правила ведения строительного бизнеса требуют новых технологий, предусматривающих наличие информации о динамике бизнес-процессов для устранения узких мест и оптимизации производства.

**Системный анализ** — относительно новая дисциплина, причиной возникновения которой послужило развитие компьютерной техники и математического обеспечения при решении многомерных задач в управлении сложными системами [1—4].

Одной из таких задач является аналитическое планирование, где системный анализ является методологической основой принятия решений. Планирование и проектирование желаемого будущего, а также эффективных путей его достижения служит орудием правильного управления. Т. Саати [2] ставит в этом контексте аналитическое планирование на уровень искусства.

Системный анализ является продвинутой методологией управления с математическим аппаратом. Он с успехом применяется для оптимизационных задач в планировании и стратегии управления по нескольким критериям. С точки зрения математики задачи многокритериальной оптимизации остаются сложными для решения даже после формализации. Тем не менее они должны быть решены во что бы то ни стало для окончательного и обос-

нованного решения при достижении цели. Методы решения таких многокритериальных проблем разработаны в системном анализе в контексте задач выбора, как основной концепции принятия управленческих решений.

Теория систем существует давно. Однако до настоящего времени единой методологии изучения функционирования и организации систем не существует. Это связано с тем, что исследование сложных систем требует привлечения дисциплин из различных областей знаний: химии, физики, биологии, экономики, философии, экологии, социологии, политологии и др. Каждая из этих наук, в свою очередь, делится на разделы с конкретными теоретическими положениями в виде законов, аксиом, теорем и соответствующих методов решения. Из истории развития науки известно, что исследование проблем на стыке отраслей привело к синтезу наук (химическая физика, биоэнергетика, биофизика, макро- и микроэкономика, эконометрия). Аналогичный синтез, но на более высоком уровне интегрирования и обобщения наблюдается и в системном анализе.

Проблемы лица, принимающего решения в управлении строительным предприятием, могут быть многоплановыми с привлечением нескольких дисциплин. Сложность в подходах к решению задач возникает при этом из-за отсутствия их междисциплинарной связи. В большинстве случаев ученые общаются в рамках своих конкретных дисциплин. Они не понимают подчас научного и технического языка друг друга и не в состоянии единообразно оперировать системными понятиями и терминами.

Основатель теории систем Р. Буолдинг пишет: «...физики говорят только с физиками, экономисты с экономистами, а эконометристы с эконометристами. Распространение специализированной глухоты означает, что кто-то, кому следует знать что-то, что знает еще кто-то, не в состоянии понять никого другого из-за отсутствия „обобщенного слуха”» [1]. ЛПР часто обращается с системами высокой сложности, поэтому обсуждение понятия сложности для выяснения возможности упрощения без потери основных свойств системы весьма важно с точки зрения практического применения. Структура проблемы может быть настолько сложна, насколько мы ее видим, включая огромное число возможных поведений, альтернатив, целей и критериев. Вместе с тем анализ проблемы должен быть простым и единым.

Системный анализ, таким образом, является связующим звеном при объединении усилий специалистов различных отраслей знаний для достижения единой цели — выработки правильного решения. Прежде чем определить полное понятие системного анализа как дисциплины, введем некоторые определения из теории систем.

**Система** — это совокупность (множество) объектов, объединенных единой целью, связанных между собой определенным порядком и функционирующих благодаря этим связям. Разные по типу связи между отдельными

элементами системы в совокупности порождают новые функции и свойства системы, которых нет у отдельных элементов. Взаимодействия между элементами отражают особенности конкретной системы и определяют организацию системы. В обществе организация — это объединение людей, совместно выполняющих некоторую программу достижения цели и действующих на основе определенных процедур и правил. Эффективность функционирования любой организации зависит от взаимодействия между ее членами.

Организации имеют некоторые общие закономерности, которые можно изучать в системе различных знаний и технических средств, физического и математического моделирования с последующим упрощением для изучения отдельных сторон их поведения. На вопрос «Зачем изучать организации систем?» следует ответ «Чтобы понять, как функционируют системы». Целью ЛПР является управление системой, а чтобы управлять, надо знать ее структуру и свойства, сильные и слабые стороны, чувствительность к внешним воздействиям.

Целостность рассмотрения систем означает решение задач с множеством параметров — характеристик, критериев достижения цели. События в человеческом сообществе с множеством проблем не могут быть рассмотрены изолированно из-за их тесной взаимосвязи. При решении многокритериальных проблем следует правильно формулировать цель и подходить к ней как к единому целому. Таким образом, система объектов любой природы должна рассматриваться как целое, а планирование ее поведения и прогноз реализуются в пределах самой системы, учитывая влияние внешней среды. В связи с этим следует отметить, что системы, как правило, являются открытыми, так как учитывается их связь с внешней средой, и диссипативными — способными обмениваться с ней энергией, массой и информацией.

**Принятие решений** — главная операция в управлении. В системном анализе принять решение означает сделать выбор из множества возможных вариантов управления посредством формальных и неформальных процедур, позволяющих достичь цель или приблизиться к ней. При этом методология системного анализа и связанная с ней теория систем являются основой принятия оптимальных решений. Поддержка решений в случае, когда оптимальность не очевидна, может осуществляться с помощью известных приемов (инструкции, стандарты, формальные алгоритмы, законы, аксиомы и теоремы) различных областей знаний, а также с привлечением неформального (эвристического) подхода, основанного на интуиции и опыте ЛПР.

Системный анализ является междисциплинарной наукой. С практической стороны — это система методов исследования или проектирования сложных систем, предназначенных для ликвидации проблем; с методической стороны — это совокупность процедур и приемов с использованием множества дисциплин из различных областей знаний. Это научная дисциплина, зани-

мающаяся проблемами принятия решений в условиях анализа большого количества информации различной природы. Это некоторая методика, позволяющая по мере возможности как можно шире охватить проблему.

Системы в строительстве являются представителями сложных открытых динамических систем, поэтому они должны формироваться с учетом их реакции на внешние воздействия. В ответ на изменение внешних воздействий (инвестиции, налогообложение, фонд зарплаты) экономические системы преобразуются и развиваются. Адаптация таких систем, как правило, требует длительных периодов их существования. Реакции на изменение окружения часто бывают негативными, тормозящими развитие. Учитывая, что системы открыты и диссипативны возникает *синергетическая нелинейность* их поведения. Здесь иногда реализуются бифуркационные срывы, когда малые изменения внешних воздействий приводят к значительному переустройству системы.

*Синергетические аспекты* функционирования систем, отражающие такие свойства, как самоорганизация и эмерджентность, весьма важны в понимании поведения систем и организаций, управляемых ЛПР. Отсюда очевидна роль ЛПР, обладающего методологией системного анализа. Изучив структуру подчиненной ему организации как системы и ее реакцию на внешние возмущения, ЛПР должен адекватно отреагировать и принять адекватное решение. Довольно часто встречаются драматические исходы в организациях, где руководитель выступает как пассивный наблюдатель, что приводит к дезорганизации системы. Проблемы вообще не устраняются сами собой. Для этого необходимо планирование и прогнозирование с осмыслением того, что произойдет, если принять то или иное решение или ничего не принимать.

*Базой системного анализа* является его методология, основанная на специальных принципах, алгоритмах и аппаратных средствах. Большую роль в методологии системного анализа играют конкретные методы обработки разнородной информации, имитационное и математическое моделирование. ЛПР, разрабатывая математическую модель системы, имеет в виду использование ЭВМ для ее реализации. Бурное развитие компьютерной техники и компьютерных технологий, появление на рынках программного обеспечения, специализированных пакетов для работы со сложными системами увеличило возможности системного анализа в практической сфере строительных предприятий, являясь эффективной базой инжиниринга<sup>1</sup> и реинжиниринга<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> От лат. *ingenium* — изобретательность; выдумка; знания — комплекс коммерческих услуг по подготовке и обеспечению процесса производства и реализации продукции, по обслуживанию и эксплуатации промышленных, инфраструктурных и других объектов.

<sup>2</sup> Радикальное переосмысление и перепроектирование деловых процессов для достижения улучшений главных показателей деятельности компании, таких как стоимость, качество, сервис и темпы.

## 1.2. Развитие системных представлений

Понятие о системе и затем теория систем возникли задолго до возникновения системного анализа [1—6]. В настоящее время системные концепции достигли такого высокого уровня, что мысль о полезности и важности системного подхода стала привычной. Организаторы строительного производства опираются на системность своей деятельности при достижении цели и стараются проводить свою работу на основе всестороннего анализа. Мышление человека также системно и другим быть не может. Как отмечают Ф. И. Перегудов и Ф. П. Тарасенко, «системность — это не такое качество, которым можно обладать, а можно и не обладать. Системность есть не столько состояние, сколько процесс. Она включает в себя не только структуру, а также и процессы и явления, ее сопровождающие» [1].

Система, как основное понятие теории систем, служит человечеству тысячелетия и помогает исследовать такие сложные процессы и явления, как функционирование и развитие биосферы, экономики, человеческого общества. Нам со школы знакомы такие понятия, как «Солнечная система», «нервная система», «система кровообращения», «экологическая система», «экономическая система», «система финансового учета». Все эти «системы» служат для упрощения восприятия сложного и для наиболее удобного представления этого сложного при его исследовании. В своем изложении мы будем использовать некоторые определения и понятия общей теории систем, но только в том объеме, который необходим для разбора проблем в системном анализе.

Основатель системного подхода в управлении Ампер писал: «Беспрестанно правительству приходится выбирать среди различных мер ту, которая более всего пригодна к достижению цели, и лишь благодаря углубленному и сравнительному изучению различных элементов, доставляемых ему для этого выбора, знанием всего того, что касается управляемого им народа — характера, воззрений, истории, религии, средств существования и процветания, организаций и законов, может оно составить себе общие правила поведения, руководящие им в каждом конкретном случае. Эту науку я называю кибернетикой от слова «κοβερνῆτεκ», обозначавшего сперва, в узком смысле, искусство управления кораблем, а затем более обще: управление вообще» [7]. Идеи Ампера не были восприняты обществом, как и долгие годы не находила себе места кибернетика, впоследствии созданная как наука Н. Винером [8]. В нашей стране кибернетика вплоть до 70-х гг. прошлого столетия считалась лженаукой и всячески преследовалась.

Успешность любой деятельности человека обусловлена широтой охвата проблемы и учетом большого числа факторов. Вероятность успеха тем

выше, чем выше уровень системности в моделировании конкретной проблемы. Неудачи появляются оттого, что что-то где-то не учли, а это порождается недостаточной системностью.

Рассмотрим системные аспекты некоторых сторон деятельности человека. Можно выделить три основных уровня системности труда, например механизацию, автоматизацию и кибернетизацию. Возможности *механизации* ограничены участием человека, который управляет какими-либо устройствами, облегчающими его труд (механизмы строительного производства, транспортные средства, техническое оборудование промышленных предприятий и т. д.). Отнесем это к первому уровню системности труда.

*Автоматизация* — это более высокая организация труда, отнесем ее ко второму уровню. Автоматизировать можно только алгоритмизированные процессы. Такие процессы выполняются по заранее определенным планам и законам, описываемым алгоритмами. Автоматические линии сборки строительных конструкций, конвейеры, поточные линии совершенствуют труд, делая его более эффективным.

Третий уровень системного деления труда как процесса деятельности определяется включением в технологические процессы *элементов кибернетики* или *искусственного интеллекта*. Кибернетизация необходима для управления коллективами, занятыми производственными процессами; при проектировании и эксплуатации крупных строительных комплексов; для технократического воздействия человека на природу, т. е. в тех случаях, когда приходится взаимодействовать со сложными системами. Для повышения эффективности взаимодействия человека с биосферой объективной необходимостью стали специальные кибернетические методы на основе искусственного интеллекта при решении проблем изменения климата. К настоящему времени это высший уровень с применением законов кибернетики, искусственного интеллекта и компьютерных технологий.

Н. Винер (1894—1964), основатель кибернетики как науки, в книге «Человеческое использование человеческих существ» провозгласил рождение новой науки. Он писал: «Кибернетика занимается изучением систем любой природы, способных воспринимать, хранить и перерабатывать информацию и использовать ее для управления и регулирования. Здесь она широко пользуется математическим методом и стремится получить конкретные результаты» [6]. Совершенно очевидно теперь родство этих двух дисциплин. Системный анализ и кибернетика — две органически взаимосвязанные науки. При этом кибернетика с ее математическими приемами и системным мышлением является методологической основой для системного анализа.

## 1.3. Системный анализ деятельности организации

### 1.3.1. Понятие «организация»

Международный стандарт (ISO 9000), регламентирующий управление качеством (менеджмент качества) на предприятиях, определяет организацию как группу работников и необходимых средств с соответствующими полномочиями и взаимоотношениями. Организация может быть корпоративной, государственной или частной.

Системное определение: **организация** — это сознательное объединение действий людей, преследующих достижение конкретных целей. Понятие «организация» раскрывает приведенная на рис. 1.1 модель в терминах международного стандарта ARIS (Architecture of Integrated Information Systems — архитектура интегрированных информационных систем). Из схемы следует иерархичность структуры организации.

Каждая заинтересованная сторона преследует свою собственную выгоду от той добавленной стоимости, которая появляется в результате функционирования организации. Любая организация многофункциональна.

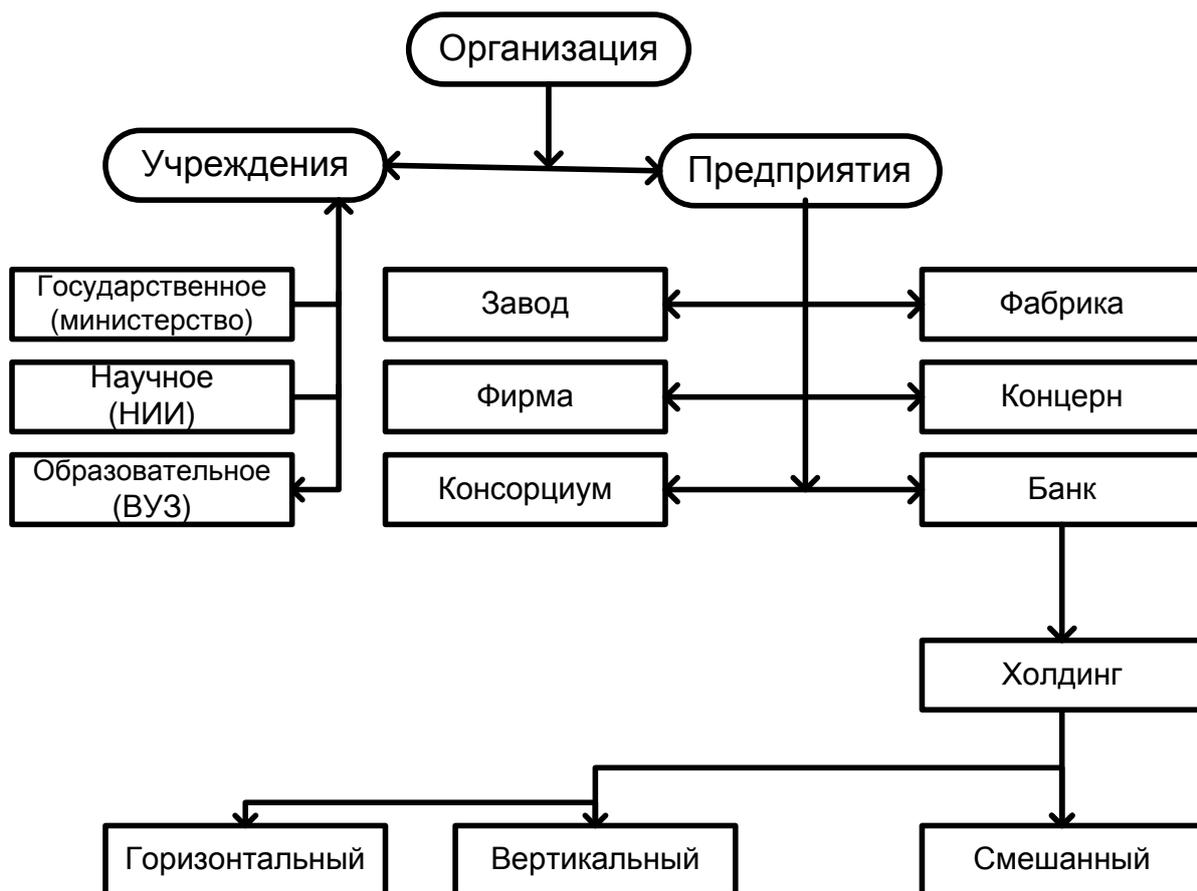


Рис. 1.1. Виды организаций в нотации ARIS

К основным функциям организации можно отнести: маркетинг; аналитическое планирование; стратегическое и оперативное управление; разработка бизнес-процессов; проектирование строительных конструкций; производство строительных смесей; поставка продукции на строительную площадку; закупки материалов и комплектующих; техническое обслуживание и ремонт оборудования; оформление финансовых документов; подготовка кадров и управление персоналом и т. д. Из далеко не полного перечисления функций, возложенных на организацию, следует сложность ее функционирования, многоплановость деятельности. Для выполнения этих функций любая строительная организация, в свою очередь, должна быть соответствующим образом структурирована. Разбиение сложной системы на подсистемы с целью детализации функционирования упрощает управление, делает его прозрачным.

### 1.3.2. Функциональная структура строительной организации

Функционально-ориентированные иерархические организации остаются неизменными и характеризуются вертикальной топологией структуры и иерархией отношений между подразделениями (рис. 1.2).

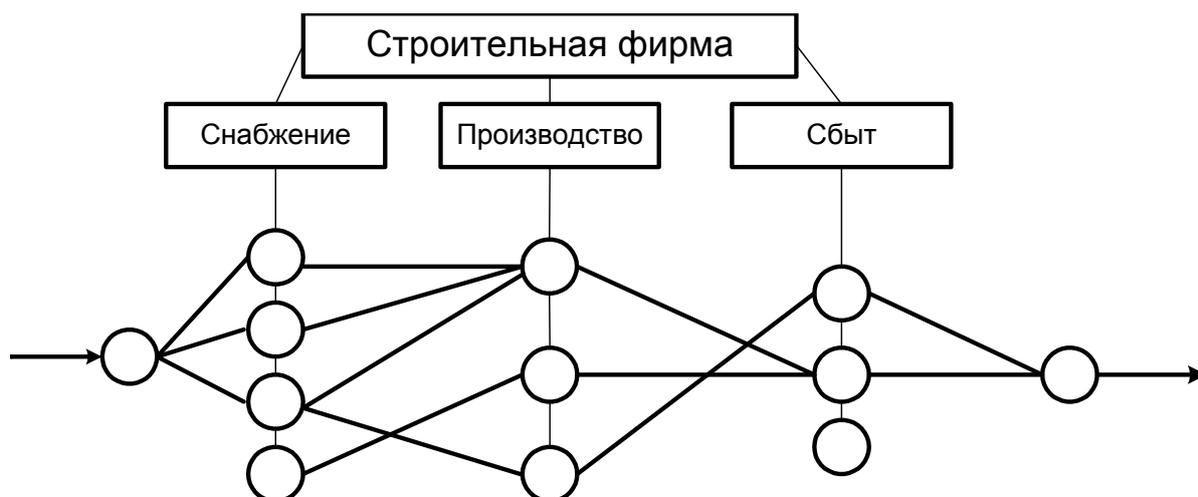


Рис. 1.2. Функционально-иерархическая схема организации, занятой строительным производством

Из схемы следует, что функциональное подразделение снабжение — производство — сбыт несет ответственность за весь бизнес-процесс. Функциональная ориентированность организаций обладает рядом недостатков, основными из которых являются отсутствие способности быстрой реакции на изменения рынка и оторванность работающих от конечного результата. Главным потребителем результатов труда работника в этой схеме является вышестоящий начальник. Отсутствие ориентации на рынок чрезвычайно усложняет взаимодействие и обмен информацией между подраз-

делениями такой организации. Альтернативой строго функциональной структуре является процессно-ориентированная. Тем не менее такая схема достаточно успешно решает задачи документооборота, отчетности и финансирования в строительной отрасли экономики.

### 1.3.3. Процессно-ориентированная организация

Понятие «процесс» в управлении строительным производством определяется как совокупность взаимосвязанных видов деятельности предприятия, преобразующих входы и выходы (рис. 1.3). Он может выполняться в пределах одной строительной организационной единицы, охватывать несколько единиц или даже несколько различных организаций. Процесс обычно связан с операционными отношениями, например, процесс разработки нового строительного изделия или его продажа. Введем некоторые термины, взаимосвязь которых представлена на рис. 1.3.

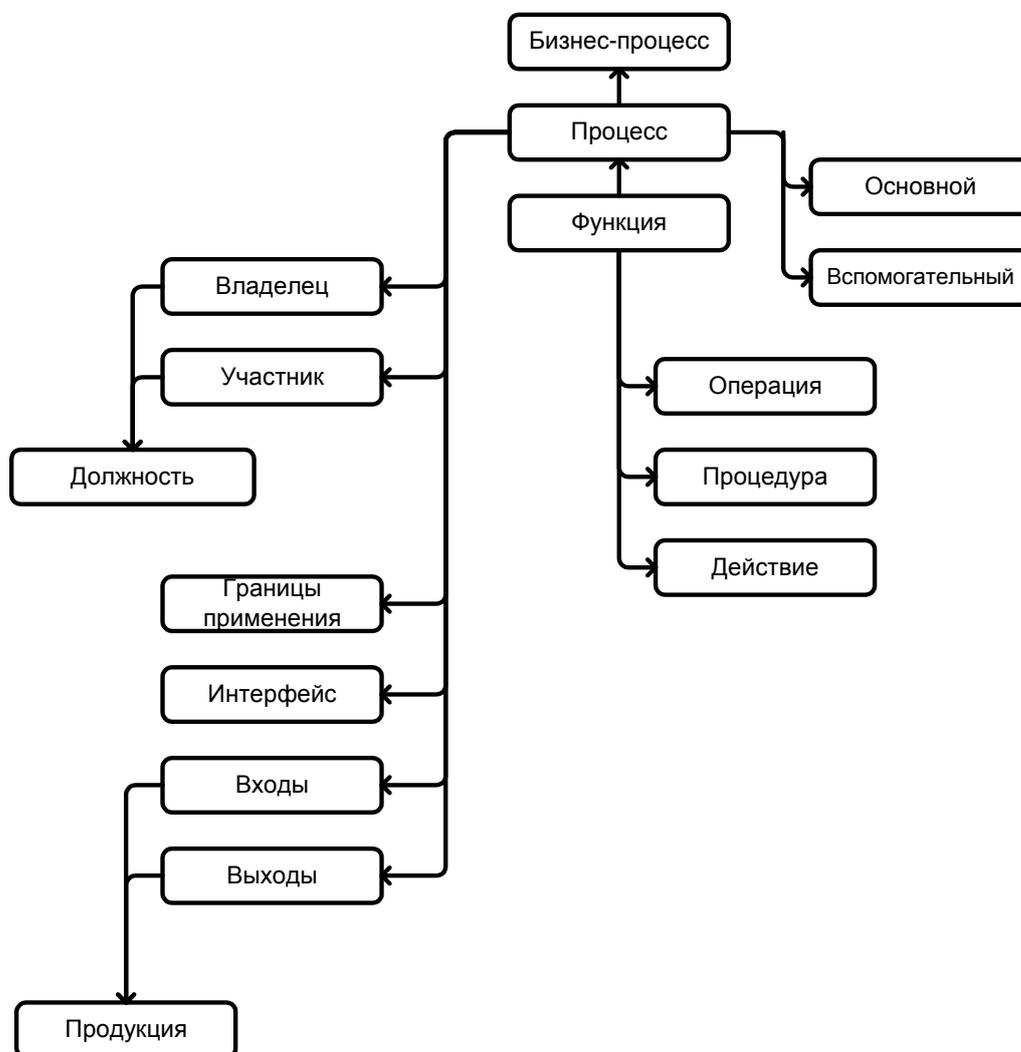


Рис. 1.3. Определение процесса в системе ARIS

Процессы разделяются на основные и вспомогательные. **Основные процессы** — это те, за счет которых появляется новое качество продукции. **Вспомогательные процессы** формируют структуру организации. ЛПР при этом отвечает за процесс и имеет право изменять его с целью усовершенствования. Начало процесса — вход, предшествующий первой операции; выход следует за его последней операцией.

Организационный механизм, посредством которого текущий процесс в нотации ARIS взаимодействует с предшествующим процессом, называется интерфейсом процесса. Строительные организации должны постоянно совершенствовать свои бизнес-процессы для улучшения главных показателей: рентабельности и качества. Несмотря на явные преимущества процессно-ориентированного устройства строительной компании, добиться создания такой структуры в чистом виде довольно сложно. Приемы системного анализа используются здесь для структурирования системы посредством математического моделирования. Создание оптимальной иерархической структуры какой-либо компании с целью реинжиниринга основано на структурно-ориентированной схеме бизнес-процессов, охватывающей всю деятельность предприятия.

При этом первым шагом системной оптимизации строительной компании является выделение основных продуктов и выстраивание процессов в продуктовых «срезах». Как правило, имеются несколько функциональных подразделений, которые принимают участие в обслуживании всех технологических линий: производство, бухгалтерия, отдел кадров, транспорта и логистики и т. д. Перестроить данные направления, разбив их на бизнес-срезы компании, довольно сложно, так как это повлечет за собой массу дополнительных проблем и расходов. В системном подходе для формализации деятельности строительной фирмы следует выделить процессы производства в отдельные блоки и отслеживать сквозные процессы, направленные на создание конечной продукции.

#### **1.3.4. Строительные бизнес-системы и стандарты ИСО**

Любая строительная организация является сложной социально-технической системой. Термин «система», употребляемый в современной строительной бизнес-практике, имеет множество значений и смысловых нюансов. Это приводит к необходимости выделить те определения, которые имеют непосредственное отношение к системному анализу деятельности организации, связанной со строительным производством. Остановимся подробнее на вопросе определения системы с целью уточнения некоторых терминов SADT. В литературе существует множество определений системы. Выделим три из них, как наиболее распространенные.

Одно из определений систем дано в Международном стандарте ИСО. «Система — это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов». Такое определение не отражает, на наш взгляд, главного предназначения этой «совокупности элементов» как системы, так как отсутствует понятие цели, которую достигает любая система в процессе своего функционирования.

Российский энциклопедический словарь трактует понятие «система» следующим образом: «Система (от греческого *Systema* — целое, составленное из частей) — множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, образующих определенную целостность, единство». В этом определении неясно, что такое «целостность».

И третье, наиболее удачное, определение: «система — совокупность связанных между собой и с внешней средой элементов и частей, функционирование которых направлено на получение конкретного результата». Термин «система» лучше всего конкретизируется при рассмотрении его основных свойств, на которых мы кратко остановимся.

Подводя итог, отметим, что для системы характерны: целенаправленность, определяющая ее поведение; сложность; делимость — разбиение на подсистемы, отвечающее конкретным задачам. Следует добавить к этому целостность системы как функционирование множества элементов, подчиненных единой цели. При этом система проявляет свойства эмергентности, т. е. когда свойства, присущие системе в целом, отсутствуют в отдельно взятых элементах. Структурированность определяется наличием связей и отношений между элементами внутри системы и их распределением по уровням иерархии. Одной из важных сторон системы является ее противопоставление окружающему миру — внешней среде. Это определяет открытость систем. Внешняя среда — это все то, что не входит в систему и представляет собой совокупность всех систем, кроме исследуемой, выделенной, интересующей нас в настоящий момент части реального окружающего мира. Поэтому можно сказать, что система — это конечное множество объектов, каким-то образом выделенное из среды посредством границы системы. Понятие «границы» в целом ряде случаев весьма условно, и при моделировании необходимо четко определить, где кончается система, а где начинается среда. Между средой и бизнес-системой, которой является строительная организация, существует множество взаимных связей, с помощью которых реализуется процесс взаимодействия среды и системы. Эти связи важны при изучении экологических проблем, порожденных функционированием строительной организации, а также при оптимизации бизнес-процессов. По входным и выходным связям между системой и окружающей средой путем обмена происходит передача материальных, финансовых, энергетических и информационных потоков. Потоки, переда-

ваемые системой во внешнюю среду, будем называть конечными продуктами деятельности системы, а передаваемые из среды в систему — ее ресурсами.

**Цель системы** — одно из основополагающих понятий общей теории систем и определяется как достижение и сохранение желаемого результата. Применительно к строительной организации более адекватное определение цели — это стремление к оптимальному результату, выражаемому в максимизации ценности вложенного капитала, при постоянном сохранении заданного определенного уровня качества с учетом социальных задач. Вспомогательной стоимостной целью является стремление к оптимальной рентабельности. Далее будет показано, что цель также может быть декомпозирована на подцели с образованием так называемого дерева целей.

### 1.3.5. Системный подход

**Системный подход** — это методология научного познания при исследовании объектов как систем. Специфика системного подхода состоит в том, что он организует исследование таким образом, что вначале выявляются связи сложного объекта, затем они объединяются в единую функциональную структуру в виде иерархической схемы элементов, позволяющих моделировать основные свойства системы, ее структуру и динамику. Процедуры системного анализа определяют переход от сложного к простому, разлагая сложные задачи на ряд задач, имеющих решение.

Системный подход используется в строительстве для обоснования решений технического и экономического характера. Основной процедурой системного анализа как процесса исследования системы в строительстве является построение обобщенной модели производства, адекватно отображающей интересующие исследователя стороны деятельности строительной организации. Системный подход к анализу проблемы и ее решению основан на знании свойств систем, которые исследует ЛПР с целью решения оптимизации и рационального выбора.

### 1.3.6. Принципы системного анализа

**Оптимальность.** Результатом системного анализа является поиск оптимального решения. Как правило, это достигается методами исследования операций, математического и динамического программирования, оптимизационных алгоритмов на сетевых моделях. Принятие решений часто опирается на формальные математические методы. Если представляется возможным описать проблему в виде задачи линейного программирования, то ЛПР это непременно сделает. В отсутствие формальных методов ЛПР использует собственную методологию, которая позволяет «уйти от проблемы» посредством неформальных методов, экспертиз и коллективных оценок.

**Эмерджентность** (от англ. *emergent* — внезапно возникающий). Этот принцип основан на том, что чем сложнее система, тем выше вероятность того, что ее свойства могут отличаться от свойств его частей. Принцип эмерджентности позволяет выявлять несовпадение локальных и главной целей системы. Это весьма важно и необходимо учитывать при проведении системного анализа.

При синтезе элементов в систему у нее возникают новые свойства. Эмерджентные свойства могут появиться, если изменить связи внутри системы. Приведем пример. Имеется простой цифровой автомат  $S$ , увеличивающий на единицу любое целое число, каждое подается на его вход. Если таких два автомата соединить последовательно, то это свойство не изменится (рис. 1.4).

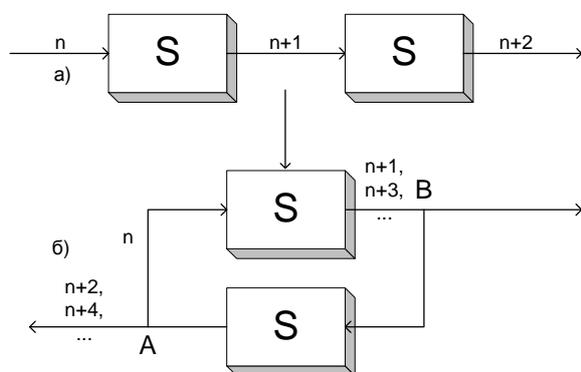


Рис. 1.4. Примеры систем вычислительных автоматов, обладающих различными свойствами

Всем хорошо известный пример из кристаллографии. Углерод с кристаллической решеткой графита приобретает свойства алмаза при изменении связей между атомами и формы элементарной ячейки кристаллической решетки. За счет чего произошли такие изменения? Ответ на этот вопрос есть у физиков. С точки же зрения системного анализа надо констатировать появление нового качества системы при изменении связей внутри нее.

**Иерархия связей** определяет структурные отношения, характеризующиеся упорядоченностью взаимодействий между отдельными уровнями системы по важности. Большинство строительных организаций представляют собой сложные системы, и необходимость иерархического описания обусловлена тем, что управление ими связано с переработкой и использованием больших объемов информации, большим числом связей и транзактов<sup>3</sup>.

Системный анализ является эффективным методом построения модели и реинжиниринга организации. Однако при проведении системного анализа могут возникнуть проблемы как социально-строительного характера, так и проблемы, связанные с конфликтами заинтересованных сторон. Сам процесс системного анализа становится трудным и кропотливым делом, при котором аналитик играет роль посредника между заказчиком и исполнителем.

<sup>3</sup> Потоки в теории информации в имитационном моделировании — это некоторое событие для дальнейшей обработки, в системах массового обслуживания (СМО) — объект для обслуживания.

Часто ЛПР интуитивно понимает и решает возникшие проблемы и не может объяснить принятое решение. Пренебрегая методологией системного анализа он теряет многое, а самое главное — возможность избежать ошибок, которые могут стоить дорогого в будущем. Он часто имеет весьма туманное представление о том, какую пользу могут принести ему информационные технологии. Разработчики программных продуктов, в отличие от него, говорят о необходимости построения систем обработки данных и, как правило, не знают, что именно является нужным для той или иной строительной области. Возникает ситуация, которую можно ликвидировать с помощью системного анализа.

Системный анализ применяется также для совершенствования менеджмента, разработки и внедрения автоматизированных систем управления. При этом используются оптимизация и реинжиниринг бизнес-процессов с внедрением информационных систем и строительной информатики, документирование знаний в виде интеллектуальных моделей, готовых модулей и прототипов. Везде, где речь идет о перечисленных инновациях, используются математические модели систем с реализацией на ЭВМ в виде вычислительного эксперимента или имитации.

## **1.4. Математические модели бизнес-процессов в строительстве**

### **1.4.1. ЭВМ в системном анализе**

Сложность управленческих проблем требует создание модели, с помощью которой ЛПР мог бы «расчленять» общую задачу на части, изучать ее более простые части, а затем объединять их снова для решения в целом, используя категории анализа и синтеза. Такой подход требует новых технологий исследования. Здесь необходимы приемы, объединяющие разнородные области знаний, использующие неформальные методы с применением известных алгоритмов решения формальных задач.

Математическая модель при таком подходе является основой, объединяющей частные проблемы в единое целое и позволяющей изучать динамику систем, прогнозируя их поведение. Метод системного анализа прибегает к упрощениям в моделировании, чтобы выявить основные черты изучаемого объекта, уточнить свойства, очертить контур, узнать его структуру. Как правило, математические модели берут из других наук, где они уже разработаны и широко применяются. Знания из таких областей, как биофизика, бионика, биология и др. переносятся посредством кибернетических концепций на свою проблему, решая конкретные технические задачи. Популяризируя идеи кибернетического подхода в системном анализе, В. Пекелис писал: «Научная теория считается точной, строгой, если ее

содержательные элементы (абстракция, идеализация, отождествление, понятия и т. д.) уточнены в такой степени, что они допускают применение к ним единообразных правил оперирования, т. е. правил, отличающихся формальным характером. Поэтому процесс уточнения, приводящий к возможности такого оперирования, можно назвать процессом формализации».

Формализация неразрывно связана с языком, на котором она превращает в единообразие множество процессов, явлений, структур объектов и систем. В системном анализе такой язык — математика, в котором, если высказывание правильно, то оно правильно всегда и везде.

**Математическая модель** — это образ системы, выраженный в виде формул, алгебраических и дифференциальных уравнений, таблиц информации и схемы связей между элементами моделируемой системы. Формализация с помощью математических приемов позволяет объединять разнородные данные, передавая информацию из одного блока в другой без особых затруднений. Использование компьютерной техники привело к тому, что системный анализ стал применяться во всех государственных проектах, связанных с принятием решений и затрагивающих многие социальные слои населения. Программные средства на различных уровнях моделирования выполняют значительную часть процедур системного анализа. При этом требуется квалифицированная обработка большого объема информации, работа с базами данных (БД) и базами знаний (БЗ). Все это объединяется в компьютерную систему поддержки решений. Она может быть законченной программой или состоять из пакета программ, решающих отдельные задачи. Диалоговые системы связывают формальные и неформальные процедуры, обеспечивают связь с экспертными системами (ЭС). Удачно организованные диалоговые системы увеличивают возможности как ЭВМ, так и человеческого интеллекта и позволяют решать задачи, недоступные только ЭВМ или только человеку. Программные пакеты выступают здесь как эффективное средство исследования сложных систем, подготавливающее необходимую информацию для принятия решения.

Таким образом разрабатываются целые комплексы принятия решений, в которых используются формальные и эвристические приемы. Применение компьютерных технологий в этом контексте неоспоримо. Пакет структурного моделирования, например, iThink производства компании Higt Prformance System (<http://www.hps-inc.com>) является эффективным средством системного анализа для поддержки решений в строительном бизнесе. Программа ориентирована на вычислительные и графические процедуры системного анализа. Среди наиболее распространенных областей применения можно выделить:

- моделирование производственных и финансовых процессов;
- моделирование работы потоковых систем с использованием ориентированных графов;

координация и планирование сложных проектов;  
планирование и распределение ресурсов;  
наглядное представление принципов работы сложных систем.

Программа iThink работает в операционной среде Windows, и демоверсии этого продукта можно найти на сайте ТОРА-Информцентр (<http://www.tora-centre.ru>). Достоинством пакета является возможность построения иерархических моделей, что позволяет представить сложную систему как совокупность простых. При этом оказывается, что в отдельности нельзя решить проблему с использованием только компьютера, так как не существует достаточного числа необходимых алгоритмов, отражающих формальный аспект многомерной проблемы. Вместе с тем человеческий интеллект не в состоянии охватить проблему из-за ее многомерности и сложности. Применение синтеза формального и неформального, модельных алгоритмов и интуиции исследователя позволяет разрешить сложную проблему и получить конкретные практические результаты.

В системном анализе компьютер — основной инструмент для проведения исследований систем и принятия обоснованных решений. Технический прогресс в области электроники привел к новым возможностям в научных исследованиях, конструировании и управлении строительством. Гибкие функциональные способности готовых программ позволяют использовать ЭВМ при создании автоматизированных рабочих мест (АРМ). Разработаны и успешно эксплуатируются АРМ руководителя, бухгалтера, конструктора и др. Пример программного обеспечения автоматизированного рабочего места менеджера ЖБК приведен на сайте <http://www.erudition.ru>. На следующих сайтах можно найти информацию об аналогичных разработках: <http://www.upr1.mnogosmenka.ru>, <http://www.pchome.ru>, <http://www.ichi.ru>, <http://www.vronet.ru>.

Компьютер часто применяется системным аналитиком в качестве консультанта в какой-то узкой профессиональной сфере. Это делают экспертные системы (ЭС). Оценка состояний зданий и сооружений, локализация неисправностей в строительных механизмах, оценка финансового состояния фирмы, выбор вариантов проектных решений, различные неформализованные выводы о состоянии строительного объекта проводятся с помощью экспертных систем.

Компьютерные системы позволяют по-новому подойти к решению задач управления. В системном анализе часто приходится делать выбор среди множества предлагаемых альтернатив. Локальные сети, объединяющие множество компьютеров через телефонную и модемную связи, позволяют получать системному аналитику любую информацию о вариантах выбора, передавать или принимать любое информационное сообщение в виде текстов, звука, изображений и т. д., с целью оценки разных вариантов.

Математическое обеспечение компьютера является его неотъемлемой частью. Оно определяет уровень «интеллектуальности» ЭВМ. Экспертные системы позволяют автоматизировать процесс принятия решений в оптимальном управлении. Обладая огромным объемом фактов, расположенных в базе знаний, и информационного материала, заключенного в базах данных, ЭВМ с помощью специальной машины вывода предоставляет пользователю ответы на его вопросы.

Системный анализ в своей методологии реализует формальные алгоритмы совместно с эвристическими приемами (неформальный аспект принятия решений), используя возможности ЭВМ для обработки больших объемов информации, а также перебора вариантов при поиске наилучшей альтернативы.

Эффективная экономика в строительстве — это прежде всего эффективное управление, которое возможно только на базе управленческой культуры нового уровня с пониманием строительными менеджерами современных концепций управления и умением пользоваться ими на практике. Строительному менеджеру для успешной деятельности необходимо иметь целый арсенал инструментальных средств в области управления, что особенно важно в условиях быстроизменяющихся экономических отношений.

Следует отметить, что, наряду с аппаратным прорывом в компьютерных технологиях, в последние годы отмечаются значительные успехи в разработке интеллектуальных систем. Искусственный интеллект постепенно переходит от экзотического экземпляра модели мозга к средству практических приложений. Нейроинформатика занимает сейчас ведущее место в разработке интеллектуальных средств для распознавания образов, прогнозирования, автоматизированного управления и т. д.

«Нейроинформатика», «нейрокомпьютеры» как новые понятия вошли в научный обиход недавно — в середине 80-х годов прошлого столетия. Искусственный электронный мозг и биологический мозг сравнивались на протяжении всей истории существования вычислительной техники. В отличие от цифровых систем, представляющих собой комбинации процессорных и запоминающих блоков, нейрокомпьютеры содержат память, распределенную в связях между очень простыми процессорами, однотипных формальных нейронов. Главная нагрузка на выполнение конкретных функций нейрокомпьютерами ложится на архитектуру системы, детали которой, в свою очередь, определяются межнейронными связями. Многолетняя работа ученых в этом направлении привела к тому, что к настоящему времени накоплено большое число областей использования нейронных сетей для решения прикладных задач. Образуется новое направление — соединение биологических нейронов с электронными элементами.

По аналогии с Software (программное обеспечение — «мягкий продукт») и Hardware (электронное аппаратное обеспечение — «твердый продукт»), эти разработки получили наименование Wetware — «влажный продукт». В настоящее время уже существует технология соединения биологических нейронов со сверхминиатюрными полевыми транзисторами с помощью нановолокон (Nanowire). В разработках используется современная нанотехнология. В том числе, для создания соединений между нейронами и электронными устройствами используются углеродные нанотрубки (<http://www.softcraft.ru>).

Большое значение в связи с этим приобретает комплекс средств, которые позволили бы менеджеру видеть функциональную структуру строительной фирмы и прогнозировать ее развитие. Ошибки в оценке состояния дел на текущий момент, равно как ошибки прогноза в развитии компании, являются самыми дорогими, так как чреваты непрогнозируемыми, часто тяжелыми для дела, последствиями. У строительных аналитиков сложилось достаточно четкое представление о жизненном цикле фирмы. Важнейшим является этап ее реструктуризации из-за изменения внешних условий. В реструктуризации деятельности строительной компании любого уровня присутствует обследование бизнес-процессов, анализ финансовых и информационных потоков.

Детальный системный анализ предполагает определение узких мест, отрицательно влияющих на эффективность деятельности строительного предприятия; создание нормативной модели бизнес-процессов и информационных потоков; разработку мероприятий по устранению имеющихся проблем и изменению структуры предприятия и производственных процессов; разработку конкретного проекта информационной системы и его реализацию.

### 1.4.2. Анализ структуры систем

В учебном пособии изложен один из наиболее эффективных для изучения в вузовской системе подход, основанный на технологии структурного анализа и проектирования систем (SADT<sup>4</sup>). Данный метод является актуальным из-за конкуренции и возникшей необходимости оптимизации процессов управления, чтобы сделать строительную продукцию одновременно и прибыльной, и конкурентоспособной. Смысл термина «системный

---

<sup>4</sup> Методология структурного анализа и проектирования, интегрирующая процесс моделирования, управление конфигурацией проекта, использование дополнительных языковых средств и руководство проектом со своим графическим языком, возникла в ходе революции, вызванной структурным программированием, когда большинство специалистов стремились разрешить более сложную задачу создания крупномасштабных систем.

структурный анализ» отражает идеологию, заложенную в системном анализе и состоит в разбиении строительного процесса на функциональные блоки. Затем осуществляется декомпозиция процессов с применением графической семантики с текстовыми разъяснениями (дополнениями).

Создание современных информационных систем, так необходимых для системного анализа, требует применения специальных методик и инструментов. Технология создания информационных систем в строительстве предъявляет особые требования к методам реализации и программным средствам. Реализацию проектов по созданию функциональных моделей принято разбивать на этапы. Вначале делают анализ — необходимо понять и описать бизнес-логику предметной области, затем — проектирование, когда определяют архитектуру будущей системы, и наконец, осуществляется кодирование и проверка на адекватность.

Для проведения анализа и реорганизации бизнес-процессов используется CASE-средство верхнего уровня BPWin, поддерживающее методологии IDEF [9—12] (прил. 2). Функциональная модель предназначена для описания текущих бизнес-процессов в строительстве (модель AS-IS) и к чему нужно стремиться (модель TO-BE). IDEF0 осуществляет построение иерархической системы в виде отдельных диаграмм фрагментов системы. Составление модели начинается с описания взаимодействия системы в целом с ее окружением в виде контекстной диаграммы, после чего проводится функциональная декомпозиция, когда вся система разбивается на подсистемы — диаграммы декомпозиции. Разбиение подсистем на более мелкие производится до достижения нужной степени подробности. Каждая декомпозиция определяется экспертами предметной области, представителями заказчика, людьми, непосредственно участвующими в бизнес-процессе. Эта технология позволяет построить модель, адекватную на всех уровнях абстрагирования. Если в процессе моделирования нужно осветить специфические стороны строительной технологии, BPWin позволяет переключиться на нотации IDEF3 или DFD, создавая смешанную модель. Моделирование в среде DFD обеспечивает связь с хранилищем данных, что позволяет моделировать потоки информации, документооборота финансов. Методология IDEF3 включает элементы, позволяющие описывать внутреннюю функциональную логику компонентов системы при моделировании технологии строительного бизнеса.

На основе функциональной модели BPWin можно реализовать модель данных с помощью мощного и удобного инструмента — AllFusion ERWin Data Modeler<sup>5</sup>. Несмотря на то, что процесс преобразования модели BPWin

---

<sup>5</sup> AllFusion ERwin Data Modeler (ранее: ERWin) позволяет проектировать и сопровождать базы данных. Создав наглядную модель базы данных, ERWin оптимизирует структуру БД, обеспечивая требования задач строительного производства. Визуальное моделирование при этом повышает качество создаваемой базы данных и скорость ее разработки.

в модель данных плохо формализуется и поэтому полностью не автоматизирован, используется механизм двунаправленной связи BPWin — ERWin. ERWin имеет два уровня представления модели — логический и физический. На логическом уровне данные не связаны с конкретной СУБД, поэтому могут быть очевидны даже для неспециалистов. Физический уровень данных — это отображение системного каталога, который зависит от конкретной реализации СУБД. ERWin позволяет проводить процессы прямого и обратного проектирования БД. Это означает, что по модели данных можно сгенерировать схему БД или автоматически создать модель данных на основе информации системного каталога. Кроме того, ERWin позволяет выравнивать модель и содержимое системного каталога после редактирования того либо другого.

Подводя итог, отметим, что системный анализ как практический метод служит эффективным инструментом для анализа структур систем. Научный подход в области структурного анализа (SADT) [12] используется как метод исследования системы, представленной в виде иерархической структуры, отражая основную концепцию системного подхода.

Следуя международному стандарту структурного анализа в формате IDEF [9—11], коротко остановимся на его технологиях. Более подробное описание BPWin можно найти в прил. 2. Разработка этого метода в свое время было весомым аргументом в решении вопроса, использовать или не использовать технологию SADT в соответствующей отрасли, в нашем случае — строительстве.

### 1.4.3. IDEF-технология структурного анализа

В соответствии с требованиями структурного системного анализа был разработан специальный язык моделирования IDEF0 как разновидность SADT. Согласно IDEF0 анализируемый производственный процесс представляется совокупностью взаимосвязанных работ по определенным правилам, с учетом информационных, людских и производственных ресурсов, имеющих четко определенный вход и выход. Структурный подход этого языка определяется своими технологиями, обеспечивающими единую сквозную систему моделей с различными уровнями детализации. Рассмотрим их более подробно.

**IDEF3-технология** — это технология сбора данных, дополняющая технологию IDEF0. С ее помощью представляется возможность уточнить картину процесса, последовательно привлекая аналитика к моделированию функций строительного бизнес-процесса. Логика этой технологии позволяет строить и анализировать альтернативные сценарии развития процессов в строительстве (модели типа «Что будет ..., если...?»).

**DFD** (Data Flow Diagramm) — структурный анализ потоков данных позволяют описать процесс обмена информацией между элементами системы. DFD отображает источники и адресаты данных, идентифицирует процессы и группы данных, связывающие в потоки одну функцию с другой, определяет хранилища данных.

Отмеченные методы собраны в виде интегрированного программного пакета BPWin — единого инструментального метода структурного системного анализа, применимого к любым видам строительного производства. Эти методологии относятся к открытым стандартам, в отличие от корпоративных (ARIS, ORACLE и многих др.). Поэтому сейчас из профессиональной сферы они приходят в технологии общего пользования. Подготовленные на основе этого подхода специалисты составляют активный резерв аналитиков и менеджеров строительных предприятий, организаций и фирм для решения проблем корпоративного реинжиниринга. Современные специалисты в строительстве, независимо от специальности, обладают дополнительной гарантией успеха в карьере, так как и те, и другие имеют возможность общаться на одном с ними языке — языке моделирования IDEF. Подобные технологии эффективны при анализе строительного производства, формировании современного менталитета строителя, учат думать системно и могут внести свой серьезный вклад в решение задачи оптимального управления в строительстве. Отсюда следует вывод, что BPWin-технологии можно отнести к человеко-машинным процедурам поддержки принятия решений, а его открытость стимулирует использование его технологий в области строительства.

#### **1.4.4. Функциональные модели в строительстве**

Сфера использования информационных систем и систем автоматизированного производства в строительстве постоянно расширяется. Эффективность таких систем зависит от способности ЛПР обеспечить их разработку, а внедрение задается списком проблем, которые необходимо разрешить с указанием того, какие функции системы должны быть автоматизированы и как взаимодействует система со своим окружением. Этап проектирования системы является важным для создания высококачественных систем. Системное проектирование в строительной отрасли предопределяет подсистемы, компоненты и способы их соединения, задает ограничения, при которых она должна функционировать, выбирает эффективное сочетание людей, машин и программного обеспечения для оптимизации бизнес-процесса.

В настоящее время все большую популярность приобретают инженерные методы реорганизации предприятий на основе современных информационных технологий. Понятия «бизнес-процессы», «процессно-стоимостной подход», «структурный системный анализ», «функциональ-

ное моделирование», «информационное моделирование», «реинжиниринг» и другие уверенно входят в лексикон аналитиков всех уровней. Расширяется спектр компьютеризованных инструментальных методов анализа экономических процессов в бизнесе.

При разработке функциональной модели предприятия структурный анализ разбивает исследуемый процесс на функциональные блоки — под-процессы, исходя из принципов «определенности» и «единственности». Идея иерархии, означающая возможность детализации процессов, реализованная в виде «иерархических структур», использование графических нотаций и текстового дополнения делают структурный анализ эффективным инструментом моделирования. Структурный анализ базируется на отмеченных выше методологиях, позволяющих анализировать процессы с трех точек зрения одновременно: IDEF0, IDEF3 и DFD. Это превращает их в единый инструментальный метод структурного системного анализа, применяемый практически к любым видам строительного бизнеса.

**Функциональное моделирование** — наиболее эффективный метод для установления связи между деловыми правилами и бизнес-процессами строительного предприятия. В процессе моделирования устраняются посторонние детали, а важная информация выдвигается на первый план для упрощения изучения системы.

Графики в виде блоков и стрелок нужны при этом для улучшения понимания структуры модели. Использование моделирования бизнес-процессов позволяет увидеть строительную фирму так, чтобы все аспекты строительства могли быть проанализированы и обобщены для применения. Функциональное моделирование полезно также для устранения избыточных или ненужных функций, сокращения затрат и совершенствования бизнеса строительных предприятий. Еще раз отметим, что BPWin является эффективным инструментом моделирования и понимания комплексных бизнес-процессов. Пакет используется для построения диаграмм, ясно показывающих результаты работы блоков и ресурсы, которые необходимы для их функционирования.

Функциональная модель обеспечивает объединенную картину того, как строительная организация добивается выполнения своих целей. На рис. 1.5 изображено главное окно программы BPWin. Рабочее место BPWin выполнено в виде рабочего стола, состоящего из нескольких окон. Панель «Меню» соответствует стандартам Windows и обеспечивает доступ к основным функциям.

Стандартная панель инструментов (рис. 1.6) обеспечивает быстрый доступ к часто выполняемым задачам и может быть расположена в любой стороне экрана. Эту панель можно показывать или скрывать, используя функцию «View» на панели «Меню».

# 1. Системный анализ и управление

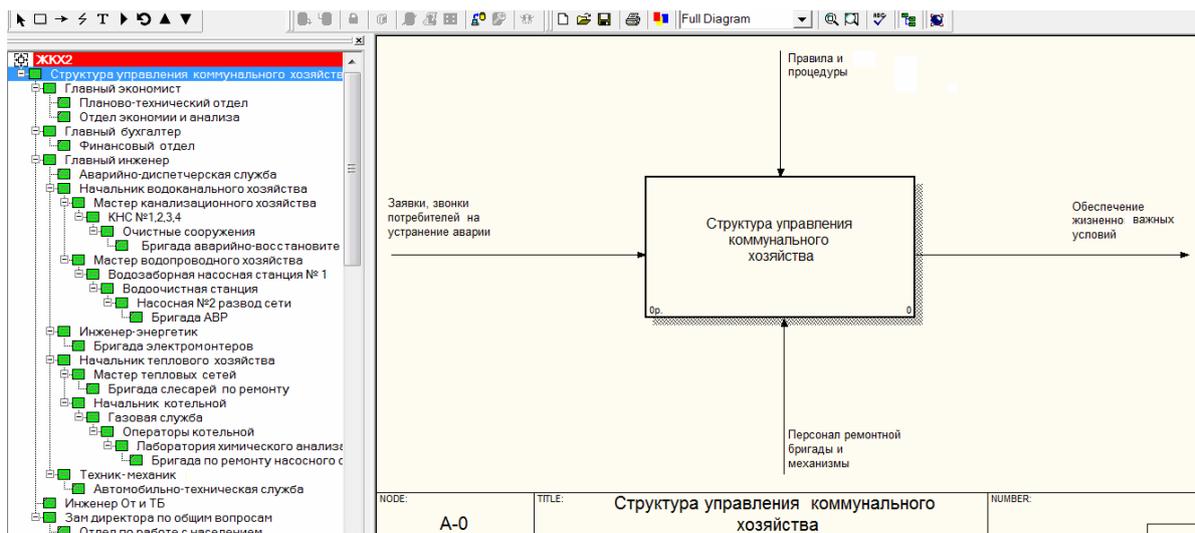


Рис. 1.5. Главное окно BPSwin

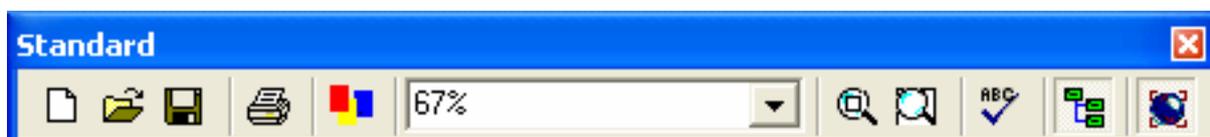


Рис. 1.6. Стандартная панель инструментов BPSwin

Дерево модели BPSwin (рис. 1.7) используется для просмотра структуры модели и изменения любых объектов диаграмм в любой открытый в текущий момент функциональной модели.

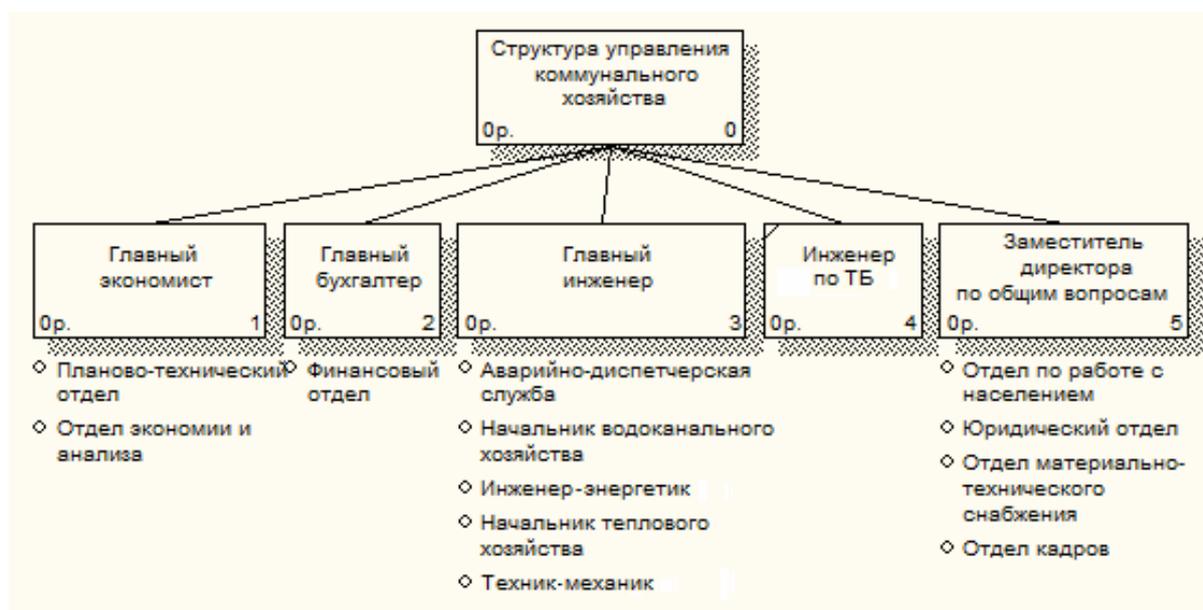


Рис. 1.7. Дерево функциональной модели ЖКХ

Если включен просмотр дерева модели, существует возможность просмотра модели как дерева диаграмм или дерева функциональных блоков. Эта опция имеет специальный набор графических символов для представления диаграмм и действий в пределах дерева объектов и, как правило, используется для переключения на соответствующую модель, диаграмму или действие для выполнения редактирования.

Одновременно работая с несколькими моделями, можно рассматривать все диаграммы или только активные при свернутой и развернутой структуре иерархического дерева. Для любой используемой методологии перечень используемых моделей даст полное представление о всей модели. С использованием дерева можно выполнять задачи моделирования и осуществлять просмотр моделей, построенных с использованием различных методологий. При скрытом дереве модели диаграмма занимает весь экран.

Контекстная диаграмма — это модель, которая представляет систему как набор действий, в котором действие преобразует некоторый объект или несколько объектов сразу. Модель при этом представляется как набор иерархических работ. Высшее действие иерархии называется действием контекста и является самым высоким уровнем, который непосредственно описывает систему. Уровни ниже являются порожденными декомпозициями и представляют подпроцессы родительского действия.

При создании модели сначала необходимо изобразить самый высокий уровень, действие контекста. Наименование действия описывает систему непосредственно и состоит из одного активного глагола в сочетании с обобщающим существительным, которое разъясняет цель деятельности с точки зрения самого общего взгляда на систему.

Каждый блок может иметь различные типы связанных с ним стрелок. Стрелки обозначают людей, места, вещи, понятия или события и связывают границы диаграммы с блоками, а также действия (блоки) на диаграмме между собой.

Вход блока — это материал или информация, которые должны быть использованы или преобразованы блоком, чтобы произвести продукцию (выпуск). Управление — это правила, инструкции, политика, процедуры или стандарты. Оно влияет на деятельность без фактического преобразования чего-либо. Управление всегда входит в вершину блока. Каждый блок должен иметь, по крайней мере, одну стрелку контроля (управления). Управление может также использоваться для описания процедуры начала или окончания выполнения действия.

Выход (выпуск) — это материал или информация, произведенные блоком. Каждый блок должен иметь, по крайней мере, одну стрелку выхода. Процессы, которые не производят продукции (выпуска), лучше не моделировать вообще.

Механизмы исполнения (стрелки снизу) — это те ресурсы, которые обеспечивают выполнение действия. В качестве механизма исполнения могут быть рассмотрены персонал предприятия, машины или оборудование, которые обеспечивают выполнение деятельности. Стрелка механизма может отсутствовать, если определено, что это не важно для работы блока.

Контекстная диаграмма изображает деятельность самого верхнего уровня и обозначает границу моделирования относительно цели, возможностей и точки зрения. Название контекстной диаграммы находится в дереве модели непосредственно под общим описанием.

Для создания контекстной диаграммы необходимо сначала создать новую модель, набрав имя модели и выбрав ее тип. Этот диалог также отображается при запуске BPWin (рис. 1.8). Декомпозиция разложение модели используется в моделировании бизнес-процессов, чтобы дать более подробное описание блоков (рис. 1.9). Каждое из этих действий может, в свою очередь, быть декомпозировано. При каждой декомпозиции блока создается новая диаграмма. Число декомпозиций не ограничено и полностью зависит от уровня сложности, который необходимо показать в модели.

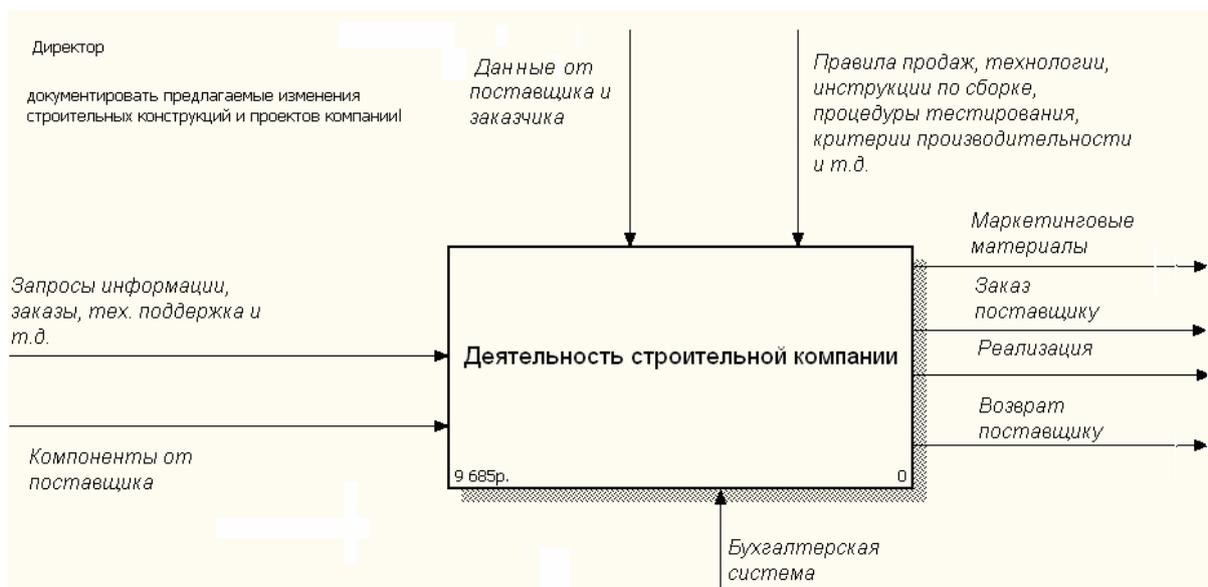


Рис. 1.8. Верхний уровень декомпозиции модели строительной компании

Разбиение моделей в методологии SADT используется для поддержки коллективной разработки моделей. Единая модель может быть разделена на части, чтобы позволить нескольким разработчикам создавать собственные функциональные блоки. При завершении разработки разделенная на части модель может быть объединена в одну для отображения бизнес-процесса в целом. При разбиении модели каждая из частей поддерживает собственный набор функциональных блоков, стрелок и других объектов диаграмм. При слиянии моделей BPWin копирует все функциональные

блоки, стрелки и другую информацию (кроме контекстной диаграммы) из импортируемой модели в основную. ВРWin пропускает диаграмму контекстного уровня в импортируемой модели, поскольку она уже существует в основной модели. Все декомпозиции в импортируемой модели относятся в основной модели к целевому функциональному блоку. Целевой функциональный блок в основной модели всегда должен иметь исходящую из него стрелку связи. Для оценки стоимостных затрат на выполнение работ используется Activity cost editor, вызываемый из соответствующего меню при щелчке правой кнопкой мыши на функциональном блоке (см. прил. 2). Для каждого функционального блока определяются: частота его выполнения; продолжительность работы; затраты на работу блока из «центра затрат».

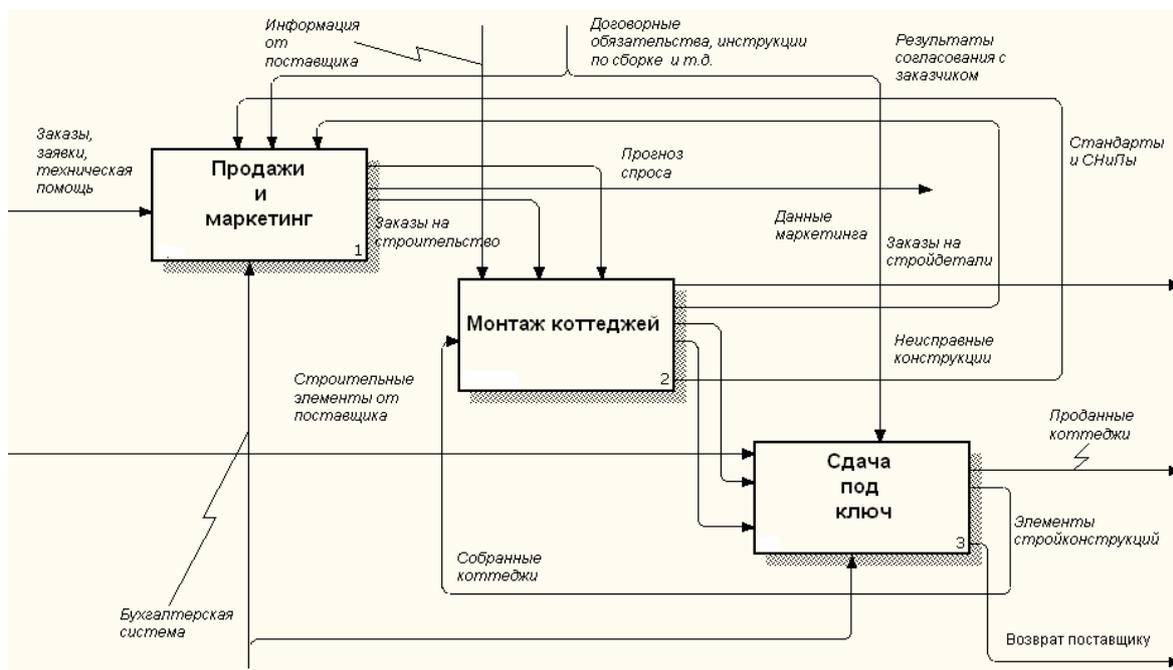


Рис. 1.9. Декомпозиция верхнего уровня модели

Общие затраты на работу функционального блока вычисляются автоматически, она показывается в левом нижнем углу функционального блока, для которого задана оценка затрат.

### Вопросы и задания

1. Дайте определение системы. Проанализируйте значение целевого направления функционирования системы. Приведите примеры систем.
2. Обоснуйте кибернетическое происхождение управления сложными системами.
3. Как автоматизация труда связана с идеей Н. Винера об использовании искусственного интеллекта?
4. Приведите определение организации по международному стандарту и термины ARIS.

5. Постройте функционально-ориентированную схему малого предприятия.
  6. Дайте определение процесса в строительном производстве в нотации ARIS.
  7. Что такое «системный подход» при обосновании технических и управленческих решений?
  8. Оптимальность и решение формальных оптимизационных задач — прерогатива «чистой» математики, используемая в системном анализе при поиске наилучших решений. Что предпринимает ЛПП, когда задача не формализуется и не может быть решена чисто математически?
  9. Что такое «эмерджентность» систем? Приведите примеры появления новых свойств системы при повышении ее сложности.
  10. Что такое SADT; его сущность и история.
  11. Изложите основные моменты структурного анализа систем SADT.
  12. Как связаны методы SADT и IDFX-технологии?
  13. Как строится функциональная модель предприятия в среде BPWin?
  14. Что такое IDEF0? Его краткое содержание.
  15. Что такое BPWin? Его функции и предназначение.
  16. Состав документов функциональной модели (диаграммы, декомпозиции, дерево узлов, рипорты, функционально-стоимостная модель и др.).
  17. Внешние связи BPWin: Word, Excel, PowerPoint и программные средства имитационного моделирования. Коротко об этих связях.
  18. Связи BPWin с MS Project. Механизм передачи связей в ядро календарного планирования работ.
  19. Что такое «анализ работы системы, ее проектирование»; как взаимосвязаны функции моделирования и использования BPWin с задачами анализа?
  20. Какова организация работ по созданию функциональной модели той или иной системы?
  21. Условия противодействия — это условия принятия решения, когда принятие решений зависит не только от стороны, принимающей решение, но и от некоторой другой стороны — «противника» с целями, не совпадающими с целями ЛПП. Точное предсказание действий «противника» невозможно. Принципы прогнозирования возможных действий «противника» таковы: если «противник» предпринимает свои действия, не зная о принятом решении, то вероятности различных его действий оцениваются на основе данных о его действиях в прошлом. Если таких данных нет, то предполагают, что его действия равновероятны. Если «противник» предпринимает свои действия, зная о принятом решении, то он будет действовать наиболее выгодным для себя образом.
- Пример. Фирма выходит со своим товаром на новый рынок. На этом рынке уже продает этот же товар другое предприятие. Прибыль предприятия-противника составляет примерно 12 млн руб. в год. Если фирма выйдет со своим товаром на рынок, то предприятие-противник предпримет одно из следующих действий:
1. Сократит производство, делясь рынком с фирмой. Согласно экспертным оценкам в этом случае прибыль монополиста снизится до 8 млн руб. Прибыль фирмы составит порядка 4 млн руб.
  2. Сохранит прежний объем производства, перенасыщая рынок товаром с понижением цены на него. В результате прибыль монополиста составит примерно 6 млн руб., а новое предприятие понесет убыток в размере 2 млн руб. Если фирма откажется от выхода на рынок, то она ничего не потеряет, но и прибыль не получит. Очевидно, что предприятие-противник сохранит при этом прежний объем производства, и его прибыль не изменится.

Требуется определить, следует ли фирме выходить на рынок со своим товаром.

Данная задача решается в условиях противодействия, так как результат принятого решения зависит не только от самого решения, но и от действий другой. Важно отметить, что цель предприятия-противника состоит не в причинении ущерба фирме. Оно предпринимает действия, уже зная о том, какое решение принято фирмой: вышло оно на рынок или нет. Следует предположить, что предприятие-противник будет действовать наиболее выгодным для себя образом. Возможные действия обоих предприятий и результаты этих действий приведены в табл. Прочерки в табл. соответствуют вариантам действий, которые явно не будут реализованы на практике: очевидно, что в случае отказа нового предприятия от выхода на рынок, предприятие-монополист не будет сокращать объем производства.

*Стратегия предприятия-противника и фирмы*

Действия фирмы	Действия предприятия-противника			
	Сокращение объема производства		Сохранение объема производства	
	Прибыль фирмы, млн р.	Прибыль предприятия-противника, млн р	Прибыль фирмы, млн р	Прибыль предприятия-противника, млн р
Выход на рынок	4	8	-2	6
Отказ от выхода на рынок	—	—	0	12

Из табл. видно, что при выходе на рынок фирма получит прибыль в размере 4 млн. руб. При отказе от выхода на рынок она не получит прибыли вовсе. Решение, рекомендуемое для фирмы, — выход на рынок. Придумайте такие условия задачи, при которых фирме невыгодно реализовывать свою продукцию на указанном рынке. Условьте ситуацию с включением третьего противника.

22. Составьте структурную схему малого предприятия по изготовлению строительных смесей.

23. Разработайте простую функциональную модель строительной корпорации.

24. Каковы технологии модернизации информационных систем и какова роль функционального моделирования в этих процессах?

25. Составьте функциональную модель вуза. Какие основные уровни декомпозиции вы использовали?

26. В чем состоит целостность систем?

27. Как нейроинформатика влияет на развитие искусственного интеллекта?

28. Произведите формализацию проблемы сервисной организации на контекстном языке IDEFX.

29. Нарисуйте двухуровневую функциональную модель при использовании пакета BPWin 4.1. Функциональная модель освоения некоторой дисциплины разрабатывается на основе материалов нескольких предметов, изученных в предыдущие периоды.

30. Для чего служит дерево узлов в диаграммах BPWin?

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ

*Определение модели. — Модели функционирования систем. — Дифференциальные модели с управлением. Конфликтные модели. — Динамические модели и прогноз. — Имитационное моделирование случайных процессов. — Стохастические потоки. — Структурные модели в управлении строительством.*

### 2.1. Определение модели

Если система, с которой имеет дело исследователь, сложная, то она будет для него не более чем объектом для созерцания из-за своей сложности и необозримости. В связи с этим ЛПР приходится рассматривать систему не целиком, а только те ее стороны, особенности, которые интересуют его в данное время. Такое формальное описание называется моделью, необходимость которой вызвана тем, что не всегда возможно поставить натуральный эксперимент. Как изучить поведение здания при землетрясении или ядерном взрыве? Что будет, если осушить водоем? Примеры таких глобальных «экспериментов» уже существуют (проблема Байкала, Аральского моря да и Каспия, опустынивание Черных Земель Калмыкии, проблема Волго-Донского канала и т. д.).

**Модель в системном анализе** — это образ системы, отражающий какую-нибудь ее сторону. В строительстве — это макеты зданий, проспектов, планы и чертежи. Для технолога — чертежи и схемы технологических процессов в виде календарных планов или диаграмм Ганта.

Модели разделяются на три вида: вербальные (словесные, описательные), натурные (физические, масштабированные) и знаковые. К последнему виду относятся математические модели, графики, схемы, карты и чертежи.

Обобщение модели, отражающей все факторы и взаимосвязи в исследуемой системе, является основной процедурой системного анализа. Поня-

тие «модель» широко используется, например, на физическом уровне: модель зданий и сооружений, кораблей, самолетов, автомобилей и т. п. Не действующие модели отражают лишь морфологические особенности объекта, но их знание позволяет исследователю изучать структурные особенности оригинала. ЛПР познает объект, получая необходимую информацию путем непосредственного изучения объекта. Например, биолог изучает видовой состав среды под микроскопом. Но такое возможно лишь на достаточно простых объектах, но не при исследовании целостной структуры экосистемы, взаимодействия ее компонентов с внешним строительством и т. п. В этом случае необходимо моделирование, при котором реализуется следующий алгоритм: исследователь — модель — объект исследования. Например, чтобы получить представление об энергетических потоках в экосистеме, необходимо представить себе модель в виде пирамиды энергий. Здесь появляется промежуточный (вспомогательный) объект изучения — модель. Модель служит вспомогательным объектом, находящимся в определенном соответствии с оригиналом и способным замещать его на отдельных уровнях познания, а моделирование является разработкой и исследованием модели и распространением полученной информации на оригинал. Достоинства моделирования проявляются там, где возможности традиционного подхода оказываются ограниченными. Такой областью познания является строительная экология.

Процесс моделирования можно разделить на следующие этапы: качественный анализ системы, разработка вербальной модели, составление математической модели и ее реализация, верификация и изучение моделей.

На первом этапе формируются задачи и выбирается вид модели, исходя из способа моделирования и характера самого объекта. По способу построения все модели делят на материальные и абстрактные.

**Материальные модели.** Они сохраняют геометрическое подобие оригиналу (макеты зданий, тренажеры, искусственные заменители органов и т. д.), подобие протекания физических процессов — физическое моделирование (гидрологическая модель — течение воды, потоки воздуха и т. п.) и могут быть природными прообразами оригинала. Материальные модели используются обычно в технических целях и мало подходят для экологических проблем в строительстве.

**Абстрактные модели.** Более подходящими для экологического моделирования являются абстрактные модели в виде вербального описания оригинала в словесной форме или с помощью символов, отражающих исследуемые особенности оригинала. Абстрактные модели подразделяются на вербальные (схематические) и математические.

**Вербальные модели** — это формализованный вариант описания в виде текста, таблиц и иллюстраций. Схематические модели разрабатываются в виде различных схем, графиков и фотографий, основные достоинства

такого моделирования состоит в их наглядности и простоте построения (схемы структуры, динамики и энергетики экосистем, воздействия экологических факторов). Вербальные модели — неотъемлемая часть математического моделирования, являющегося наиболее совершенным видом количественного исследования оригинала.

**Математическая модель** — образ системы в виде структурных схем с описанием протекания процессов и состояний системы на языке алгоритмов с математическими формулами, уравнениями и логическими переходами. Здесь нет единого определения, но во всех случаях присутствуют слова: «математические формулы», «уравнения», «алгоритмы». Математическая модель — это абстрактное описание структуры системы и ее функционирования с применением математического языка.

Вначале отметим некоторые требования, предъявляемые к математическим моделям. Во-первых, они должны быть разрешимы. Как правило, это приводит к упрощению моделируемой ситуации, т. е. математическая модель — это упрощенный до какой-то степени образ системы. А до какой степени? Ведь можно так упростить, что ничего не останется. Здесь выступает второе свойство модели — ее адекватность. Математическая модель должна «работать», правильно отражать то, что она описывает.

**Приближенность модели.** Она может быть очень высокой. Некоторые подделки произведений искусства даже эксперты не могут отличить от оригиналов. В других случаях приближенность моделей видна сразу: на картах местности в разных масштабах, уменьшенном макете здания, сетевом графике выполнения работ, блок-схеме технического устройства. Но во всех случаях модель — это другой объект, и различия неизбежны. Различие само по себе определяется той стороной проблемы, которая моделируется при решении конкретной задачи. Величину или степень приемлемости различия мы можем ввести, только соотнеся его с целью моделирования. Точность наручных часов вполне достаточна для бытовых целей и совершенно неприемлема при регистрации спортивных рекордов. Численные расчеты на ЭВМ требуют различное число значащих цифр после запятой и т. д.

Аналогичные рассуждения применимы и к математическим моделям. Математическую модель, с помощью которой успешно достигается поставленная цель, будем называть адекватной. Вместе с тем адекватность означает, что требования к отражению действительности выполнены не вообще, а лишь в той мере, которая необходима в данной постановке. Иногда вводят некоторую меру адекватности модели. Если к тому же такой способ приводит к количественно выражаемой мере адекватности, то задача улучшения моделей существенно облегчается. В таких случаях можно количественно определять различия между моделью и оригиналом.

Вообще говоря, отображать реальность можно лишь приближенно. В результате этого упрощение и приближенность моделей необходимы. Вопрос о том, насколько в количественном отношении должно быть допущено упрощение задачи, моделируемое математическими средствами или физическими измерениями, решается отдельно для каждой конкретно поставленной задачи. Экономическая модель прогноза эффективности вложенных инвестиций, например, допускает точность до одного месяца, в то время как время жизни элементарной частицы моделируется в теории элементарных частиц с точностью до одной миллиардной секунды, а процессы в геологии — миллионы лет. Адекватность математической модели проверяется на объектах с заведомо известными параметрами и поведении во времени и пространстве.

## 2.2. Модели функционирования систем

Схематически процесс математического моделирования сложной системы можно представить в виде схемы, изображенной на рис. 2.1.

Под внешней (окружающей) средой обычно понимают совокупность объектов, не принадлежащих системе, но связанных с ней и оказывающих на нее существенное, хотя и нецеленаправленное влияние.

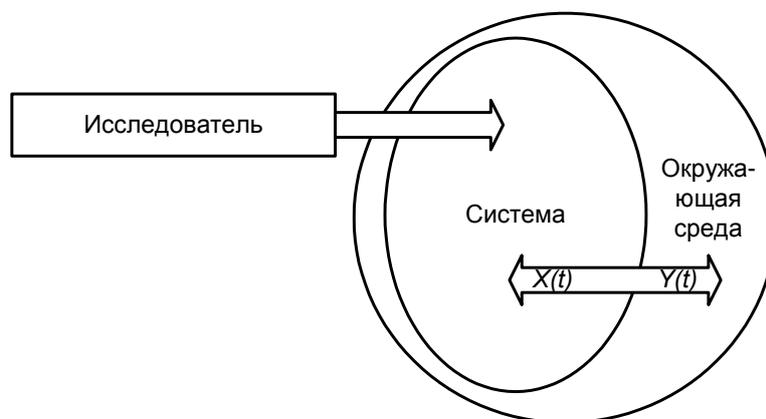


Рис. 2.1. Схема взаимодействия исследователя, системы и окружающей среды при составлении математической модели

Нас будет интересовать функционирование системы в некоторый период  $T = [t_0, t]$ . Множество значений векторов  $x(t)$ , определяющих влияние внешней среды на систему, обозначим через  $X$  и назовем это множество входным процессом:  $X = \{x(t): t \in T\}$ . Примерами таких воздействий в экономике могут быть различные инвестиции, ремонтные работы в строительстве, обновление оборудования в производстве. Реакция системы на входной процесс определяется вектором  $Y = \{y(t): t \in T\}$  (рис. 2.2).

Таким образом, подавая на вход математической модели различные входные процессы и измеряя ее выход, исследователь получает возможность установить и записать математически существующую между ними связь в виде уравнения

$$F(T, Y, X) = 0. \quad (2.1)$$

Это простая математическая модель вида «вход-выход». Подавая на вход системы различные входные сигналы  $x(t)$  и измеряя выходные, исследователь получает возможность установить однозначность выражения (2.1). Может оказаться, что не существует однозначной зависимости между входом и выходом.

На эту зависимость также влияет состояние системы  $Z(t)$ , и формула (2.1) запишется в виде

$$F(T, Z(t), X, Y) = 0, \quad (2.2)$$

где  $Z(t)$  — функция состояния системы в момент  $t$ .

В общем случае состояние системы описывается набором числовых данных (размеры, температура окружающей среды, давление, прочность, платежная способность, спрос на рынке и т. д.).

Приведем пример из строительства. При моделировании сейсмических воздействий на поведение несущих элементов конструкции здания физические модели не всегда подходят. Эксперименты с реальными зданиями или невозможны из-за технических трудностей, или слишком дороги. Математическое моделирование сейсмических процессов является здесь предпочтительнее и имеет большое практическое значение в проектировании сейсмически устойчивых жилых домов.

Процесс старения здания изменяет его реакцию на деформации основания для различных моментов его эксплуатации. Моделирование агрессивных воздействий окружающей среды на состояние строительных конструкций позволяет прогнозировать их состояние, износ, прочность и надежность. Это важно для практики эксплуатации зданий при назначении сроков текущих и капитальных ремонтов.

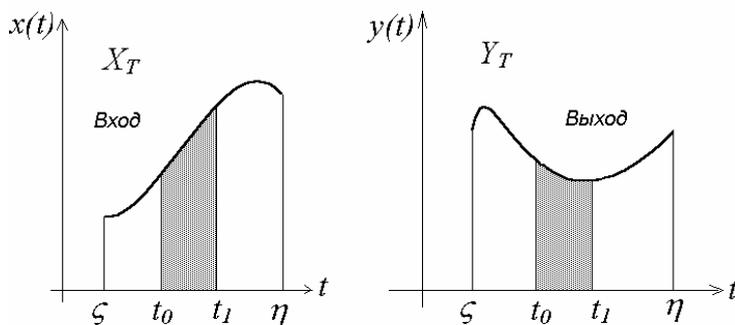


Рис. 2.2. Графики возможных реализаций схемы «вход-выход». С помощью эксперимента можно измерить величины входных  $x(t)$  и выходных параметров  $y(t)$ , которые затем можно будет применить для составления математической модели

Состояние живых организмов как сложных биологических систем влияет на их функционирование. Хорошо известны примеры из медицины. Процесс выздоровления человека зависит от его духовного состояния и настроения. Дифференциальные модели развития раковой опухоли дают много для решения проблемы излечимости этой болезни. Таким образом, состояние системы однозначно определяет схему «вход-выход», если паре процессов  $X$  и  $Y$  найдется такое состояние  $Z(t)$ , при котором выполняется уравнение (2.2).

### **2.3. Дифференциальные модели с управлением. Конфликтные модели**

Дифференциальное уравнение (ДУ) является одним из основных математических понятий. **Дифференциальное уравнение** — это уравнение для отыскания функций, производные которых (или дифференциалы) удовлетворяют некоторым наперед заданным условиям. ДУ, полученное в результате исследования какого-либо реального явления или процесса, называют **дифференциальной моделью**. Понятно, что дифференциальные модели являются частным случаем всего множества математических моделей, которые могут быть построены при изучении окружающего нас мира. При этом необходимо отметить, что существуют различные типы самих дифференциальных моделей. Мы будем рассматривать лишь модели, описываемые обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ), одной из характерных особенностей которых является то, что неизвестные функции в этих уравнениях зависят только от одной переменной.

В процессе построения обыкновенных дифференциальных моделей важное значение имеет знание законов той области, с которой связана природа изучаемой задачи. Так, например, в строительной механике это могут быть законы теории упругости, в теории электрических цепей — законы Кирхгофа, в физике — законы Ньютона и т. д.

В реальной действительности исследователь часто встречается с явлениями, для которых неизвестны законы, позволяющие составить дифференциальное уравнение, и поэтому ему приходится прибегать к различным предположениям (гипотезам), наблюдая за системой при малых изменениях ее параметров. К дифференциальному уравнению приводят разностные уравнения за счет предельного перехода. При этом, если кажется, что результаты исследования полученного дифференциального уравнения как математической модели согласуются с опытными данными, то это означает, что предсказанная гипотеза правильно отражает истинное положение вещей, а модель адекватно описывает моделируемый процесс.

Рассмотренные ниже примеры охватывают далеко не весь круг вопросов, которые могут быть решены с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений. Они дают представление о той роли, которую играют обыкновенные дифференциальные уравнения при решении практических задач. Кроме этого, они знакомят с простейшими приемами и методами исследования функционирования и эволюции систем.

Возвращаясь к дифференциальным уравнениям, отметим, что если для представления их решений пользоваться бесконечными рядами, то удастся решить значительно больше уравнений, чем в замкнутой (аналитической) форме. Однако наиболее существенные и интересные свойства решений нельзя выявить из разложения решений в виде ряда. С другой стороны, если удастся решить дифференциальное уравнение в замкнутой форме, то далеко не всегда его можно проанализировать, так как полученная зависимость между различными параметрами модели часто оказывается необозримой.

Модели без управления описывают динамические процессы в системах с помощью дифференциальных уравнений, которые не содержат произвольных параметров или функций. К их числу относятся прогностические модели, когда заданное начальное состояние определяет траекторию процесса. Примером могут служить проблемы современной экологии, например, отвечая на вопрос «Как определить численность той или иной популяции через определенное время?», мы строим прогностическую модель. Ответ на него представляет не только теоретический, но и практический интерес. Предположим, что некоторая популяция имеет в момент  $t_0$  биомассу  $x_0$ . Скорость увеличения биомассы пропорциональна уже имеющейся, а процессы «самоотравления» снижают биомассу пропорционально квадрату наличной биомассы. В дифференциальной форме эта модель может быть записана в виде

$$\frac{dx}{dt} = kx - \alpha x^2.$$

Эта модель является моделью прогноза и легко решается (предоставляем это читателю) для конкретных начальных условий. Математическая модель в виде дифференциального уравнения с заданными начальными условиями называется задачей Коши.

Динамика популяций двух конкурирующих видов описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= ax + bxy, \\ \frac{dy}{dt} &= cy - dxy, \end{aligned} \tag{2.3}$$

где  $a, b, c, d$  — действительные положительные числа.

В системе уравнений (2.3) для хищников ( $x$ ) слагаемое  $bxy$  выражает зависимость прироста хищников от численности жертв. Для жертв ( $y$ ) слагаемое  $(-dxy)$  моделирует уменьшение слабых особей в зависимости от числа хищников;  $ax$  и  $cy$  — саморазвитие особей обоих типов.

К дифференциальным моделям подобного типа относятся также модели эпидемий, распространения информации, затвердевания бетона, коррозионных процессов, предельной нормы замещения в экономике, прогибов упругих конструкций в строительстве и т. д. Такие модели при заданных параметрах называются моделями без управления и в общем виде могут быть записаны как

$$\dot{x} = f(x, t), \quad (2.4)$$

где  $x$  — вектор системы.

Если система подвержена случайным возмущениям, то (2.4) запишется в виде

$$\dot{x} = f(x, t, \bar{\xi}), \quad (2.5)$$

где  $\bar{\xi}$  — случайный вектор внешнего воздействия.

Модели с управлением содержат некоторую функцию  $u(t)$ , находящуюся в распоряжении ЛПР, с помощью которой систему можно перевести из одного состояния в другое (в зависимости от поставленной цели) по некоторой траектории. Оптимальная траектория при этом определяется целевой функцией, определяющей интересы ЛПР. На математическом языке такая задача сводится к поиску минимума функционала (целевой функции) вида

$$J = \int_0^T F(x, u, t) dt, \quad (2.6)$$

где  $T$  — конец интервала наблюдения;  $F(x, u, t)$  — функция цели в момент  $t$ ;  $u$  — функция управления.

Функционал (2.6) в зависимости от поставленной задачи минимизируется или максимизируется. Если  $J$  является отражением выигрыша (прибыль), то ищется его максимум. Затраты, определенные в (2.6), должны минимизироваться.

Очень часто такие модели приводят к конфликтам. Предположим, что процесс управления определяется действиями нескольких субъектов, в распоряжении которых имеются свои управления, отражающие собственные интересы:  $u, v, w, \dots$

Когда  $\dot{x} = f(x, u, v, w, \dots, t)$ , функции управления будут выбираться с учетом уже нескольких условий вида



в системном анализе с применением обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями.

Предположим, что торговая фирма реализует продукцию, о которой в момент времени  $t$  знают лишь несколько покупателей ( $x$ ) из их общего числа  $N$ . Для более эффективной реализации своей продукции были сделаны рекламные объявления по телевидению. Информация, полученная с экрана, распространяется, кроме всего, посредством общения покупателей друг с другом. Математическая модель должна описать зависимость числа осведомленных о товаре покупателей от времени:  $x(t)$ . Это необходимо для того, чтобы иметь возможность оценивать время, в течение которого рекламная информация охватит большинство жителей города. Запишем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{dt} = kx(N - x), \quad (2.8)$$

где  $dx/dt$  — прирост знающих за единицу времени;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $x$  — число знающих;  $(N - x)$  — число незнающих.

Разделим переменные и запишем (2.8) в виде  $\frac{dx}{x(N - x)} = dt$  и проинтегрируем:  $\int_{x_0}^{x(t)} \frac{dx}{x(N - x)} = k \int_0^t dt$ . Для вычисления интеграла слева воспользуемся разложением

$$\frac{1}{(x + a)(x + b)} = \frac{1}{a - b} \frac{(x + a) - (x + b)}{(x + a)(x + b)}. \quad (2.9)$$

Применяя это разложение для нашего случая, получим

$$\int_{x_0}^{x(t)} \left( \frac{1}{x - N} - \frac{1}{x} \right) dx = k \int_0^t dt, \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{N} \ln \frac{x}{N - x} = kt,$$

$$\frac{x}{N - x} = Ae^{Nkt},$$

где  $A$  — постоянная интегрирования, смысл которой предоставляем читателю выявить самостоятельно.

Решая последнее выражение относительно  $x$ , получим

$$x = \frac{NAe^{Nkt}}{1 + Ae^{-Nkt}}. \quad (2.11)$$

Это уравнение описывает многие процессы в природе и называется логистической кривой (рис. 2.3). По ней можно судить о том, когда цель рекламы будет достигнута.

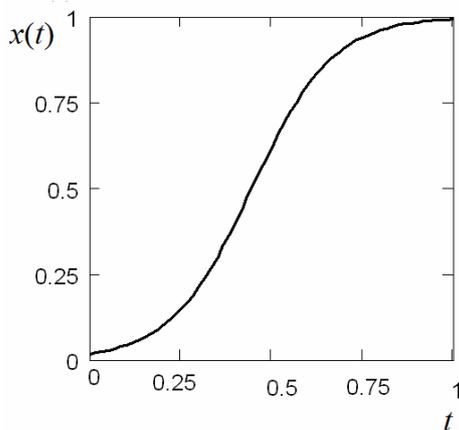


Рис. 2.3. Кривая распространения информации

Вид полученной зависимости свидетельствует о нелинейном характере распространения информации. Вначале процесс идет медленно, набирая максимальную скорость при  $t = 0,5$ . Затем наблюдается замедление процесса. Процесс стабилизируется.

Эволюция многих систем различной природы описывается именно этой кривой. Максимальный рост и затухание — свойство динамики открытых диссипативных систем [6, 13].

Применение системного анализа в экологии обусловило формирование целого направления, ставшего ее самостоятельной отраслью — системной экологией. Системный подход в экологии является направлением в методологии познания биологических объектов как систем. Система в экологии (экосистема) есть множество взаимосвязанных элементов как внутри экосистемы, так и с внешней средой, образующих определенную цель своего функционирования (биогеоценоза). Одной из внешних составляющих экосистем часто выступают объекты строительства в виде сооружений. Состав, структуру и свойства таких систем изучают посредством системного анализа, являющегося основой системного подхода и представляющего собой совокупность методологических средств, используемых для решения сложных научных проблем в строительной экологии. В эту совокупность средств входит комплекс методов: от простых описательных, логических до весьма сложных математических. Интеллектуальной основой системного анализа в этом случае являются информационные системы с широким использованием методов математического программирования, математического и имитационного моделирования.

Основными системными принципами строительной экологии являются: целостность, структурность, взаимозависимость системы и среды, иерархичность, множественность описания.

Целостность является обобщенной характеристикой экосистемы, свойства которой несводимы к сумме свойств ее элементов (свойства каждой подсистемы несводимы к свойствам нижестоящих уровней).

Структурность здесь устанавливает взаимозависимости элементов и обуславливает поведения системы в целом (структура биоценоза, уста-

новление измеримых связей между уровнями строительной организации, степень загрязнения атмосферы и расположение производственных объектов региона и т. п.).

Взаимозависимость системы и среды выражается в проявлении влияния функциональной деятельности любой системы на биосферу.

Иерархичность в строительной экологии означает, что каждый компонент может рассматриваться как самостоятельная система, а исследуемая система является некоторой составной частью системы высшего уровня (уровни биологической организации и строительных инфраструктур, вплоть до глобальной системы — биосферы).

Экосистемы в сочетании со строительной инфраструктурой представляют собою сложные самоорганизующиеся с иерархической структурой системы, требующие построения математических моделей.

**Математическая модель** является математическим описанием оригинала, отражающим его целостность, структуру, динамику, функционирование внешних и внутренних факторов.

подавляющее большинство живых объектов и систем — это динамические системы и могут быть отражены только лишь динамическими моделями.

С точки зрения технологии применения математических методов можно выделить модели аналитические и имитационные.

**Аналитическая модель** — это построение теоретических концепций с применением строгого математического аппарата, обычно позволяющего вывести общую формульную зависимость.

**Имитационные модели** отражают представления исследователя о взаимосвязях в экосистеме и их реализации.

Наилучшие результаты эти модели дают при составлении прогнозов поведения систем.

Одним из этапов моделирования является проверка соответствия модели оригиналу. Здесь необходимо удостовериться, что выбранная модель адекватно отражает исследуемые стороны оригинала. Для этого можно сравнить полученные данные с результатами наблюдений за моделируемым объектом. Модель может быть признана высококачественной, если прогнозы оправдываются. При отсутствии эмпирических данных проводится теоретическая верификация; по теоретическим данным модели определяется область применения и ее прогностические возможности. Основная цель заключительного этапа — экспериментирование с моделью и экологическая интерпретация модельной информации, выявление новых закономерностей и исследование возможностей оптимизации структуры и управление поведением моделируемой системы, а также пригодность модели для прогнозирования.

В экологии математические модели экосистем предлагают разделить на модели популяционного, биоценотического и экосистемного уровней.

**Популяционные модели** описывают особенности отдельных популяций, отражают их свойства и внутренние закономерности: модели, позволяющие оценить динамику численности и возрастного состава популяций в зависимости от рождаемости и смертности, заданных как функции лишь от общей плотности и возрастного состава популяций.

**Модели биоценотического уровня** задаются как системы уравнений, отражающих динамику биоценоза как функцию плотностей составляющих его популяций.

**Модели экосистемного уровня** представляют собой, как правило, системы уравнений, в число аргументов которых включены как внутренние переменные состояния, так и внешние факторы воздействия и целостные свойства экосистем. Модели данного уровня учитывают и роль обратных связей в функционировании систем.

В строительной экологии при построении модели антропогенного воздействия необходимо учесть наиболее существенные факторы, влияющие на рассматриваемые явления, и уделить особое внимание противоречащим целям элементам, а также учесть возможность появления неизвестных факторов.

Биология — одна из первых наук, в которой приоритетное значение приобрел системный подход, впервые в научной форме использованный Ч. Дарвином. На новую, более высокую ступень идеи системного подхода были поставлены в учении В. И. Вернадского о биосфере и ноосфере, где научному познанию предложен новый тип объектов — глобальные системы. Такой глобальной экосистемой и является биосфера, объединяющая на основе иерархического принципа все экосистемы Земли более низких уровней, включая строительную. Последнее обстоятельство особенно важно для современного технократического развития человеческого сообщества со всевозрастающим производством и строительством.

Системная экология изучает взаимодействие живых организмов с окружающей средой. Основным процессом в экосистемах с животным населением является эволюция его развития.

Рассмотрим модель развития некоторой популяции, полагая, что среда обладает неограниченными питательными запасами. Мы также не будем учитывать конкуренцию внутри популяции и межвидовую борьбу за выживание. Пусть  $x(t)$  — число особей в момент времени  $t$ . Тогда если  $A$  — число особей, рождающихся в единицу времени, а  $B$  — число особей, умирающих в единицу времени, то можно записать дифференциальное уравнение, описывающее процесс размножения:

$$\frac{dx}{dt} = A - B. \quad (2.12)$$

Задача состоит в том, чтобы описать зависимость  $A$  и  $B$  от  $x$ . Простейшим случаем является ситуация, когда  $A = \alpha x$ ,  $B = \beta x$ . Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты рождаемости и смертности соответственно. Подставив  $A$  и  $B$  в (2.12) и произведя разделение переменных, получим

$$\frac{dx}{dt} = (\alpha - \beta)x dt, \quad \frac{dx}{x} = (\alpha - \beta) dt, \quad (2.13)$$

$$\int_{x_0}^{x(t)} \frac{dx}{x} = \int_{t_0}^t (\alpha - \beta) dt.$$

Здесь  $x_0$  — значение популяции в начальный момент. Интегрирование (2.13) дает

$$\ln \frac{x}{x_0} = (\alpha - \beta)(t - t_0), \quad x(t) = x_0 e^{(\alpha - \beta)(t - t_0)}. \quad (2.14)$$

Полученное решение позволяет моделировать процесс размножения популяции для различных значений коэффициентов смертности и рождаемости. Рассмотренная модель есть ничто иное как задача Коши. Это поучительный пример ненапрасного освоения математических дисциплин, преподаваемых в вузе, в частности дифференциальных уравнений.

### 2.4.2. Модель эпидемии

Математическая модель, которая будет рассмотрена ниже, является примером, отражающим процессы распространения потоков любой природы. Постановку задачи можно сформулировать следующим образом.

В изолированном населенном пункте с населением  $N$  человек в момент времени  $t = t_0$  приехал один человек и стал источником инфекционной болезни. Будем считать, что на первом этапе развития эпидемии нет изоляции заболевших, а выздоровление и летальные исходы не учитываются, и посмотрим, что произойдет.

Введем обозначения:  $x(t)$  — число инфицированных в момент времени  $t$ ;  $y(t)$  — число здоровых. Тогда  $y(t) + x(t) = N + 1$ , так как при  $t = 0$  должно выполняться условие  $x(0) = 1$ . Рассмотрим интервал времени  $[t, t + dt]$ , где  $dt$  — малая величина. Сколько новых больных появится за этот промежуток времени? Можно предположить, что их число будет пропорционально величине  $dt$ , а также числу встреч здоровых с заболевшими, т. е. произведению величин  $x(t)y(t)$ . Таким образом, можно записать  $dx = Lx(t)y(t)dt$ , где  $L$  — коэффициент пропорциональности. Устремляя  $dt$  к нулю, получим

$$\frac{dx}{dt} = Lx(N - x + 1). \quad (2.15)$$

Полученное уравнение — основа дифференциальных моделей эпидемий. Очевидно, что его решение такое же, как и для дифференциального уравнения, полученного нами при моделировании распространения информации. Нетрудно убедиться в правомочности этой модели для описания процесса затвердевания бетонной смеси или разрушения железобетонных конструкций в агрессивной среде.

### 2.4.3. Математическое моделирование процессов эрозии

Динамические непрерывные модели описывают процессы во времени и безотносительны к природе явления. Рассмотрим их приложения с точки зрения природопользования. Грунтлитосферы с верхним слоем в виде почвы — неотъемлемый компонент всех строительных экосистем. Она обеспечивает циклический характер воспроизводства жизни и в этом, по мнению Г. В. Добровольского [14], заключается ее роль в общей экологии. Деградация почвенного покрова за счет смыва дождевыми и талыми водами с последующим разрушением слоя грунта приводит к необратимым процессам геоэкологии.

Рассмотрим процесс разрушения грунта на поверхности, расположенной под некоторым углом к горизонту. При образовании потоков воды от дождей и снеготаяния с этой поверхности происходит смыв слоя грунта в виде элювия. Динамическая модель эрозионного процесса может быть описана дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dP}{dt} = kP(P_{\max} - P), \quad (2.16)$$

где  $dP/dt$  — прирост слоя, образованного у подножья склона за счет смывтой почвы, за единицу времени;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $P_{\max}$  — исходный объем грунта;  $P$  — масса разрушенного материала;  $(P_{\max} - P)$  — оставшийся слой.

Модель предполагает, что скорость разрушения пропорциональна количеству вещества  $P$  в данной точке и тому количеству, которое обеспечивает поступление материала в эту точку  $(P_{\max} - P)$ .

Кривая динамики смыва также описывается логистическим выражением (2.11), полученным при моделировании процесса распространения информации. По виду кривой (см. рис. 2.3) можно судить о времени, когда весь материал будет перенесен к подножью склона. Рассмотренный процесс динамики описывается дифференциальным временным уравнением, где независимой переменной является время  $t$ .

Перейдем к пространственной переменной для описания распределения вынесенного материала вдоль оси  $x$ . В дифференциальном уравнении (2.16) замену переменной  $t$  можно произвести с помощью линейного при-

ближения ( $x = rt$ ) и получить аналогичное уравнение для независимой пространственной переменной  $x$ :

$$\frac{dP(x)}{dx} = bP(x)(P_{\max} - P(x)). \quad (2.17)$$

Решением уравнения (2.17) является функция

$$P(x) = \frac{1}{1 + \exp(a - bx)}, \quad (2.18)$$

которая получена после нормировки  $P(x)$  на единицу,  $a$  и  $b$  — коэффициенты.

Полученное решение может быть интерпретировано следующим образом. Количество вещества, вынесенного из элемента склона  $dx$  с единичной шириной, пропорционально количеству вещества в точке  $x$  и его «дефицита», определяемого величиной  $P_{\max} - P(x)$ , где  $P_{\max}$  — максимальная высота падения на исследуемом склоне. В данной модели динамический аспект массопереноса имеет балансовое происхождение, основанное на законе сохранения вещества или уравнении непрерывности.

В рассмотренных моделях нет физической основы. Это скорее абстракция, как и любая математическая модель, целью которой является получение информации о скорости смыва грунта, а также возможность прогнозирования эрозийного процесса. Аппроксимация формы склона логистической функцией имеет важное прикладное значение, поскольку позволяет существенно упростить расчеты и применять ее в качестве аналитического выражения при расчете эрозии и аккумуляции при заданных значениях интервалов эволюции склонов.

Математическая модель (2.16) является основой количественного описания дефляционных процессов в строительной экологии. Результатом математического моделирования с помощью рассмотренной дифференциальной модели является прогнозирование состояния почвы на будущее и предупреждение о предстоящей катастрофе, когда невозможно будет самовосстановление верхнего слоя из-за слишком интенсивного его удаления при антропогенном воздействии.

#### **2.4.4. Математическое моделирование динамических переходов в экосистемах**

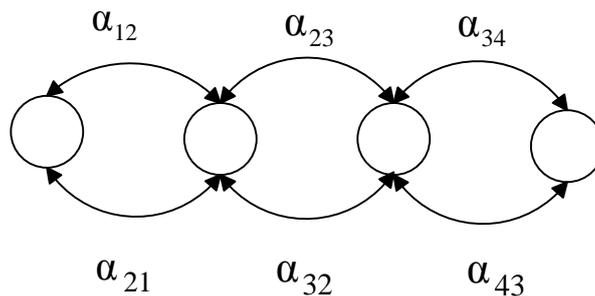
В живой природе часто рядом сосуществуют близкие по структуре и свойствам объекты биогеоценоза (клетка — мембрана — ткань, раковая опухоль — лейкоцитозная оболочка — здоровая ткань, кустарник — дерево — травянистое растение, пустыня — пастбище — лес и т. д.). В процессе функционирования эти элементы экосистем взаимодействуют между

собой с различными механизмами. Таким образом, в некоторой открытой экосистеме можно обнаружить взаимные переходы между отдельными элементами (развитие одних и гибель других в процессе их пространственно-временного сосуществования). Математические модели таких превращений представляют собой систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= \sum_{j=1}^n \alpha_{1j} y_j + b_1, \\ \frac{dy_2}{dt} &= \sum_{j=1}^n \alpha_{2j} y_j + b_2, \\ &\dots\dots\dots, \\ \frac{dy_n}{dt} &= \sum_{j=1}^n \alpha_{nj} y_j + b_n, \end{aligned} \tag{2.19}$$

где  $\alpha_{ij}$  — коэффициенты переходов;  $y_i$  — объемы элементов экосистемы;  $b_i$  — факторы влияния со стороны внешнего окружения (внешняя среда).

Рассмотрим конкретную математическую модель для четырех элементов со взаимными переходами по следующей схеме:



Система дифференциальных уравнений для математической модели будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= -\alpha_{12} S_1 + \alpha_{21} S_2, \\ \frac{dS_2}{dt} &= -\alpha_{23} S_2 + \alpha_{12} S_1 + \alpha_{32} S_3 - \alpha_{21} S_2, \\ \frac{dS_3}{dt} &= -\alpha_{34} S_3 + \alpha_{23} S_2 + \alpha_{43} S_4 - \alpha_{32} S_3, \\ \frac{dS_4}{dt} &= \alpha_{34} S_3 - \alpha_{43} S_4. \end{aligned} \tag{2.20}$$

Здесь  $S_i$  — площади элементов ландшафта,  $\alpha_{ij}$  — интенсивности переходов, полученные из наблюдений.

Рассмотрим некоторые детали модели. Первое уравнение  $\frac{dS_1}{dt} = -\alpha_{12}S_1 + \alpha_{21}S_2$  описывает взаимодействие между первым и вторым элементами по следующему механизму: с интенсивностью  $\alpha_{12}$  элемент  $S_1$  передает свои ресурсы (знак у коэффициента  $\alpha_{12}$  отрицательный) элементу  $S_2$ . В свою очередь  $S_2$  возвращает часть своего запаса элементу  $S_1$  с интенсивностью  $\alpha_{21}$  (знак положительный). Остальные дифференциальные уравнения системы получены аналогично.

Моделирование подобных динамических систем, основанное на составлении соответствующей системы дифференциальных уравнений, требует от исследователя хорошего знания предметной области. Процесс составления математической модели сложный и трудоемкий, состоящий из усилий специалистов разных областей знаний. Симбиоз предметников с математиками, физиками и программистами позволяет решать серьезные в настоящее время проблемы, связанные с задачами сохранения природных ресурсов в строительной экологии.

Перед автором учебного пособия в свое время стояла задача составить математическую модель в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих дефляционные процессы (опустынивание) в Черных Землях Калмыкии. Данные изменения пастбищ брались из аэрокосмических снимков. Были выделены четыре типа пастбищных угодий, которые индцировались по специальной методике обработки снимков космического мониторинга через каждые пять лет. По этим данным экспериментально были определены коэффициенты переходов между выделенными элементами. Статистическая обработка показала интенсивное разрушение экосистем, это представляло опасность для существования Черных Земель как основного источника биозапаса. Математическая модель (2.20) позволила сделать прогноз-предупреждение о недопустимости перегрузок Черных Земель.

Математическое моделирование в строительной экологии, развиваемое в настоящее время повсеместно, позволяет делать эксперименты, не затрагивая природные системы. Это весьма ценно с точки зрения сохранения биосферы в целом. Кроме этого, моделирование динамических процессов во времени дает возможность делать прогнозы функционирования природных и человеческих инфраструктур, определяя последствия предполагаемых мероприятий по природопользованию.

### 2.4.5. Дифференциальные модели в экономике

Применение дифференциальных уравнений в изучении экономических процессов также обусловлено их динамическим характером. Проблема рациональной стратегии успешно решается методами экономического анализа, использующего математические модели исследования операций [13].

Одной из них является дифференциальная модель. Спрос и предложение — это экономические категории товарного производства, играющие ведущую роль в экономике. Спрос — потребность в товаре на рынке, а предложение — возможность поставки этого продукта. Закон спроса и предложения заключается в единстве спроса и предложения и их стремлении к выравниванию.

Рассмотрим ситуацию на рынке. Если в ближайшем будущем предполагается, что цена упадет, а затем повысится, то предложение будет сдерживаться, несмотря на издержки от аренды торгового места, хранения и рыночные услуги. При этом предложение товара в ближайшую неделю будет тем меньше, чем больше предполагается повышение цен в дальнейшем, и наоборот.

Разработаем математическую модель описанной ситуации, чтобы потом пользоваться ею для принятия решений, сколько надо «выкидывать» товара на продажу и когда это следует делать. Важным моментом здесь является проблема цены на товар. В условиях сбалансированного предложения и спроса ценообразование имеет свои законы, знание которых поможет правильно назначать цену на товар.

Экспериментально было доказано, что в зависимости от разных факторов спрос и предложение могут быть различными функциями цены и зависят от тенденции ее формирования. Спрос  $q$  и предложение  $s$  описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} q &= a_q \frac{dp}{dt} + b_q p + c_q, \\ s &= a_s \frac{dp}{dt} + b_s p + c_s, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где  $p$  — цена товара;  $a_q, b_q, c_q, a_s, b_s$  и  $c_s$  — коэффициенты. Из соответствия предложения спросу следует

$$a_q \frac{dp}{dt} + b_q p + c_q = a_s \frac{dp}{dt} + b_s p + c_s, \quad (2.22)$$

что приводит к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{b_q - b_s}{a_q - a_s} p = \frac{c_s - c_q}{a_q - a_s}. \quad (2.23)$$

Его решение

$$p = \left( 1 - \frac{c_s - c_q}{a_q - a_s} \right) \exp \left( - \frac{b_q - b_s}{a_q - a_s} t \right) + \frac{c_s - c_q}{a_q - a_s} \quad (2.24)$$

устанавливает изменение цены в случае сбалансированных спроса и предложения.

Рассмотрим конкретную ситуацию. Пусть коэффициенты  $aq$ ,  $bq$ ,  $cq$ ,  $as$ ,  $bs$ ,  $cs$  из маркетинговых исследований заданы следующим образом:

$$q = 8 \frac{dp}{dt} - 2p + 56, \quad s = 12 \frac{dp}{dt} + 2p - 40. \quad (2.25)$$

Решая (2.25) получим

$$p = (1 - 24)e^{-t} + 24 = -23e^{-t} + 24. \quad (2.26)$$

Таким образом, чтобы между спросом и предложением сохранялось равновесие, требуется изменять цену товара по закону (2.24).

На рис. 2.4 приведены возможные случаи повышения (а) и (б) и замораживания цен (в). Возможны варианты понижения цен.

Проанализируйте формулу (2.24) и сделайте выводы о возможных вариантах ценовой политики.

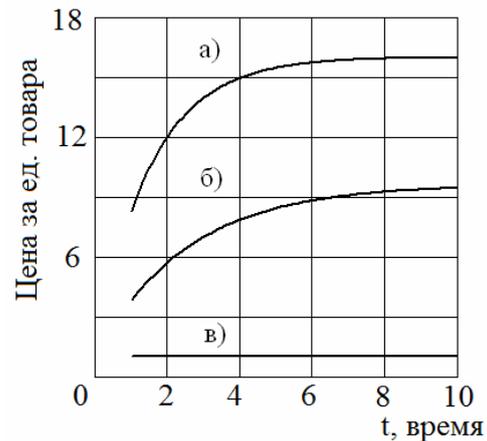


Рис. 2.4. Варианты повышения и замораживания цен

## 2.5. Имитационное моделирование случайных процессов

### 2.5.1. Методика имитационного моделирования

Аналитические методы анализа сложных систем обычно не позволяют учесть такие характерные особенности организационно-экономических механизмов, как наличие элементов непрерывного и дискретного действия, сложные нелинейные связи между элементами, воздействия многочисленных внешних случайных факторов. В связи с этим использование имитационного моделирования для количественного анализа и решения задач, не имеющих строгого аналитического описания, имеет определенный интерес.

Имитационная модель представляет собой общее логико-математическое описание системы, представленное в виде алгоритма для реализации на ЭВМ. Она позволяет адекватно описывать процессы, протекающие в системах без аппроксимации основных функциональных зависимостей и связей, необходимых для аналитических методов моделирования.

Перечислим некоторые преимущества имитационного моделирования перед традиционными методами. Здесь представляется возможность, не зная общих законов поведения системы, синтезировать модель

на основании данных о поведении ее элементов. Имитационное моделирование наиболее удачно отражает динамический характер поведения систем. Возможность дискретного моделирования в имитационных системах позволяет более эффективно отражать случайные, стохастические явления и процессы. Высокая адекватность имитационного моделирования следует из того, что сама структура имитационной модели близка к функциональной структуре моделируемой системы. В имитационном моделировании представляется возможность комплексного исследования альтернативного поведения системы с целью поиска оптимального управления, а статистический эксперимент в имитационном моделировании позволяет найти этот оптимальный вариант.

Модели имитации могут строиться как до, так и после реализации проекта системы с заданными параметрами. Для выявления адекватных вариантов имитация определяет наилучшие параметры моделируемой системы. После имитационного эксперимента имитационная модель служит для оценки эффективности функционирования моделируемой системы.

Процесс создания имитационной модели включает четыре последовательных этапа:

- определение проблемы и постановка задачи с указанием критериев и ограничений;

- модель системы в виде структурной схемы из элементов, отражающих исследуемые стороны;

- составление математической модели (алгоритмы и программы для имитации);

- отладка программ и проверка модели на адекватность.

Разберем более подробно перечисленные шаги разработки модели имитации. При формулировании проблемы, с одной стороны, следует как можно точнее отразить реальные процессы, а с другой — создать модель достаточно простую, чтобы иметь возможность численно реализовать ее на ЭВМ. В основу имитации закладывается математическая модель. Она же является и технической реализацией символьной модели в виде расчетной схемы или алгоритма и синтезируется из трех групп алгоритмов, в которых отражены:

- структура и функционирование элемента;

- алгоритм взаимодействия между элементами;

- алгоритмы, генерирующие воздействие случайных факторов на систему со стороны внешней среды;

- реакция системы на внешние воздействия.

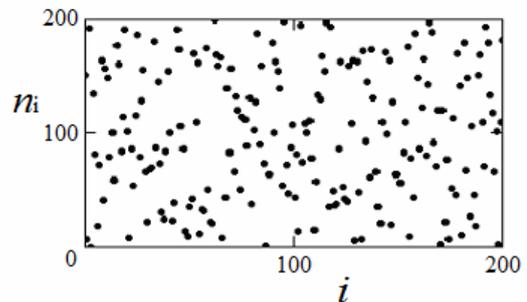
При этом имеется возможность практической реализации имитационной модели. Случайные факторы воздействия на систему моделируются с помощью метода Монте-Карло. Название этого метода связано с игровой

рулеткой, являющейся хорошим генератором случайных чисел с равномерным распределением. С помощью генератора случайных чисел, встроенного в ЭВМ, можно получать случайные числа с любым законом распределения. Остановимся более подробно на этом вопросе, так как адекватность имитационной модели зависит от статистических параметров распределения случайных величин, участвующих в имитации.

Технологический процесс производства строительных элементов и конструкций определяется строгими соотношениями между входными и выходными параметрами поточных линий. Однако на вход реальных производственных линий поступают отличные от требуемых параметры исходного материала или сырья. Эти отличия обусловлены неконтролируемыми факторами, имеющими случайную природу. Такой процесс неизбежен в реальном производстве. Каковы последствия или что можно ожидать от таких отклонений? Допустимы ли эти отклонения сразу по нескольким параметрам? Каков диапазон возможного «разброса» параметров? и т. д. Эти вопросы, носящие чисто практический характер, исследуются с помощью статистических имитационных моделей.

Для применения метода Монте-Карло используется генератор случайных чисел в виде выборки с равномерным распределением (рис. 2.5).

Рис. 2.5. Случайные числа с равновероятным распределением, полученные с помощью генератора псевдослучайных чисел



Однако равномерное распределение — это математическая идеализация, редко встречающаяся на практике. Реальное распределение (рис. 2.6), характерное для производственных процессов, моделирования, например колебаний покупательного спроса, величины урожая, среднемесячной температуры, отличается от равновероятного.

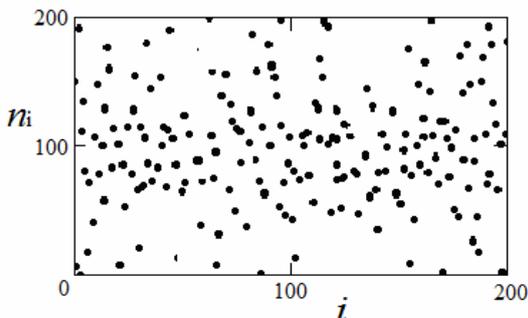


Рис. 2.6. Распределение случайных чисел в реальном процессе. Большие отклонения от среднего встречаются реже, чем малые

Существует много примеров демонстрации метода Монте-Карло при моделировании случайных процессов. В задаче о сбежавшем слоне, например, определяется вероятность того, что через некоторое время слон, сбежавший из зоопарка, может появиться в каком-либо обозначенном квартале города. С помощью ЭВМ эта задача легко решается и нет необходимости ставить натурные эксперименты со слонами.

### 2.5.2. Виды распределений

Любая имитационная модель использует генератор случайных чисел. Однако, как отмечалось выше, равномерное распределение не всегда подходит для моделирования реальных процессов. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся при имитационном стохастическом моделировании непрерывные распределения случайных величин.

**Нормальное распределение.** Применяется оно для моделирования случайных явлений, связанных с изменениями производственных параметров изготавливаемых строительных изделий, технологических погрешностей, параметров биологических объектов и т. п. Для определения характера поведения случайной величины вводят понятие плотности ее распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.27)$$

где  $x_0$  и  $\sigma$  — параметры распределения.

Величина  $\sigma$  характеризует величину разброса случайной величины. Если значение  $\sigma$  мало, то кривая высокая и заостренная, если велико — широкая и плоская (рис. 2.7). Площадь, заключенная между ординатами, проведенными на расстоянии  $3\sigma$ , составляет 99,7 % всех чисел. Это означает, что за пределами отклонения на  $3\sigma$  находится не более 0,27 % всех случайных величин. Это так называемое правило трех сигм весьма характерно для нормального распределения.

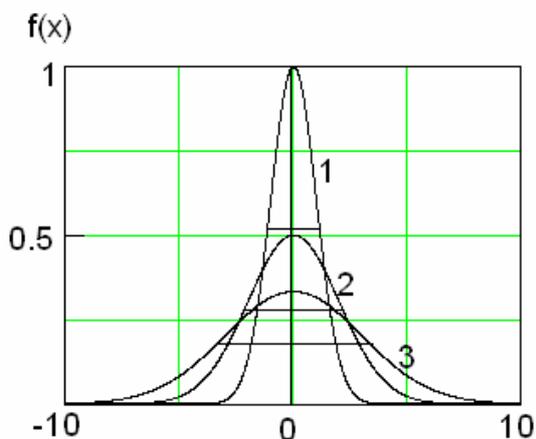


Рис. 2.7. Кривая плотности нормального распределения для трех значений  $\sigma$ : 1, 2 и 3;  $\sigma$  — полуширина кривой, т. е. расстояние от оси ординат до кривой на половине ее высоты

Нормальный закон распределения часто называют законом Гаусса. Этот закон играет важную роль и чаще используется на практике по сравнению с другими законами распределения.

Основная особенность этого закона распределения состоит в том, что он является предельным законом, к которому приближаются другие законы распределения. В теории надежности его используют для описания постепенных отказов, когда распределение времени безотказной работы в начале имеет низкую плотность, затем максимальную и далее плотность снижается. Распределение всегда подчиняется нормальному закону, если на изменение случайной величины оказывают влияние многие, примерно равнозначные факторы.

**Логарифмически нормальное распределение.** Нормальное распределение здесь имеет логарифм случайной величины, а функция распределения определяется формулой

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\ln(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.28)$$

Это распределение (рис. 2.8) используется для моделирования процессов выхода из строя оборудования, строительных сооружений и конструкций, формирования индексов цен, распределения доходов, распределения ультрамалых частиц по размерам и др. Логарифмически нормальное распределение нашло широкое применение в вопросах техники, биологии, экономики и теории надежности. Его успешно применяют для описания наработки до отказа строительного оборудования и механизмов.

Неотрицательная случайная величина распределена логарифмически нормально, если ее логарифм распределен нормально.

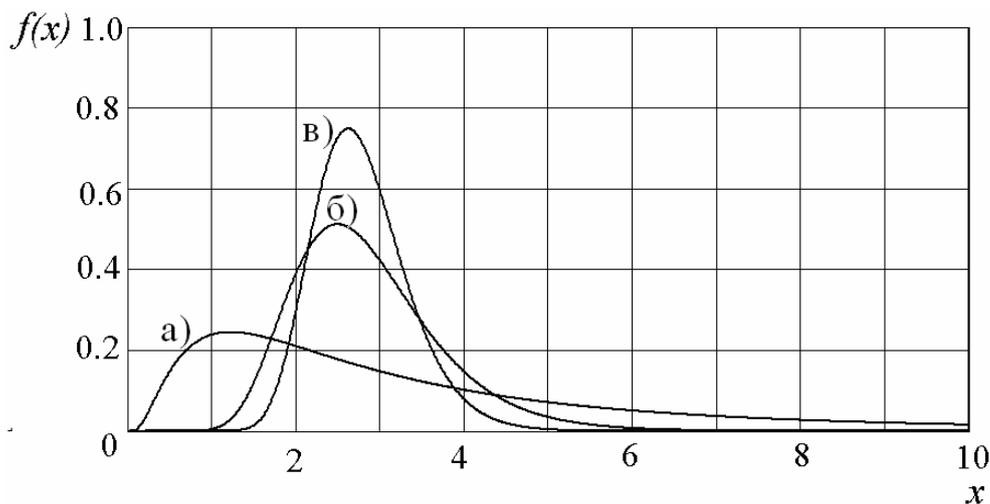


Рис. 2.8. Логнормальное распределение. Кривые для различных  $\sigma$ :  $a$  — 0,9;  $b$  — 0,3;  $v$  — 0,2 для одинаковых логарифмов средних значений  $x_0 = 1$

**Распределение Вейбула.** Специально разработанная модель для описания времени безотказной работы механизмов в теории надежности описывается распределением Вейбула. Плотность вероятности определяется формулой

$$f(x) = \alpha \lambda x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}. \quad (2.29)$$

Плотность распределения Вейбула для  $\lambda = 1$  приведена на рис. 2.9.

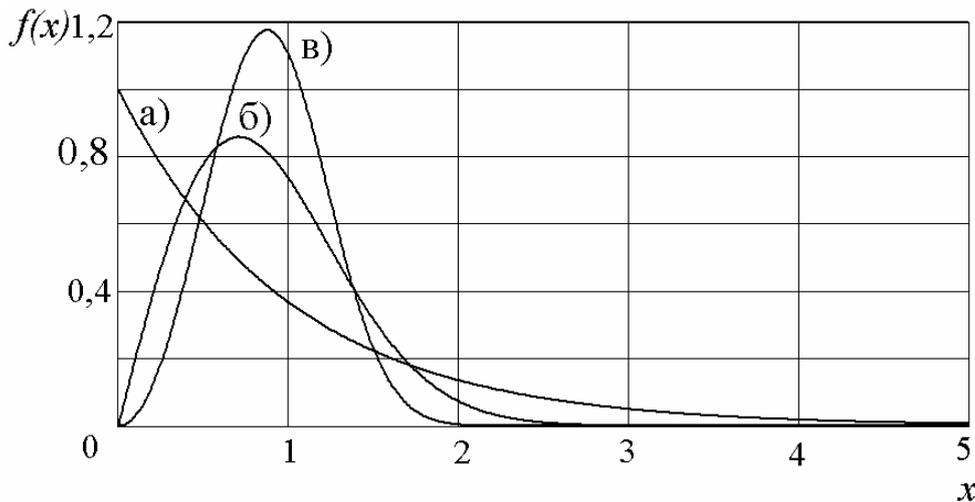


Рис. 2.9. Плотность распределения Вейбула для  $\lambda = 1$ : а —  $\alpha = 1$ ; б —  $\alpha = 2$ ; в —  $\alpha = 3$

Широкое применение закона распределения Вейбула объясняется тем, что этот закон, обобщая экспоненциальное распределение, содержит дополнительный параметр  $\alpha$ . Подбирая нужным образом параметры  $\alpha$  и  $\lambda$ , можно получить лучшее соответствие расчетных значений опытным данным по сравнению с экспоненциальным законом, который является однопараметрическим (параметр  $\lambda$ ).

Так, для строительных деталей, у которых имеются скрытые дефекты, но которые длительное время не стареют, опасность отказа имеет наибольшее значение в начальный период, а потом быстро падает. Функция надежности для такого изделия хорошо описывается законом Вейбула с параметром  $\alpha < 1$ . Наоборот, если изделие хорошо контролируется при изготовлении и почти не имеет скрытых дефектов, но подвергается быстрому старению, то функция надежности описывается законом Вейбула с параметром  $\alpha > 1$ . При  $\alpha = 3,3$  распределение Вейбула близко к нормальному. При оценке состояния строительных конструкций распределение Вейбула имеет большое значение. Однако для определения параметров  $\alpha$  и  $\lambda$  требуются значительные затраты на стендовые испытания и экспертные оценки.

## 2.6. Стохастические потоки

### 2.6.1. Виды стохастических потоков

Для составления математической модели имитации введем понятие потока событий как последовательности однотипных ситуаций, следующих друг за другом в какие-либо случайные моменты времени (например: поток отказов грузоподъемных механизмов, приход заявки на строительные материалы и т. п.) Сам поток вероятностью не обладает, но ей обладают составляющие его события. Если за время  $\Delta t$  наступает какое-либо событие из потока событий, то говорят о вероятности его наступления. Случайным событием может быть также появление двух или более событий в интервале  $\Delta t$ . Потоки по своим свойствам бывают регулярными, стационарными, потоки без последствий и ординарными.

**Регулярный поток** — поток, в котором события следуют один за другим через равные промежутки времени (техобслуживание бытовой техники, проведение консультаций в строительном сервисе).

**Стационарный поток** — это поток, у которого вероятность наступления событий не зависит от времени (имеется ввиду, что начало отсчета не влияет на протекание процесса во времени). Примером стационарного потока могут служить сообщения о выходе из строя оборудования в течение рабочего дня. Поступление заявок на предприятиях строительства не является стационарным.

**Потоки без последствий** наблюдаются, когда для двух временных интервалов  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  число событий, попадающих на интервал  $\Delta t_2$ , не зависит от того, сколько событий произошло в  $\Delta t_1$ .

**Ординарный поток** состоит из случайных событий, появляющихся поодиночке (появление автомобиля на переезде, приход заявки на сервер).

### 2.6.2. Одноканальная система с отказами.

#### Распределение Пуассона

Характеристики пуассоновского потока:

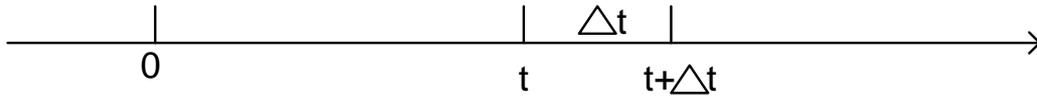
1) вероятность наступления того или иного числа событий за любой промежуток времени зависит только от длительности этого промежутка, а не от начала отсчета;

2) эта вероятность не зависит от того, сколько событий произошло в предыдущем испытании;

3) за малый промежуток времени наступает единственное событие.

Таким образом, число событий случайной величины  $X$ , поступающих за промежуток времени, определяется вероятностью  $p_m(t) = P(X = m)$  того, что к моменту  $t$  наступит ровно  $m$  событий.

Пусть  $P_0$  — вероятность отсутствия одиночного события. Тогда  $P_0(t)$  есть функция распределения этой случайной величины в пуассоновском потоке, обозначающая с какой вероятностью можно утверждать о том, что в момент  $t$  событие не наступит. Зададим некоторое малое приращение времени  $\Delta t$  и будем наблюдать за процессом.



Вероятность того, что за время  $t + \Delta t$  событие не наступит равна  $P_0(t + \Delta t) = P_0(t) P_0(\Delta t)$ , так как эти события взаимно независимы. Действительно, в момент времени  $t + \Delta t$  вероятность ненаступления события определяется вероятностью того, что оно не появилось в момент  $t$  и за  $\Delta t$  ему также не удалось реализоваться. Если же интенсивность потока равна  $\lambda$ , то вероятность непоявления события равна  $1 - \lambda \Delta t$ . Следовательно,  $P_0(t + \Delta t) = P_0(t) (1 - \lambda \Delta t)$ . Произведем преобразования:

$$\frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -\lambda P_0(t),$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = \frac{dP_0(t)}{dt},$$

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t).$$

Получено обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Получим его решение:

$$\frac{dP_0(t)}{P_0(t)} = -\lambda dt,$$

$$\int_1^{P_0(t)} \frac{dP_0(t)}{P_0(t)} = -\lambda \int_0^t dt,$$

$$\ln P_0(t) - \ln 1 = -(\lambda t - 0).$$

Окончательно

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.30)$$

Результатом явилась функция распределения некоторой случайной величины. При нахождении решения постоянные интегрирования были определены из начальных условий: начало наблюдений равно нулю и в этот момент событие не наступило, т. е.  $P_0(0) = 1$ . Полученное решение — ничто иное, как экспоненциальное распределение случайной величины в пуассоновском потоке. Если решать задачу об одновременном появлении нескольких событий, то формула (2.31) примет вид

$$P_m = \frac{(t\lambda)^m}{m!} e^{-\lambda t}, \quad (2.31)$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$

Распределение Пуассона (рис. 2.10) играет особую роль в теории массового обслуживания, поскольку оно описывает закономерность появления случайных отказов в сложных системах. Математическое ожидание и дисперсия случайной величины  $X$  для закона Пуассона равны параметру распределения  $\lambda$ :

$$M_x = D_x = \lambda.$$

Это распределение является *однопараметрическим* с параметром  $\lambda$  и применяется для описания событий, которые могут принимать два значения (свободно — занято, годное изделие — брак, успех — неудача, прогресс — регресс). Формула Пуассона описывает вероятность того, что за время наблюдения событие повторится  $m$  раз. В этой формуле  $\lambda$  — интенсивность потока, т. е. число событий в единицу времени.

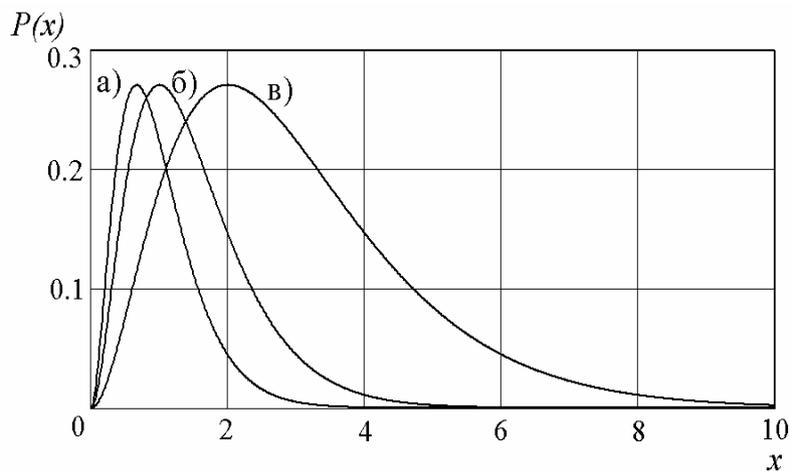


Рис. 2.10. Плотность распределения случайной величины для пуассоновского потока (2.30) при  $\lambda = 1$ :  
а —  $m = 1$ ; б —  $m = 2$ ; в —  $m = 3$

*Пуассоновский поток* стационарен, ординарен и не имеет последствий. Рассмотрим простейшую математическую модель, позволяющую получить решение в аналитическом виде. Поток случайных событий часто реализуется в системах массового обслуживания. Он представляет собой появление или отсутствие заявки на какой-либо вид услуг. Если процесс *марковский*, то это означает, что появление события в некоторый момент времени  $t_0$  не зависит от того, каким образом система пришла в состояние, предшествующее этому моменту времени  $t_0$ . Например, появление заявки на сервере жилищного обслуживания не зависит от того, как до этого приходили заказы. Вероятность того, что в момент времени  $t > t_0$  заявка

появится, зависит от  $S_0$  — состояния фирмы в момент  $t_0$ . Если в момент  $t_0$  заказов не было, то переход за время  $\Delta t$  после  $t_0$  будет зависеть только от вероятности появления заказа. Если в  $t_0$  заявка получена и обработана за период  $\Delta t$ , фирма перейдет в режим ожидания. Таким образом, для марковского процесса будущее зависит от прошлого только через настоящее. Если влиянием «предыстории» можно пренебречь, то такие процессы называются марковскими. Как правило, здесь мы имеем дело с дискретными состояниями ( $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ ) и непрерывным временем.

На практике широко распространено понятие *простейшего потока*, обладающего одновременно свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последействия. Интерес к нему вызван тем, что он относительно прост в формальном описании статистических характеристик, а также возможностью выразить в нем эффект взаимного наложения многих независимых произвольных потоков (тоже стационарных и ординарных).

Важный класс образуют *потоки Эрланга*, получаемые «прореживанием» простейших потоков, т. е. отбрасыванием некоторых событий как несостоявшихся. Если в простейшем потоке сохраняется каждое  $k$ -е событие (считая от условно «первого»), а остальные просто не учитываются, то возникает поток Эрланга  $k$ -го порядка ( $k = 1, 2, \dots$ ).

Рассмотрим простейшую модель массового обслуживания (СМО) — одноканальную систему с отказами:

система имеет один канал обслуживания;

поток заявок — стационарный с интенсивностью  $\lambda$ ;

время обслуживания есть случайная величина с возможными значениями, распределенная по показательному закону  $f(t) = \mu e^{-\mu t}$ , где  $\mu$  — интенсивность освобождений канала;

заявка, заставшая систему занятой, сразу же покидает ее (в этом случае говорят об отказе в обслуживании, а сама СМО называется системой с отказами).

Требуется найти пропускную способность СМО и вероятность того, что заявка, пришедшая в момент  $t$ , получит отказ.

Пусть состояние рассматриваемой СМО характеризуется занятостью (или незанятостью) единственного канала, так что при любом  $t > 0$  система оказывается либо в состоянии  $S_0$  (канал свободен), либо в состоянии  $S_1$  (канал занят). Переход из  $S_1$  в  $S_0$  осуществляется, как только очередное обслуживание завершится. Переход из  $S_0$  в  $S_1$  связан с появлением заявки и немедленным началом ее обслуживания.

На рис. 2.11 показан граф переходов для изучаемой СМО, определяющий все возможные их «направления». Это позволяет получить общую картину изменений, происходящих в системе (в данном случае все выглядит предельно просто).

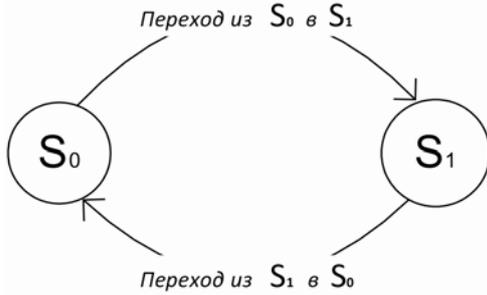


Рис. 2.11. Схема изменения состояний одноканальной системы обслуживания с отказами

При произвольно взятом  $t$  сам факт пребывания системы в состоянии  $S_0$  или  $S_1$  является случайным, поскольку нельзя точно предвидеть ни момента прихода заявки, ни завершения ее обслуживания. Допустим, что вероятности состояний  $S_0, S_1$  есть функции времени  $p_0(t)$  и  $p_1(t)$ .

Для их вычисления рассмотрим на оси времени две точки:  $t$  и  $t + \Delta t$ , где  $\Delta t$  — малая положительная величина. Чтобы в момент  $t + \Delta t$  система оказалась в состоянии  $S_0$  (вероятность этого есть  $p_0(t + \Delta t)$ ), достаточно либо появления  $S_0$  в момент  $t$  и отсутствия перехода в  $S_1$  за время  $\Delta t$  (обозначим это событие так:  $A_0^-$ ), либо появления  $S_1$  в момент  $t$  и наличия перехода в  $S_0$  за  $\Delta t$  (событие  $A_1^+$ ). Таким образом,  $p_0(t + \Delta t) = p(A_0^-) + p(A_1^+)$  и остается найти  $p(A_0^-)$ ,  $p(A_1^+)$ , имея в виду, что  $A_0^-$  и  $A_1^+$  являются сложными событиями. Очевидно, что

$$p(A_0^-) = p_0(t)(1 - \lambda\Delta t), \quad (2.32)$$

$$p(A_1^+) = p_1(t)\mu\Delta t,$$

где  $\lambda\Delta t$  — вероятность прихода заявки за промежуток  $\Delta t$ ,  $\lambda\Delta t$  — вероятность освобождения СМО в течение  $\Delta t$ , если до этого осуществлялось обслуживание. Оценки справедливы только для малых  $\Delta t$  и следуют из формул, определяющих вероятность одного события за время  $\Delta t$  в потоке заявок и «потоке освобождений», обладающем одинаковыми свойствами.

Подставив выражения для  $p(A_0^-)$  и  $p(A_1^+)$  в формулу для  $p_0(t + \Delta t)$ , получим

$$[p_0(t + \Delta t) - p_0(t)] / \Delta t = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t)$$

или (переходя к пределу при  $\Delta t \rightarrow 0$  в левой части):

$$dp_0/dt = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t).$$

Заметим, что  $p_0(t) + p_1(t) = 1$  (система обязательно находится в каком-то из двух возможных состояний  $S_0, S_1$ ) и получим дифференциальное уравнение

$$dp_0(t)/dt = \mu x - (\lambda + \mu)p_0(t),$$

интегрировать которое следует при естественных начальных условиях  $p_0(0) = 1, p_1(0) = 0$  (в начальный момент  $t = 0$  система свободна). Решая это обыкновенное дифференциальное уравнение с указанными начальными условиями (задача Коши), получим

$$p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t},$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}).$$
(2.33)

Графики зависимости  $p_0, p_1$  от времени приведены на рис. 2.12. Легко заметить, что с ростом  $t$  вероятности  $p_0, p_1$  стремятся к пределам  $\bar{p}_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$  и  $\bar{p}_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$  (установившийся режим работы системы обслуживания).

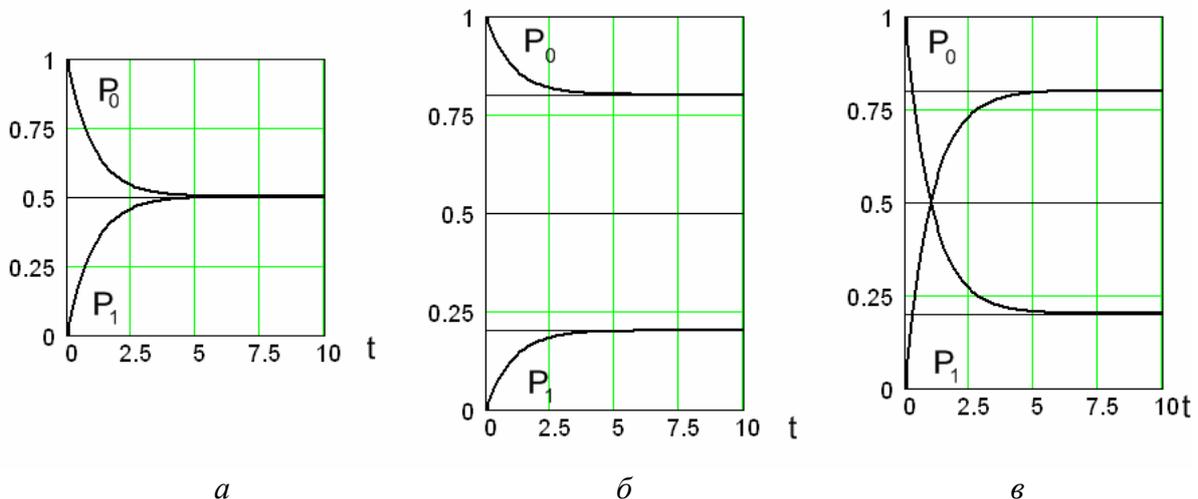


Рис. 2.12. Временные зависимости состояний одноканальной системы с отказами для различных значений  $\lambda$  и  $\mu$ : *a* —  $\lambda = \mu$ ; *б* —  $\lambda < \mu$ ; *в* —  $\lambda > \mu$

Обращаясь к оценкам пропускной способности и вероятности отказа, можно утверждать следующее: заявка, пришедшая в момент  $t$ , не будет обслужена (получит отказ), если система окажется занятой ( $S_1$ ) и вероятность этого события есть  $p_1(t)$ . Для любого  $t$  средняя величина отношения числа обслуженных заявок к общему их числу равна  $p_0(t)$  (относительная пропускная способность), а полное количество обслуживаний в единицу времени есть  $q = \lambda p_0(t)$  (абсолютная пропускная способность).

Таким образом, основные характеристики рассмотренной модели СМО меняются, вообще говоря, во времени, но стремятся к некоторым установившимся значениям, зависящим от  $\lambda$  и  $\mu$ :

$$1. \text{ Абсолютная пропускная способность } q_{\text{абс}} = \frac{\lambda\mu}{\lambda + \mu}.$$

$$2. \text{ Относительная пропускная способность } q_{\text{отн}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

$$3. \text{ Вероятность отказа } p_{\text{отк}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

Анализ этих формул позволяет сделать выводы, отражающие в целом специфику взаимодействия СМО с потоком поступающих заявок:

1. Потоки, интенсивность которых значительно превосходит возможности системы  $\lambda \gg \mu$ , ставят ее в трудное положение — вероятность отказа  $\frac{\lambda}{\lambda + \mu}$  стремится к 1, а относительная пропускная способность  $\frac{\mu}{\lambda + \mu}$  падает до 0.

2. С потоками сравнительно малой интенсивности  $\lambda \ll \mu$  система справляется довольно легко  $p_{\text{отк}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \rightarrow 0$ ,  $q_{\text{отн}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \rightarrow 1$ ,

$q_{\text{абс}} = \frac{\lambda\mu}{\lambda + \mu} \rightarrow \lambda$ , хотя опасность отказов в обслуживании не исключается полностью.

Нельзя указать какие-либо предпочтительные соотношения между  $\lambda$  и  $\mu$ , которые позволили бы оптимизировать систему в обычном понимании этого слова  $q_{\text{абс}}$ ,  $q_{\text{отн}}$ ,  $p_{\text{отк}}$  как функции  $\lambda$  и  $\mu$  меняются монотонно, и такая система массового обслуживания тем лучше, чем больше  $\mu$  превосходит  $\lambda$ . Выбор приемлемых значений  $\mu$  при том или ином  $\lambda = \text{const}$  можно осуществить, задав «разумные пределы» увеличения  $q_{\text{отн}}$  или уменьшения  $p_{\text{отк}}$ . Например, требование  $p_{\text{отк}} > 0,1$  выполняется при  $\mu > 9\lambda$ , для достижения  $q_{\text{отн}} > 0,8$  нужно иметь  $\mu > 4\lambda$  и т. д. Сказанное выше хорошо согласуется с общими представлениями о характере реакций системы на воздействия в виде приходящих заявок и оправдывает изучение простейших моделей, однако необходимость поиска более общих закономерностей, расширяющих сферу приложений теории, сохраняется.

Следует заметить здесь эффективность имитационного моделирования. Несмотря на полученные аналитические выражения, с помощью генератора случайных чисел, подчиненных пуассоновским потокам, можно создавать модели имитации поступления и реализации заявок в реальном времени, осуществляя, тем самым, управление процессами выполнения заказов в строительных организациях и коммунальных фирмах.

### 2.6.3. Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло имитации успешно используется для моделирования процессов с учетом факторов случайности как внутри системы, так и от воздействий со стороны внешней среды. Выход из строя элементов сложных устройств, природные катаклизмы, экономическая неустойчивость, потоки информации, массовое обслуживание могут быть предметом имитационного моделирования. В системном анализе имитация применяется как один из способов реализации математической модели функционирования систем.

Рассмотрим теперь такую задачу. Пусть мы изучаем некоторый неуправляемый динамический процесс, зависящий от случайного вектора  $\xi$  с некоторым законом распределения вероятностей. Сам процесс описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, \xi). \quad (2.34)$$

Это уравнение описывает множество траекторий поведения системы. Пусть начальное состояние фиксировано:  $x(0) = x_0$ . Как определить среднее значение компонент вектора  $x(t)$  в момент  $t = T$ ? Используем генератор случайных чисел. Подставляя эти значения в уравнение (2.34), получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f(x_1, t_1, \xi_1), \\ \frac{dx_2}{dt} &= f(x_2, t_2, \xi_2). \end{aligned} \quad (2.35)$$

Решая эти уравнения, получим среднее значение  $x(T) = 1/N \sum x_n(t)$ , где  $N$  — число испытаний за время  $T$ . Такой прием машинного эксперимента является имитационной моделью. Во время имитации ЭВМ превращается в экспериментальную установку. Имитационный эксперимент для изучения конкретного процесса — это, по существу, «вариантный метод». Задавая неизвестным величинам или функциям те или иные значения, с помощью таких имитаций можно определить характеристики системы. Сопоставляя их с натурными наблюдениями, при необходимости можно изменить их значения и поставить новый эксперимент. Использование вариантов расчетов и имитационного эксперимента дает исследователю надежное средство оптимизации управления в различных отраслях промышленного производства и в строительстве.

Любое исследование — это своеобразный диалог. Исследователь задает вопрос природе. Для этого он ставит эксперимент. После анализа результатов он задает следующий вопрос, для этого видоизменяет опыт и т. д.

Машинный эксперимент выполняет аналогичный сценарий. Современные компьютеры с высоким быстродействием и возможностью диалога позволяют оперативно получать данные о сложной системе, исследовать характеристики ее объектов, динамику, делать прогнозы. Реализация новых возможностей компьютерных технологий потребовала пересмотра установившихся взглядов на использование программного математического обеспечения. Оказалось, что для эффективного использования идеи имитации сложных процессов системы моделей должны быть специальным образом организованы, т. е. должна быть создана специальная управляющая программа (ее иногда называют внешней операторной системой). По-новому стала выглядеть проблема применения языков программирования. Имитация дает возможность использовать опыт специалиста, который, как правило, не является математиком или программистом. Так постепенно возникло представление об имитационной системе как о совокупности моделей для осуществления диалога и процедур практического использования. Последнее очень важно. Исследователю-экономисту, аналитику или конструктору необходимо иметь достаточно канонизированную систему процедур, которая помогала бы ему найти наиболее простой путь к достижению цели.

Эта система процедур должна быть руководством для исследователя-экономиста или конструктора. В системном анализе имитационные системы все в большей степени изменяют традиционное представление об ЭВМ и становятся основой моделирования стохастических процессов в строительной экономике, социологии и других областях.

#### **2.6.4. Пример принятия решений с помощью имитационного эксперимента**

Фирма по поставке оборудования для канализации, водоснабжения и отопления осуществляет проектирование, монтаж системы канализации, очистных сооружений, а также пусконаладочные работы. Для оптимизации функционирования фирме требуется определить количество установок, необходимых для очистки канализационных вод небольшого коттеджного поселка. Требуется выполнять очистку  $200 \text{ м}^3$  канализационной воды в сутки. Если будет очищено от 190 до  $200 \text{ м}^3$ , это приведет к незначительным загрязнениям окружающей среды. Если количество очищенной воды будет от 175 до  $190 \text{ м}^3$ , то загрязнения превысят допустимую норму. Если будет очищено менее  $175 \text{ м}^3$ , то фирма будет привлечена к административным санкциям. Требуется найти минимально необходимое количество очистных установок, обеспечивающее риск не выше допустимого уровня.

1. Будем считать, что очистка воды в объеме от 190 до  $200 \text{ м}^3$  соответствует зоне допустимого риска; очистка от 175 до  $190 \text{ м}^3$  — зоне критического;

менее  $175 \text{ м}^3$  — катастрофического. Допустимость риска оценивается по правилам: вероятность допустимой неопределенности — не более одной десятой, критической — не более одной сотой и катастрофической — не более одной тысячной. Для подсчета необходимого количества установок используем алгоритм имитации.

Исходный код программы на С#:

```
for (int i = 1; i <= max; i++) // Число установок.
{z = 0; // Количество результатов испытания.
for (int j = 1; j <= 10000; j++) //Для 10 000 суток
{s = 0; //Объем очищенной воды всеми установками.
for (int k = 1; k <= i; k++) //Для каждой установки
s += rnd.Next (15, 80);} //рассчитываем
if (s < neobh) z++; } //Считаем положительные результаты
ver[i-1] = z/10000; } //Вероятность обработки воды менее 200 тонн.
//Оптимальное решение
for (int i = 0; i < max; i ++ ) if (ver[i] <= 0.05) { top = i; break; }
```

Результаты работы модели отображены на рис. 2.13.

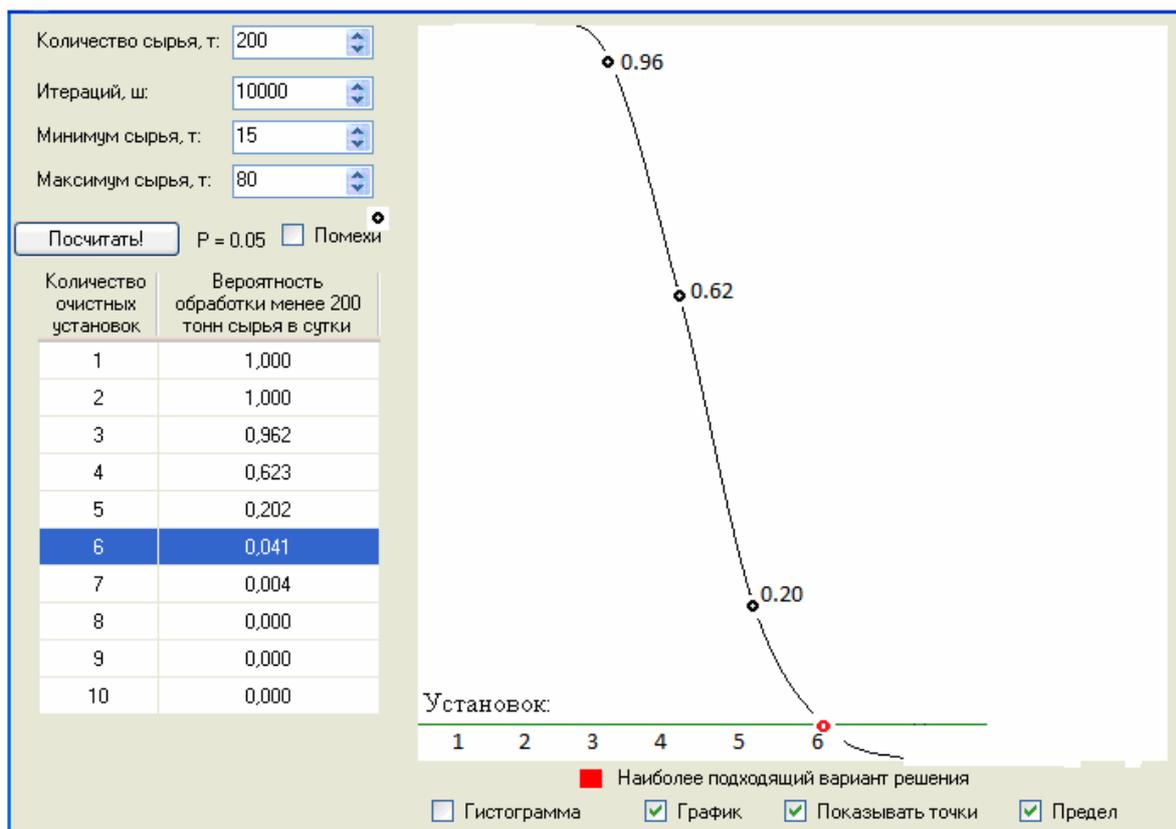


Рис. 2.13. Графическая иллюстрация имитации очистки воды различным числом очистных установок

Результаты имитации приведены в табл. 2.1.

*Данные компьютерного эксперимента*

Количество очистных установок	Вероятность обработки		
	от 190 до 200 м <sup>3</sup> (допустимый риск)	от 175 до 190 м <sup>3</sup> (критический риск)	менее 175 м <sup>3</sup> (катастрофический риск)
1	0,000	0,000	1,000
2	0,000	0,000	1,000
3	0,035	0,092	0,833
4	0,096	0,152	0,352
5	0,058	0,068	0,072
6	0,012	0,011	0,008
7	0,002	0,001	0,000
8	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000

Как видно из результатов моделирования, предприятию следует использовать семь очистных установок. В этом случае вероятность допустимого риска составит 0,002 (т. е. менее 0,1), вероятность критического — 0,001 (менее 0,01), вероятность катастрофического риска практически равна нулю (т. е. менее 0,001).

## **2.7. Структурные модели в управлении строительством**

### **2.7.1. Построение структурной модели**

Переход от вербального описания любой проблемы к математическому затруднен не только сложностью задачи. Иногда это обусловлено недостатком информации о моделируемом объекте или отсутствием соответствующего математического аппарата. В связи с этим возникает необходимость «расчлениить» сложную задачу на более простые. Для этого используют методы структурного исследования, позволяющие упростить ситуацию за счет изучения свойств отдельных элементов и связей между ними.

Чтобы осуществить подобное разбиение, следует получить как можно больше информации о моделируемой системе. Затем строится многоуровневая иерархическая структура элементов системы, участвующих в моделировании. Строятся также структурные схемы подсистем, решающих только определенную проблему. Эти схемы имеют простые графические образы, что делает анализируемые объекты более понятными. Здесь важно заметить, что в целом у модели системы возникают новые свойства, которыми не обладает каждый элемент в отдельности. При постановке

вычислительного эксперимента это необходимо учитывать, так как возникают все новые и новые качества системы, а это может пригодиться в ее практическом использовании.

Система как совокупность элементов, выделенных из среды и взаимодействующих с окружающей средой, как целое при достижении поставленной цели — более приемлемое определение для задач строительства. Понятие «среда» вводится для того, чтобы учесть взаимодействие с ней, реагировать на нее и за счет обратных связей — адаптироваться. При изменении спроса на какой-либо жилищный проект строительные фирмы перестраивают свою деятельность. Важным для моделирования является возможность определения взаимодействия строительной системы с окружением независимо от поведения составляющих ее элементов.

ЛПР сам выделяет систему из среды в зависимости от поставленной задачи. При этом он относит себя или к среде или к самой системе. Если ставится задача об общем характере функционирования системы, то исследователь располагается во внешней среде; для внутрисистемных задач — рядом с элементами системы. Таким образом, вычислительный эксперимент ставится в зависимости от исходной позиции исследователя. Эта условность помогает увеличить адекватность построения иерархической структуры системы. Если нет никаких данных о внутреннем строении системы, то используется модель «черный ящик». Созданная иерархия должна обладать внешней целостностью, хорошо описываемой моделью «черного ящика», и внутренней, связанной с моделью структуры системы, т. е. установления отношений между ее элементами.

В такой модели задаются только входные и выходные параметры (рис. 2.14).

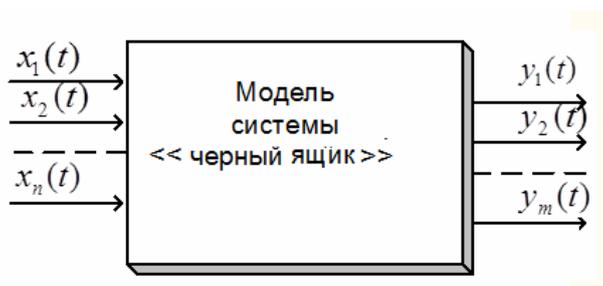


Рис. 2.14. Модель «черного ящика»

Модель черного ящика используется на самых ранних этапах исследования. Для изучения внутренних связей в системе требуются более детальные модели. Структурная модель состава системы описывает, из каких элементов она состоит, и как они дополняют друг друга, образуя подсистемы. Например, если некоторое предприятие жилищного строительства есть система, то подсистемой можно считать цех сборки панельных квартир, а элементами — комплектующие.

Трудность составления моделей состава определяется многовариантностью возможных построений, так как понятие «элементарный» можно определять по-разному. Разбиение целого на части относительно. Например, тормозную систему автомобиля можно отнести как к ходовой части, так и к подсистеме управления автомобилем. Модели состава системы не достаточно полно описывают систему. Необходимо установить связи между отдельными элементами.

Если в модели задаются связи между элементами, и этих связей достаточно для достижения целей, то такие модели называются структурными моделями. При составлении таких моделей важным является выбор наиболее сильных связей. При моделировании, например, доставки строительной продукции вряд ли стоит вдаваться в детали о том, как эта продукция производится. Модель бизнес-процесса, наоборот, детализирует все этапы технологического процесса без подробностей о реализации, если последняя не входит в него как составной элемент структуры. При моделировании переходных процессов в электрических цепях с участием колебательных контуров можно не учитывать изменение их параметров от вариации температуры, приводящей к изменению активного сопротивления. Вместе с тем это может не подойти для резонансных контуров с узкой полосой пропускания. В коллективе предприятия можно не учитывать влияния физического окружения на производительность труда, чего нельзя сказать про зарплату.

Структурная модель — это абстракция, так как рассматривает только отношения между элементами, а не сами элементы. Вместе с тем эти модели можно использовать, если отношения заданы в виде формулы или уравнения. Объединив все типы моделей, можно получить более полное описание систем строительства на математическом языке. Отметим, что структурное моделирование безотносительно к предмету, содержанию системы. Это позволяет рассматривать модель как формальный математический объект и исследовать его свойства.

### **2.7.2. Примеры структурных моделей**

Структурное моделирование позволяет описывать поведение довольно сложных систем, встречающихся в строительстве. В ряде случаев такое моделирование становится просто необходимым из-за сложности производственной деятельности. Графовые модели с установленными в дугах отношениях могут быть реализованы различными способами. Пространственные структуры обычно описывают графы для визуального представления в пространстве элементов системы, где они расположены и какие связи реализованы между ними. Вершины указывают, например, мастерские по ремонту с различными производственными задачами (кровля, фасад, внутренние жилые помещения и т. д., а дуги — расстояния между ними).

**Пример 2.1.** Ригель состоит из двух элементов, каждый из которых в любой случайный момент времени может выйти из строя. Как только это произойдет, начнется его ремонт, который продолжится неизвестное заранее время. Состояния элементов  $S_i$  определяют состояние системы в целом. Граф как модель структуры показан на рис. 2.15.

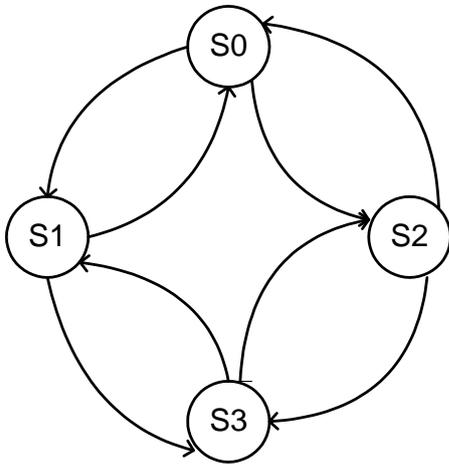


Рис. 2.15. Структурная модель функционирования ригеля:  $S_0$  — оба элемента исправны;  $S_1$  — первый ремонтируется, второй исправен;  $S_2$  — второй ремонтируется, первый исправен;  $S_3$  — оба элемента вышли из строя и ремонтируются

Примером пространственной структурной модели может быть структурная схема водопроводной сети населенного пункта, где вершины — населенные пункты, а дуги — расстояния с указанием диаметра труб. Аналогичные модели используются в сервисе информационных услуг локальных корпоративных систем. Задача об оптимальном расположении серверов и провайдеров не может быть решена без построения пространственной структурной модели.

Одной из главных задач системы сервисных услуг — размещение пунктов обслуживания в сети обслуживания. Задача оптимизационная и включает в себя поиск наилучшей схемы размещения с учетом материальных затрат и времени, ограничивающих области месторасположений объектов обслуживания. Строительные фирмы должны оптимально использовать материалы и оборудование, делая их доступными как можно большей группе потребителей.

Одним из методов решения этой задачи является *метод центра притяжения*. Это математический метод, определяющий оптимальное размещение центра, обслуживающего клиентов, сконцентрированных в некоторых пунктах с различным числом заявок в единицу времени.

**Пример 2.2.** Рассмотрим пример использования метода центра притяжения, определяющий оптимальное размещение центрального склада строительных материалов, для клиентов, расположенных в различных административных районах города с числом заявок в год, указанных в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Данные о заявках и местоположении районов

Районы	Заявки	$x_i$	$y_i$
Кировский	245	8	38
Ворошиловский	180	35	42
Центральный	160	25	32
Дзержинский	200	18	12

Идея метода притяжения состоит в том, что вычисляется центр тяжести локальных пунктов с массой, пропорциональной их заказам. Согласно этому предположению имеем

$$X_c = \frac{\sum_i x_i N_i}{\sum_i N_i},$$

$$Y_c = \frac{\sum_i y_i N_i}{\sum_i N_i},$$
(2.36)

$$X_c = 20,2; Y_c = 31,1.$$

Пространственная структурная модель и ее результаты моделирования представлены на рис. 2.16, 2.17.

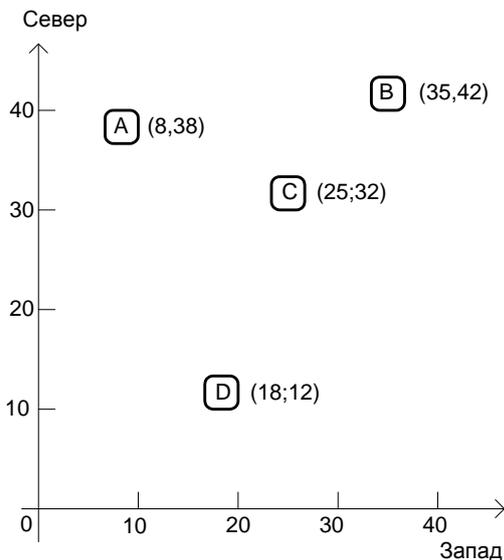


Рис. 2.16. Пространственная структурная модель

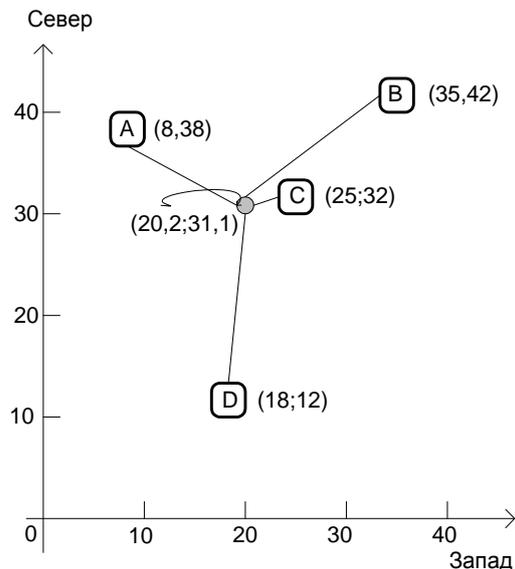


Рис. 2.17. Результат моделирования пространственной структуры

**Пример 2.3.** Структурные модели, демонстрирующие процессы во времени, называются временными моделями и используются в календарном планировании. Дугами в таких моделях являются переходы системы из одного состояния в другое. Применяются сетевые графики и графы состояний системы обслуживания, в которых вершины — действия (рис. 2.18).

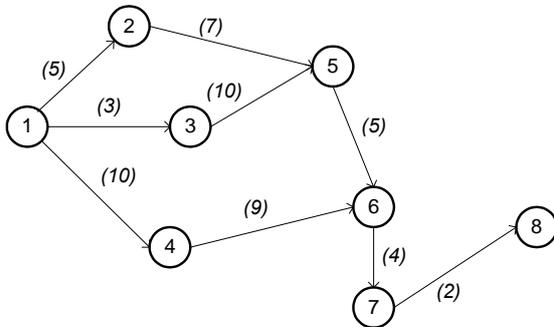


Рис. 2.18. Сетевой график в виде пространственной структуры. Каждая работа обеспечивает однозначную связь между двумя вершинами-событиями

На рис. 2.18 узлы-события (состояния) имеют последовательную нумерацию, что дает возможность определить работу через соединяемые события. Такие структурные модели в сетевых графиках называются узел-работа, т. е. сначала состояние, затем работа и далее — новое состояние. Продолжительность работ задается в модели числами на дугах, а их формальные названия определяются парой, состоящей из двух цифр: номеров начального и конечного состояния. Например, работа между третьим и пятым состояниями обозначается как (3,5), а ее продолжительность указывается на графе модели.

Рассмотрим основные параметры структурной модели сетевого графика. Ранним сроком начала работ ( $T_i^p$ ) называют наименьшее допустимое время, когда работа может быть начата. Начало проекта фиксируется временем  $t = 0$ ,  $t_{ij}$  — заданная продолжительность работ между  $i$ - и  $j$ -м событиями. Величины  $t_{ij}$  записывают на соответствующих дугах пространственной модели, представляющей собой сетевой граф.

Алгоритм расчета ранних сроков начала работ следующий. Полагают  $T_1^p = 0$  и для  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  вычисляют значения  $T_i^p = \max(T_k^p + t_{ki})$  на множестве дуг, предшествующих рассматриваемой. Вычисления производят до тех пор, пока не дойдут до последней вершины. Поздний срок начала работы  $T_i^n$  — допустимое время окончания работы без нарушения срока завершения всего проекта. Алгоритм вычисления:

1. Полагают,  $T_n^n = T_{кр}$ , где  $T_{кр}$  — критический путь, определяемый как ранний срок наступления последнего события (завершение проекта).

2. Для  $I = n - 1, n - 2, n - 3, \dots, 2, 1$  вычисляют  $T_i^n = \min(T_k^n - t_{ki})$ , т. е. рассматривают все соседние вершины, начиная от конца и продвигаясь к началу, пока не достигнут первой вершины.

Реализуем алгоритм нахождения ранних сроков начал и окончаний работ для сетевой модели, изображенной на рис. 2.18. Для первой вершины имеем  $T_1^p = 0$ .

Рассмотрим вершину под номером 2. По формуле  $T_i^p = \max(T_k^p + t_{ki})$  имеем  $T_2^p = \max(T_1^p + t_{21}) = \max(0 + 5) = 5, k = 1$ .

Таким образом ранний срок начала второй работы связан с первой и равен 5. Для третьей вершины получим:

$$T_3^p = \max(T_1^p + t_{31}) = \max(0 + 3) = 3.$$

Для четвертой:

$$T_4^p = \max(T_1^p + t_{41}) = \max(0 + 10) = 10.$$

Для пятой получим:

$$T_5^p = \max(T_2^p + t_{25}; T_3^p + t_{35}) = \max(5 + 7; 3 + 10) = 13, k = 3.$$

Аналогично

$$T_6^p = \max(T_5^p + t_{56}; T_4^p + t_{46}) = \max(13 + 5; 10 + 9) = 19, k = 4;$$

$$T_7^p = \max(T_6^p + t_{67}) = \max(19 + 4) = 23, k = 6;$$

$$T_8^p = \max(T_7^p + t_{78}) = \max(23 + 2) = 25, k = 7.$$

Вычислим поздние сроки начал работ. Для последней вершины имеем время критического пути, равное  $T_8^n = T_{кр} = 25$ . Для вершины 7 вычислим позднее время начала седьмой работы и далее по формулам

$$T_7^n = \min(T_8^n - t_{78}) = 25 - 2 = 23, T_6^n = \min(T_7^n - t_{67}) = 23 - 4 = 19;$$

$$T_5^n = \min(T_6^n - t_{56}) = 19 - 5 = 14, T_4^n = \min(T_6^n - t_{46}) = 19 - 9 = 10;$$

$$T_3^n = \min(T_5^n - t_{35}) = 14 - 10 = 4, T_2^n = \min(T_5^n - t_{25}) = 14 - 7 = 7.$$

Если  $T_i^p = T_i^n$ , то это означает, что  $i$ -е событие находится на критическом пути. Если  $T_i^p < T_i^n$ , то у  $i$ -го события имеется резерв времени  $R_i = T_i^n - T_i^p$ . Для нулевого резерва нет времени на задержку работ и такие работы находятся на критическом пути (табл. 2.3).

Таким образом, в нашей задаче на критическом пути расположены вершины 1, 4, 6, 7, 8. Таким образом, для составления структурной модели технологического процесса требуется задать:

- 1) перечень всех операций проекта;
- 2) время, необходимое для выполнения каждой операции;
- 3) перечни предшествующих операций.

*Результаты структурного моделирования технологического процесса*

Вершины	$T_i^p$	$T_i^n$	Резерв времени
1	0	0	0
2	5	7	2
3	3	4	1
4	10	10	0
5	13	14	1
6	19	19	0
7	23	23	0
8	25	25	0

С каждым годом компьютерные технологии все чаще становятся эффективным средством решения многочисленных строительных задач. Управление строительными проектами является искусством планирования и управления различными процессами, обладающими индивидуальными особенностями, в условиях ограниченных ресурсов, времени и затрат.

Под проектом будем понимать любую деятельность, направленную на достижение поставленных целей строительной фирмы с максимальной возможной эффективностью при известных ограничениях по времени, ресурсам и затратам (строительство коттеджа, модернизация оборудования, реконструкция промышленного предприятия, проведение исследования состояния зданий, проектирование информационных систем строительной корпорации, открытие строительного бизнеса).

Для облегчения процесса управления проектами разработаны и продолжают разрабатываться и модернизироваться множество самых разнообразных методов, подходов и систем управления, например, такого как MS Project 2003 (см. прил. 3).

Эта система, как и множество других, обеспечивает возможность представления любого процесса как производственного, так и непроизводственного в виде логической последовательности определенных задач с учетом их взаимосвязей. Это позволяет ЛПП проводить наглядный анализ состава работ и оптимизировать порядок выполнения комплекса задач строительства, а также объективно оценить работу исполнителей и выработать дополнительные мероприятия по повышению эффективности строительного производства. Все это должно быть определенным образом организовано, спланировано, проконтролировано с минимальными затратами средств и времени при наличии различных ограничений.

Рассмотрим конкретный пример использования сетевого моделирования в реализации строительного проекта. Вначале применим рассмотренные расчеты для задачи строительства коттеджа, а затем продемонстрируем автоматизированную реализацию этого проекта с использованием ре-

шения MS Project 2003. В общем случае для корпоративного управления проектами можно организовать процесс управления таким образом, что будут минимизированы простои оборудования и потери, связанные с его арендой и амортизацией.

Строительная фирма-подрядчик пытается составить план работ, связанных со строительством дома по заказу. Для этого ему необходимо определить критический путь и дать рекомендации по сокращению сроков сдачи объекта. В табл. 2.4 приводятся данные о последовательности работ, отношениях предшествования и продолжительности работ.

Таблица 2.4

*Список работ и последовательность их выполнения*

Номер работы	Описание работ	Предшествующие работы	Продолжительность работы, сутки
0	Начало	—	0
1	Рытье котлована и заливка основания	0	4
2	Заливка бетоном фундамента	1	2
3	Сооружение деревянного каркаса	2	4
4	Кирпичная кладка	3	6
5	Канализация и водопровод в подвале	2	1
6	Заливка пола подвального помещения	5	2
7	Установка водопроводных труб	5	3
8	Прокладка проводов	3	2
9	Установка отопления и вентиляции	3, 6	4
10	Штукатурные работы	8, 9, 7	10
11	Устройство покрытия пола	10	3
12	Установка кухонной аппаратуры	11	1
13	Завершение слесарно-водопроводных работ	11	2
14	Завершение плотницких работ	11	3
15	Кровельные работы, гидроизоляция	4	3
16	Крепление водопроводных труб и желобов	15	1
17	Кладка коллектора ливневых вод	2	1
18	Циклевка и покраска полов лаком	14, 19	2
19	Покраска	12, 13	3
20	Завершение монтажа электрооборудования	19	1
21	Земляные работы	16, 17	2
22	Благоустройство территории	21	5
23	Окончание	18, 20, 22	—

Задачу решим с помощью средств MS Project 2003, используя МКП (метод критического пути).

В разделе «Определение проекта» выполним «Ввод сведений о проекте» — введем дату начала проекта, для совместной работы выберем MS Project Web Access и введем имя нового проекта — «Строительство дома». В пункте «Ввод задач проекта» введем список задач, требуемых при выполнении проекта. Для этого необходимо выполнить ряд операций: рытье котлована и заливка основания; заливка бетоном фундамента; сооружение деревянного каркаса; кирпичная кладка; канализация и водопровод в подвале и т. д. Далее (см. прил. 3) выполним процедуры построения диаграммы Ганта (рис. 2.19, 2.20).

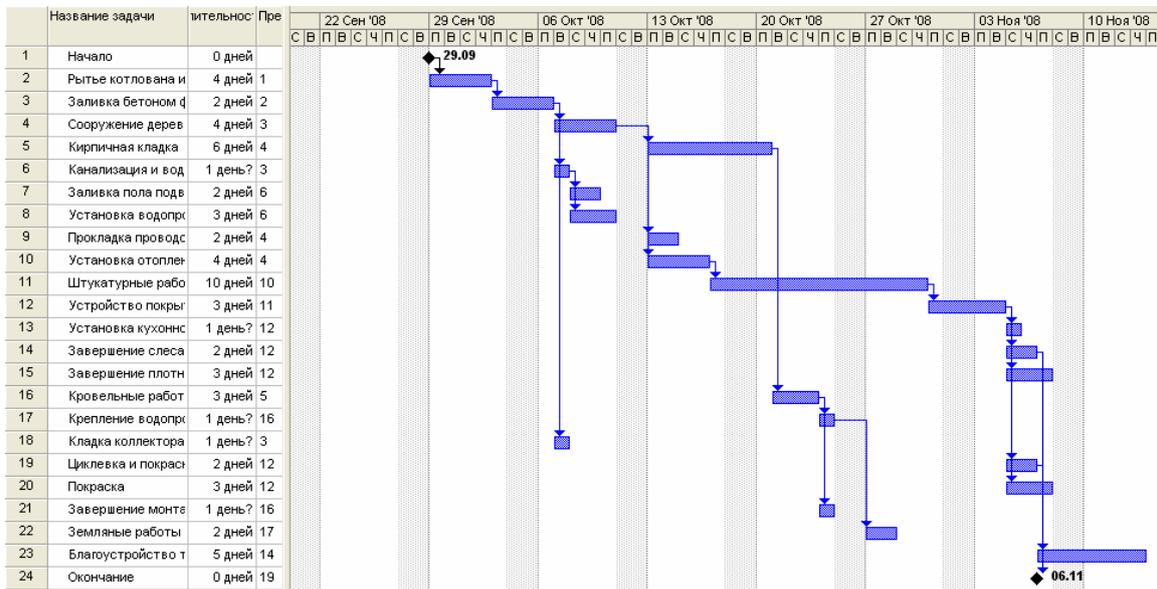


Рис. 2.19. Диаграмма Ганта для проекта строительства дома

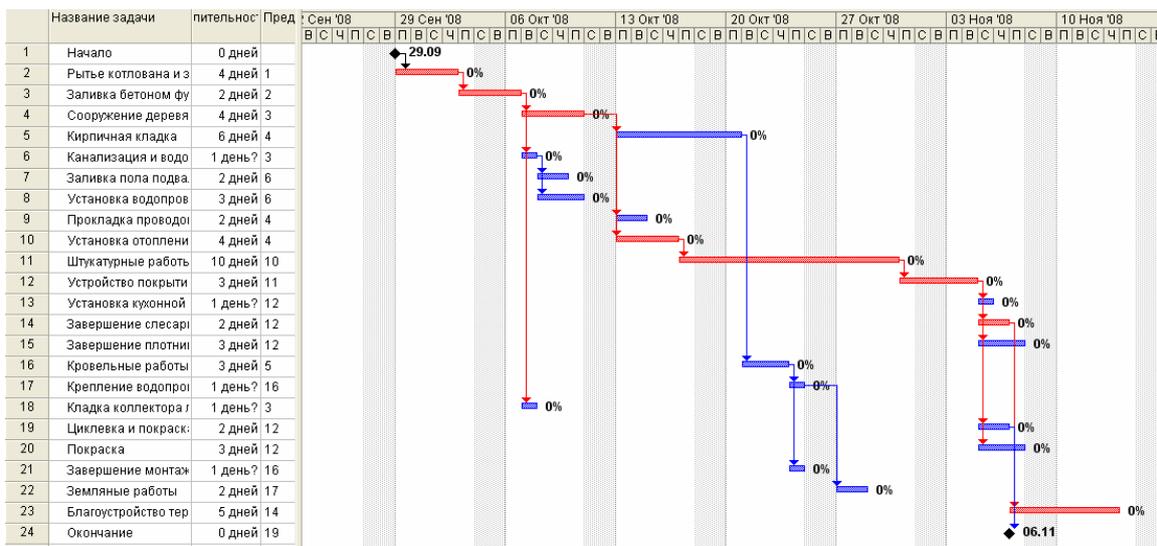


Рис. 2.20. Диаграмма Ганта с отслеживанием

В приведенной модели был произведен анализ работ, задействованных в строительстве коттеджа, и решена задача о резервах времени и критическом пути. В общем случае любую строительную организацию можно как и любую другую систему разложить на иерархические уровни, содержащие однородные элементы, и составить структурную модель, позволяющую разобраться в проблемах, преследующих ее руководство. Декомпозицию можно производить по-разному, так как она не является однозначной, а зависит от возникшей проблемы. Системный анализ использует для подобной декомпозиции критерии, с помощью которых решается вопрос о числе уровней иерархии, детализации внутри уровней и т. д. В любом случае при этом должны учитываться два свойства структуры: полнота и простота. Это достигается, если в структурную модель включены только элементы, существенные для анализа деятельности системы (рис. 2.21).



Рис. 2.21. Структурная модель гипотетической фирмы по строительству коттеджей

Число уровней иерархии при декомпозиции определяется степенью детализации системы. Слишком подробные схемы неоправданно усложняют задачу, и в каждом случае понятие элементарности должно определяться по-своему.

### Вопросы и задания

1. Что заставляет нас пользоваться вместо самих объектов их моделями?
  2. Каково главное различие между математической моделью и моделируемым объектом?
  3. Какими средствами располагает ЛППР для построения математических моделей?
  4. Что такое «адекватность модели»?
  5. Когда модель позволяет сделать прогноз?
  6. В чем различие между адекватностью и истинностью моделей?
  7. Приведите примеры обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с разделяющимися переменными, моделирующие процессы развития бизнеса.
  8. Какие математические модели называются дифференциальными?
  9. Рассмотрите криминальный случай «Когда произошла авария?». На ТЭЦ 2 произошла авария: взрыв парового котла (авария произошла ночью). Утром криминалисты обнаружили, что температура котла равнялась 95 °С. Температура воздуха в котельной была 18 °С и не изменялась. Составьте математическую модель, по которой можно было бы определить время аварии.
  10. Составьте дифференциальную математическую модель для вычисления времени, когда информация телерекламы охватит половину населения некоторого жилого района.
  11. Коэффициент рождаемости в городе равен 0,01, а смертности 0,002 (данные не являются официальными и взяты произвольно). Составьте модель прогноза численности населения и определите число жителей в 2018, 2220 и 3000 годах. Как связать полученные результаты с задачами градостроительства?
  12. Составьте математическую модель эпидемии болезни для поселка с численностью населения 5000 чел., считая, что число зараженных в момент  $t_0 = 0$  было равно четырем. «Проиграйте» различные ситуации развития эпидемии в зависимости от величин параметров модели. Как изменится модель, если учесть изоляцию больных? Результат проанализировать на графике.
  13. Какие типы моделей используются при экологическом моделировании? Уровни математических моделей экосистем.
  14. Интенсивность потока заявок  $\lambda$  и мощность предприятия  $\mu$  заданы. В среде MathCAD получите на экране дисплея качественную картину изменения  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$  во времени. Определите численные значения асимптот  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$ , а также величины: абсолютную пропускную способность (полное количество обслуживаний в единицу времени), которая вычисляется по формуле  $q = \lambda P_0(t) = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu}$ ; относительную пропускную способность:  $d = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$ ; вероятность отказа:  $p = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$ . После этого перейти к выполнению варианта задания:
- В а р и а н т 1.**  $\lambda = 1$ ;  $\mu = 0,5$ . Получите изображение  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$ . Определите с помощью ЭВМ время, когда  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$  будут равны друг другу. Измените  $\lambda$  и  $\mu$  и повторите эти операции. Проанализируйте полученный результат.
- В а р и а н т 2.**  $\lambda = 0,6$ ;  $\mu = 0,4$  Получите изображение  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$ . Проанализируйте полученную картину. Определите время, когда вероятность  $P_0(t)$  будет равна  $0,1 \pm 0,001$ . Подберите такое значение  $\mu$  при  $\lambda = 1$ , чтобы для этого времени  $P_1(t)$  равнялись бы  $0,3 \pm 0,001$ .

В а р и а н т 3.  $\lambda = 0,3$ ;  $\mu = 0,5$ . Получите изображение  $P_0(t)$  и  $P_1(t)$  Проанализируйте результат. Докажите с помощью численных расчетов на ЭВМ, когда вероятность отказа будет равна  $0,3 \pm 0,001$ .

15. Что понимается под экосистемой?

16. Что такое системная экология и на каких методах исследования она базируется? Дайте характеристику основных системных принципов.

17. Какие типы моделей используются при экологическом моделировании? Уровни детализации математических моделей экосистем.

18. Используйте модель эпидемии для составления прогнозов состояния строительных конструкций.

19. Что такое «структурирование системы» и где оно используется?

20. Перечислите основные функции пакета MS Project 2003. Как используется эта программа в строительном бизнесе?

## 3. ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ И ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ

*Модели функционирования систем. — Дискретное описание систем с помощью графов. — Топологический анализ структур. — Модели оптимизации и их реализация.*

### 3.1. Модели функционирования систем

**Модели функционирования систем**, основанные на дифференциальных уравнениях, описывают процессы во времени, протекающие как внутри системы, так и в процессе обмена информацией с внешней средой. При анализе структуры строительных систем нас будут интересовать их свойства, не зависящие от времени и сохраняющиеся неизменными на всем временном интервале наблюдения. Структура систем и их функционирование тесно связаны между собой. Хорошо изучив законы функционирования отдельных элементов системы, но не зная структуры, которая описывает взаимодействие между элементами внутри системы, трудно представить ее как единое.

Введем понятие структуры. **Структура** — форма представления объекта или процесса в виде составных частей. Формирование структуры в системном анализе является частью решения общей задачи принятия решений.

Формирование структуры системы предусматривает расчленение системы на группы элементов по иерархическому признаку с описанием связи между ними. Чаще структуру изображают в виде графа или блоков элементов, связанных между собой стрелками (схемы коммуникаций, строительные композиции, календарные планы и т. д.). Типичным примером структуры является блок-схема алгоритма программы, написанной на каком-либо алгоритмическом языке. Деление строительной организации на подразделения также определяет структурную схему для эффективного управления.

Между элементами структуры систем существуют различные типы связей: последовательные, параллельные, последовательно-параллельные и обратная связь (рис. 3.1).

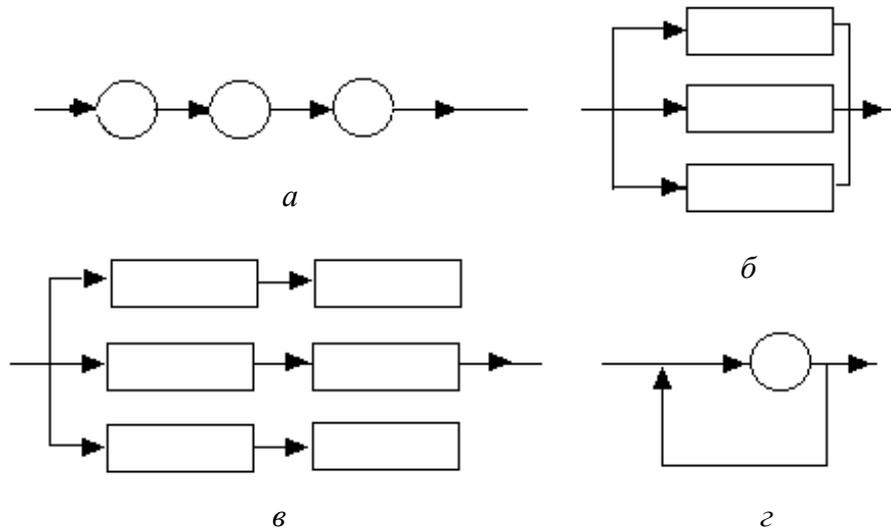


Рис. 3.1. Типы связей, встречающихся при описании структур: *a* — последовательные; *б* — параллельные; *в* — последовательно-параллельные; *г* — обратная

Важными понятиями при построении структуры являются декомпозиция и иерархия.

**Декомпозиция** — расчленение системы на отдельные блоки, с которыми удобнее производить какие-либо математические операции. Она применяется к сложным структурам, где простое математическое описание невозможно. Главной задачей декомпозиции является упрощение системы. При этом следует обратить внимание, до какой степени упрощения можно пойти; где следует остановиться, чтобы структура после декомпозиции оставалась адекватной исходной модели. Можно построить декомпозицию, полностью соответствующую исходной системе, и при этом упростить проблему с математической точки зрения. Такая декомпозиция называется строгой и требует специальных процедур, описывающих взаимодействие между отдельными элементами.

При составлении математических моделей важную роль играет иерархическое упорядочение элементов системы. Доминирующее влияние одного элемента над другими ставит его выше по иерархии. Такие иерархические связи часто имеют древовидную структуру. Примеры таких иерархий весьма многочисленны. На рис. 3.2 представлена схема структуры двухуровневой системы управления. Центр (Ц) через посредство трех министерств (М1, М2, М3) управляет распределением ресурсов какого-либо региона. Управляющие воздействия ( $x_i$ ) и характеристики состояния системы как результат отклика на эти воздействия ( $y_i$ ) отражаются на выходе системы ( $Y(t)$ ). Желаемый результат (цель) может быть достигнут только в случае правильного управления с учетом характеристик состояния ( $Y_i$ ).

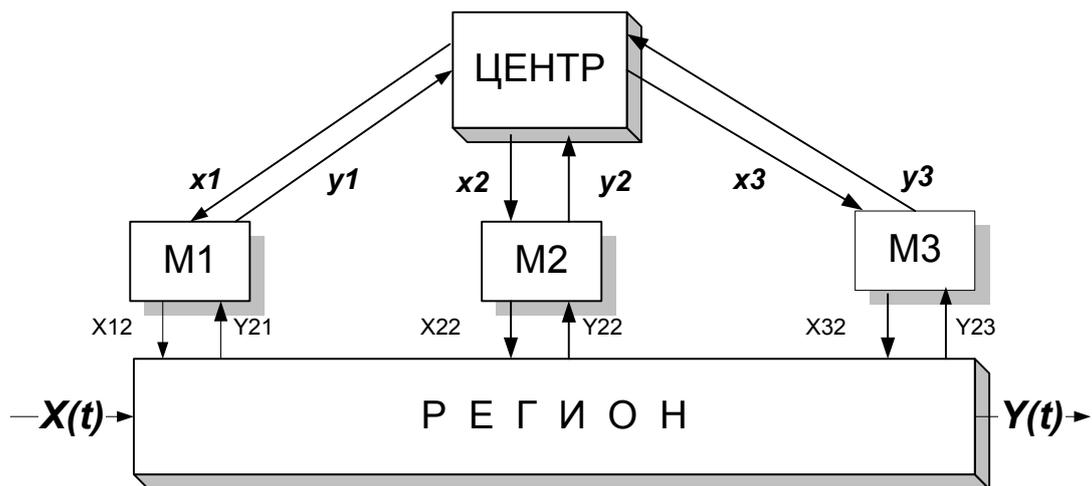


Рис. 3.2. Структурная схема системы распределения ресурсов для экономического региона:  $X(t)$  — входной вектор плановых заданий;  $Y(t)$  — выход

### 3.2. Дискретное описание систем с помощью графов

Структурная схема более наглядно представляется в виде графа. Преимущество такого описания в том, что здесь возможно использовать хорошо развитый математический аппарат теории графов [4, 15]. Остановимся коротко на основных положениях этой теории и рассмотрим некоторые важные для системного анализа практические приложения.

**Граф** — это два множества, объединенные в пару:  $G = (N, A)$ , где  $N$  — множество узлов (вершин) графа;  $A$  — множество дуг, соединяющих вершины. Примерами узлов могут быть пересечения автострад, водоемы, разделенные во времени события, связанные с производством строительных работ и др. Дугами могут быть дороги, линии электропередач, водопроводные и канализационные трубы. Иногда дуги несут формальный смысл и носят только логический характер. Такие дуги называются фиктивными. Каждая дуга графа связывает две вершины, называемые смежными. Если все вершины графа пронумерованы, то такой граф называется отмеченным. В таком графе дуга задается парой  $(i, j)$ , в которой  $i$  и  $j$  — номера смежных вершин. Дугу  $(i, j)$  и вершину  $i$  (или  $j$ ) называют инцидентными.

**Степень инциденции вершины** — количество дуг, связанных с этой вершиной. Если все ребра графа заданы упорядоченными парами  $(i, j)$ , в которых порядок расположения номеров смежных вершин имеет значение, то граф называется ориентированным (орграф). В таком графе дуги имеют направления и обозначаются в виде стрелок.

Встречаются также частично-ориентированные графы. На рис. 3.3 представлен граф, на котором отражены все приведенные выше определения.

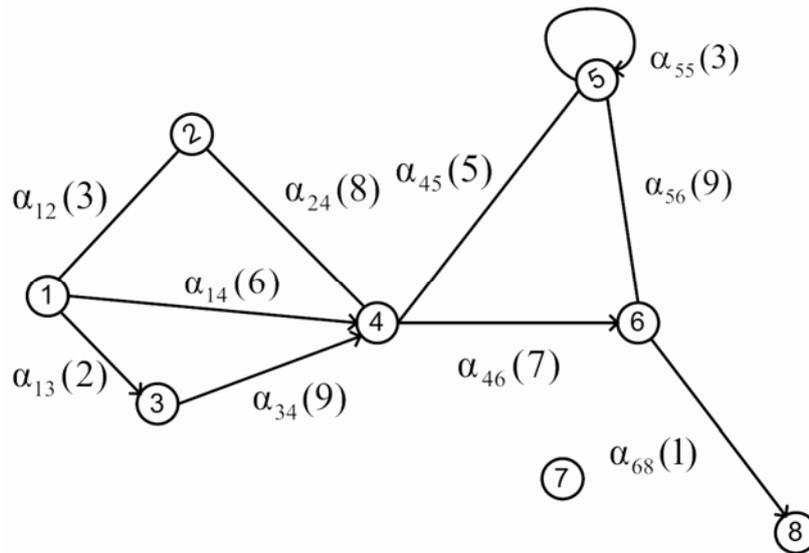


Рис. 3.3. Частично-ориентированный граф  $G(8,10)$ : вершины 1 и 4, 2 и 4, 5 и 6 — смежные; вершина 8 — висячая; 7 — изолированная. Дуги обозначены  $\alpha_{ij}(x)$ , где  $ij$  — индекс дуги;  $x$  — ее характеристика. Дуга  $\alpha_{55}(3)$  называется петлей

Визуальное представление графа удобно для изображения структуры модели. Однако такого визуального представления недостаточно для формального анализа структур. При компьютерной обработке данных с участием графовых моделей используется математическое описание графа в виде матриц. Для графа, изображенного на рис. 3.3, матрица смежности выглядит так:

$$G_S = \begin{array}{c|cccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}$$

Матрица смежности используется для описания структуры графа и указывает на то, какая вершина с какой связана. При этом если вершины  $i$  и  $j$  связаны между собой, то соответствующие элементы матрицы  $a_{ij} = 1$ . В противном случае  $a_{ij} = 0$ .

В табл. 3.1 представлена матрица инциденций, которая описывает граф посредством отражения связей между вершинами и дугами (рис. 3.4). При этом  $a_{ij} = +1$ , если  $i$  — начальная вершина дуги;  $-1$ , если  $i$  — конечная вершина дуги;  $0$  — в остальных случаях.

Матрица инциденций для графа на рис. 3.4

Вершины	Дуги					
	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{23}$	$\alpha_{24}$	$\alpha_{34}$
1	+1	+1	+1	0	0	0
2	-1	0	0	+1	+1	0
3	0	-1	0	-1	0	+1
4	0	0	-1	0	-1	-1

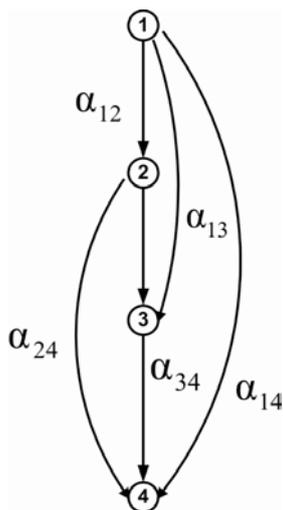


Рис. 3.4. Ориентированный граф с матрицей инциденций по табл. 3.1

Матрица расстояний необходима для ввода данных о длинах дуг графа. Две предыдущие матрицы описывают структуру графа, его графическое изображение. Однако в них отсутствует информация о количественных связях между узлами. Для графа, изображенного на рис. 3.3, матрица расстояний будет иметь вид

$$G_R = \begin{array}{c|cccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \hline 1 & 0 & 3 & 2 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 6 & 8 & 9 & 0 & 5 & 7 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 5 & 3 & 9 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 7 & 9 & 0 & 0 & 1 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array}$$

Матричное представление графа весьма эффективно при разработке алгоритмов, их численной реализации и организации ввода-вывода в ЭВМ-приложениях. Графы имеют свои характеристики и параметры, с помощью которых формируются основные теоремы и аксиомы теории графов. Приведем некоторые из них.

**Путь на графе** — это последовательность вершин и дуг, соединяющая  $i$ - и  $j$ -ю вершины, в которой вершины и дуги не повторяются дважды. На графе (рис. 3.3) существует несколько путей от первой вершины до восьмой: (1—3—4—6—8; 1—2—4—5—6—8; 1—4—6—8; ...).

**Цикл** — это путь, у которого начальная и конечная вершины совпадают. Для нашего примера циклов несколько: (1—3—4—1; 1—2—4—1; 4—6—5—4).

**Дерево** — граф, соединяющий все вершины и не имеющий циклов. Граф, представленный на рис. 3.3, имеет несколько подграфов, которые образуют деревья (вершину 7 не учитываем): (1—2, 1—3, 1—4, 4—5, 5—6, 6—8), (1—2, 1—3, 1—4, 4—5, 4—6, 6—8), (1—4, 1—3, 2—4, 4—5, 5—6, 6—8).

**Кратчайший остов дерева** — дерево графа с минимальной суммарной стоимостью дуг.

**Кратчайший путь** — путь от начальной вершины графа до конечной с минимальной стоимостью.

При моделировании с помощью графов могут появляться вершины с инцидентностью равной нулю — **изолированные вершины**. Это недопустимо, так как граф, описывающий структуру системы или поэтапный процесс во времени, должен быть связным. В связном графе все вершины соединены дугами, т. е. достижимы.

Исследования графа, полученного на первом этапе моделирования, направлены, прежде всего, на выявление в нем петель или циклов, а также тупиковых и висячих вершин.

**Тупиковая вершина** — вершина только для ориентированного графа. Из нее нельзя попасть ни в какую другую вершину.

**Висячая вершина** — это вершина, в которую нельзя попасть из любой другой вершины графа.

**Связность** — это наименьшее число вершин, удаление которых из графа приводит к несвязному (содержащему изолированные вершины) или тривиальному — всего одна вершина.

**Реберная связность** — наименьшее число ребер, удаление которых приводит к несвязному или тривиальному графу. Для оценки связности структур чаще всего используется показатель  $\alpha$ , характеризующий относительную разность имеющегося числа связей  $R$  и числа связей  $R_{\min}$ , минимально необходимого для связности графа структуры. Этот показатель интерпретируется как мера избыточности структуры по связям. Если граф содержит  $N$  вершин, то  $R_{\min} = n - 1$  независимо от того, ориентирован он или нет. Следовательно,

$$\alpha = \frac{R - R_{\min}}{R_{\min}} = \frac{R}{N - 1} - 1. \quad (3.1)$$

### 3.3. Топологический анализ структур

#### 3.3.1. Анализ вершин как элементов структуры

Выявление оригинальных вершин типа висячих, изолированных и тупиковых; определение связности и многих других характеристик графа, рассмотрение которых необходимо для составления адекватной модели системы, относится к разделу теории графов, который посвящен топологии строения графов. Рассмотрим некоторые из них.

После составления графовой модели особое значение имеет выделение элементов, соответствующих висячим, тупиковым и изолированным вершинам графа. Напомним, что изолированные вершины не являются инцидентными каким-либо вершинам из всего множества вершин графа, висячие — соответствуют вершинам, в которые нельзя попасть ни из одной вершины графа, тупиковые — вершинам, из которых нельзя попасть в другие вершины графа.

**Сильные компоненты и конденсация.** В процессе снабжения строительными материалами иногда ставится вопрос о том, как их переместить в какой-либо транспортной сети. Допустим, что реализуется некоторый строительный проект со множеством строительных фирм, связанных между собой информационной компьютерной сетью. Как правило, не всем абонентам проекта сети информация будет доступна и в этой сети степень доступа абонентов к серверу различна. Для упрощения работы с такими моделями в сетевой интерпретации проекта выявляются сильные компоненты в виде подграфа, где все вершины достижимы. На графе 3.5 можно выделить по крайней мере три подграфа, обладающих этим свойством.

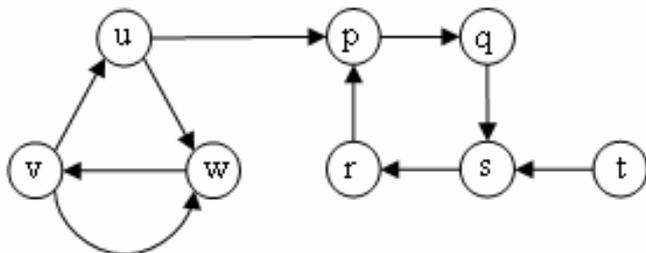


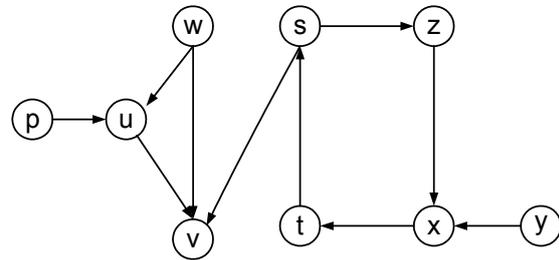
Рис. 3.5. Ориентированный граф, содержащий сильные компоненты:  $\{u, v, w\}$ ,  $\{p, q, s, r\}$ ,  $\{t\}$

Действительно, попав в одну из вершин  $u$ ,  $v$  или  $w$ , можно «дозвониться» до остальных. Говорят, что множество  $\{u, v, w\}$  является вершинной базой. Вершина  $t$  — вырожденный случай, когда вершина достижима до самой себя.

**Вершинная база.** Множество вершин  $B$  орграфа  $G$  называется вершинной базой (базой вершин), если каждая вершина, не входящая в  $B$ , достижима из любой вершины в ней, и множество  $B$  минимально.

Для приведенного ниже примера (рис. 3.6.) вершинная база будет состоять всего из двух вершин  $p$  и  $u$ , так как из них (недостижимых для остальных) можно попасть в любую другую вершину орграфа.

Рис. 3.6. Ориентированный граф, вершинная база которого состоит всего из двух вершин —  $p$  и  $u$



**Конденсация** — граф, в котором сильные компоненты объединены в вершинную базу:  $K_1 = \{u, v, w\}$ ,  $K_2 = \{p, q, r, s\}$ ,  $K_3 = \{t\}$  (см. рис. 3.5). Формирование конденсации начинается с выделения сильных компонент и объединения их в вершинную базу. При этом создается граф с меньшим числом вершин, но несущий информацию о достижимости вершин. Такие процедуры весьма полезны при синтезе сложных структур и последующем анализе, которые часто используются в диагностике сложных систем, поиске неисправностей, математическом моделировании организаций и предприятий.

На рис. 3.7 демонстрируется поэтапное формирование вершинной базы и конденсации исходного орграфа.

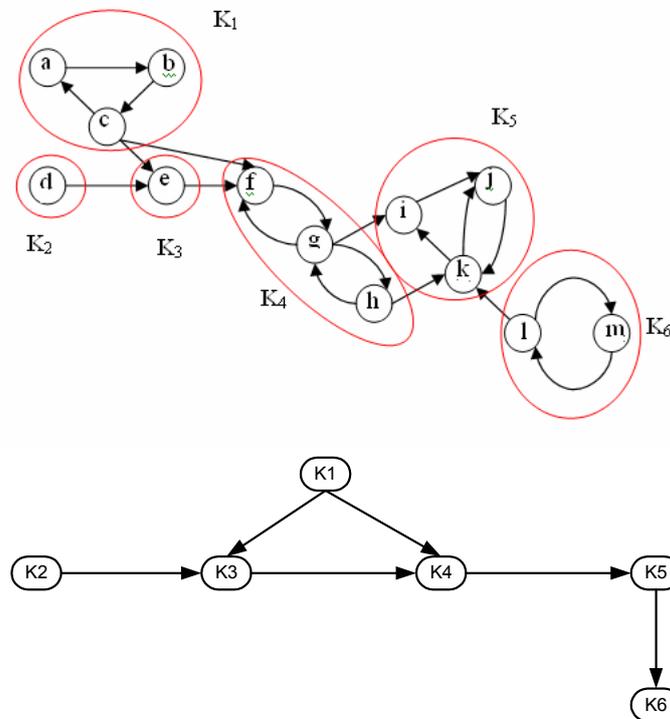


Рис. 3.7. Формирование вершинной базы

### 3.3.2. Диаметр структуры

Диаметр структуры графа является одной из его характеристик, с помощью которой оцениваются степень влияния висячих вершин на тупиковые, размеры структур и объемы потоков по сети.

Пусть  $D$  — длина максимального пути между висячей вершиной  $i$  и тупиковой вершиной  $j$ , равная числу ребер, составляющих этот путь. Тогда

$$D = \max\{d_{ij}\}, \quad (3.2)$$

где  $d_{ij}$  — множество возможных путей.

Диаметр структуры определяется с помощью следующего алгоритма.

Шаг 1. Найти висячие вершины и произвести их нумерацию. Для каждой вершины, не являющейся висячей, определить характеристику  $d(k)$ . Положим  $d(1) = 0$ , а  $d(k) = \infty$ ,  $k = 2, n$ . Начало алгоритма:  $l = 1$ , а все вершины с номерами  $k \neq l$  удалить из графа.

Шаг 2. Просмотреть все ребра  $(l, k)$ , выходящие из вершины  $l$ . Характеристика для каждой вершины определяется по формуле  $d(k) = \min\{d(k), d(l) + 1\}$ .

Шаг 3. Дойдя до вершины с номером  $l < (n - 1)$ , положить  $l = l + 1$  и возвратиться к шагу 2. Иначе — конец вычислений.

Реализуем рассмотренный алгоритм на графе, изображенном на рис. 3.8, и определим его диаметр. В этом графе две висячие вершины 1 и 2 и две тупиковые — 7 и 8. Данный граф имеет нормальную нумерацию, поэтому в перенумерации необходимости нет. Нам нужно вычислить  $d = \max\{d_{17}, d_{18}, d_{27}, d_{28}\}$ .

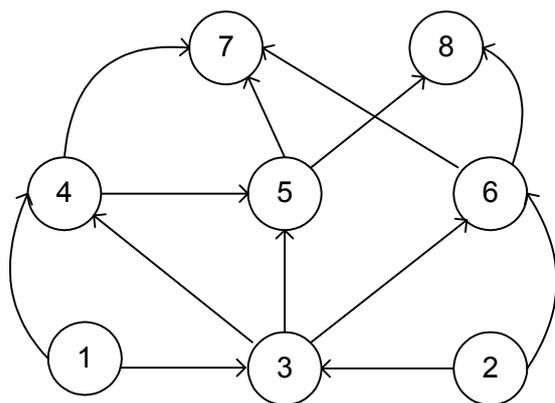


Рис. 3.8. Пример избыточного по связям графа для демонстрации алгоритма вычисления диаметра структуры

Шаг 1. Положим  $d(1) = 0$  и  $d(k) = \infty$  для всех  $k = 2 \dots 8$ .

Шаг 2. Для первой висячей вершины ( $l = 1$ ) имеем две соседние вершины с номерами 3 и 4. Определим их характеристики по формуле  $d(k) = \min\{d(k), d(l) + 1\}$ .

Получим величины  $d(3) = \min\{\infty, 0 + 1\} = 1$  и  $d(4) = \min\{\infty, 0 + 1\} = 1$ .

Для  $l = 2$  вычислений не производим, так как 2 — висячая вершина.

Для  $l = 3$  имеем соседние вершины с номерами 4, 5 и 6  $d(4) = \min\{d(4), d(3) + 1\} = \{1, 1 + 1\} = 1$ . Характеристика для вершины 5 определяется так:  $d(5) = \min\{d(5), d(3) + 1; d(5), d(4) + 1\}$  или  $d(5) = \min\{\infty, 2; \infty, 2\} = 2$ , так как в эту вершину из висячей вершины под номером 1 можно попасть по двум различным маршрутам: 1—4—5 и 1—3—5. Аналогично  $d(6) = 2$ .

Для  $l = 4$  имеем две соседние вершины — 5 и 7. Вычислим их характеристики:  $d(7) = \min\{d(7), d(4) + 1; d(7), d(5) + 1\} = \min\{\infty, 2; \infty, 3\}$ .  $d(7) = 2$ ,  $d(5) = \min\{d(5), d(4) + 1\}$ ,  $\min\{2, 2\}$ ,  $d(5) = 2$ .

Для  $l = 5$ :  $d(7) = \min(2, 1+2) = 2$  и  $d(8) = \min(\infty, d(5) + 1) = \min(\infty, 2 + 1) = 3$ .

Для  $l = 6$ :  $d(7) = \min(2, 2 + 1) = 2$ ,  $d(8) = \min(3, 3 + 1) = 3$ . Окончательно для висячей вершины номер 1 имеем:  $d(7) = 2$  и  $d(8) = 3$ .

Шаг 3. Для вершины 2, проведя аналогичные вычисления характеристик в вершинах, получим:  $d(7) = d(8) = 2$ , а значение диаметра структуры, описываемой графом (рис 3.8), окончательно вычислим по формуле  $d = \max(2, 3, 2, 2) = 3$ .

### 3.3.3. Степень централизации

В некоторых случаях модель должна предусматривать возможность оценки того, насколько симметрична структура системы. Это необходимо для определения узких мест обслуживания в системе сервиса коммунальных услуг или при управлении технологическими процессами. С помощью графов можно решать подобные задачи не только для проведения анализа системы, а также для ее совершенствования, используя приемы построения изоморфных структур, которые не нарушают функционирования системы, но способны увеличить степень централизации. Для характеристики неравномерности загрузки элементов структуры, которая описывается неориентированным графом, применяется индекс центральности

$$\beta = \frac{(n-1)(2z_{\max} - n)}{z_{\max}(n-2)},$$

где

$$z_{\max} = \max \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \left( \sum_{j=1}^n d_{ij} \right) - 1 \right\}.$$

Для  $i = j$  полагается  $d_{ij} = 0$ .

Симметричные структуры с топологией вида представлены на рис. 3.9.

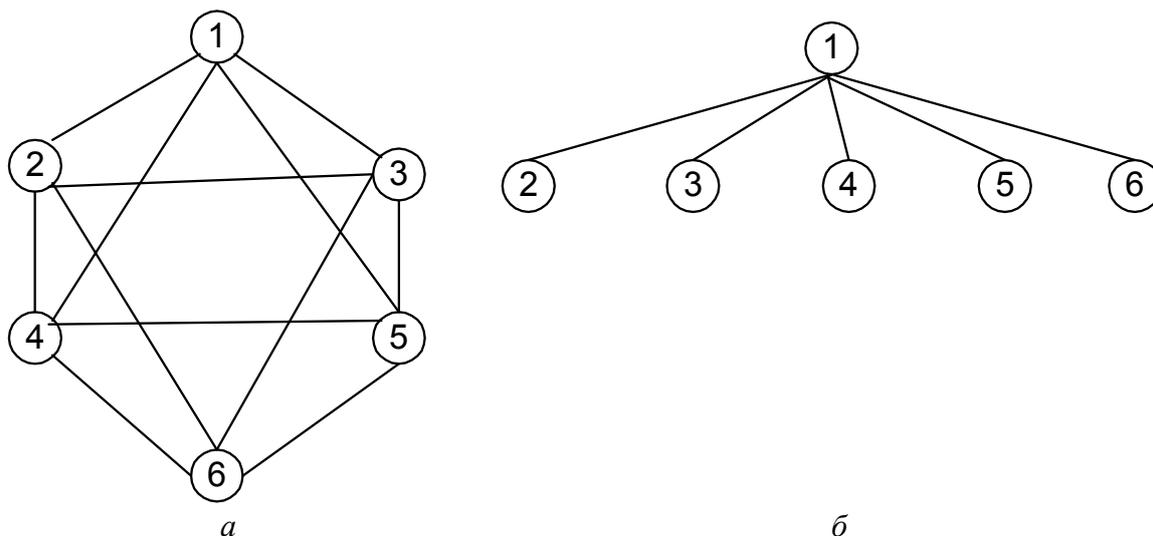


Рис. 3.9. Примеры предельных случаев централизации структуры: *a* — связи распределены равномерно, все вершины инцидентны одному и тому же числу ребер, параметр  $\beta = 0$ ; *б* — максимальная степень централизации, при которой  $\beta = 1$

### 3.4. Модели оптимизации и их реализация

#### 3.4.1. Реализация математической модели

Моделирование с помощью графов позволяет выявлять особенности структуры системы, характер взаимодействия между отдельными элементами, решать оптимизационные задачи. Если моделируемая проблема представлена в виде графа, то с его помощью можно получить необходимую информацию о продвижении вперед для достижения окончательной цели.

Теория графов широко применяется в сетевом анализе, описывающем технологические процессы строительства. Сеть и граф — синонимы. В дальнейшем изложении мы не будем специально разделять эти понятия.

Сетевой анализ, основанный на теории графов, в последнее время получил широкое распространение в практике проектирования больших коммуникационных систем, систем вычислительных комплексов, систем космических связей, экономических систем и т. д. Были разработаны специальные алгоритмы программ для ЭВМ при решении задач, связанных с распределением ресурсов, календарным планированием, заменой оборудования, контролем за уровнем издержек, перевозками, работой систем массового обслуживания, управлением запасами, распределением рабочей силы и др. [10].

В строительной экономике при системном анализе используют сетевые модели для разработок календарных планов, схем иерархии технологических процессов, структурных схем математических моделей строительных элементов и объектов градостроительства и т. д.

Основное внимание в дальнейшем изложении будет уделено проблемам оптимизации систем. При решении задач на графовых моделях часто приходится не только выявлять различные связи между элементами системы, но и определять критические параметры сети (кратчайшее расстояние, максимальная пропускная способность сети и т. д.). Из-за сложности задач перебора возможных вариантов некоторые проблемы нельзя решить этим способом.

Приведем пример. Из теории графов известно, что число возможных деревьев (покрытий) на графе с  $N$  вершинами определяется величиной  $N^{N-2}$ . Для  $N = 100\,000$  имеем число возможных покрытий, равное  $100\,000^{99998}$ . Это очень большое число! Если составить программу для ЭВМ, выполняющую перебор возможных вариантов, то она будет работать на современном компьютере 15 млрд лет (!). Это возраст Вселенной. Многомерность рассмотренной выше задачи привела математиков к проблеме под названием «проклятие размерности».

Совершенно очевидно, что без разработки специальных алгоритмов не представляется возможным решать многомерные задачи методом перебора. К настоящему времени разработано значительное число оригинальных алгоритмов, позволяющих уйти от сложности, связанной с указанной многомерностью. Поиск осуществляется не методом перебора, а с помощью специальных приемов на матрицах графов. Алгоритмы на графах с целью оптимизации часто называют «поглощающими» или «жадными» алгоритмами. Эти алгоритмы явились настоящим открытием в свое время и сейчас служат единственно возможным способом решения некоторых многомерных проблем, таких как природопользование, экономический анализ региона и др. Мы рассмотрим несколько таких алгоритмов и обсудим возможности их применения.

### 3.4.2. Кратчайший путь на ориентированном графе

Разработка маршрутов и расписания перевозок грузов лежит в основе многих технологических операций строительства. Доставка строительных материалов — одно из важных звеньев оптимальности технологии. Поэтому следует рассмотреть алгоритм по данной проблеме. В инженерной практике часто приходится решать потоковые задачи из некоторого источника в сток. При этом ЛПР интересуется маршрут (в наших терминах — «путь») с минимальными потерями (стоимостью прохода по цепи или со временем пребывания в пути). Такие задачи встречаются при моделировании технологических процессов, в теории расписаний и т. д. Данный алгоритм позволяет найти кратчайший путь на графе от начальной вершины до конечной.

Он основан на приписывании узлам временных и постоянных пометок. Первоначально каждой вершине приписывается временная пометка, соответствующая длине кратчайшей дуги, идущей из источника (начальная вершина графа) в конечную вершину — сток. Начальной вершине графа приписывается постоянная пометка, равная нулю. Вершины, не связанные с источником непосредственно (несмежные с ним), получают временные пометки  $\infty$ , а вершины смежные с первой вершиной приобретают временные пометки  $d_{1j} = 0 + a_{1j}$ , где  $a_{ij}$  — расстояние от  $j$ -й вершины до источника. Минимальная из временных пометок становится постоянно помеченной. Затем рассматриваются вершины, смежные с последней, постоянно помеченной. Из всех вновь образованных временных пометок выбираем пометку минимальной стоимости и объявляем ее постоянной. Алгоритм закончит свою работу, когда будет помечена постоянной пометкой конечная вершина графа.

Работу алгоритма продемонстрируем на конкретном графе, представленном на рис. 3.10.

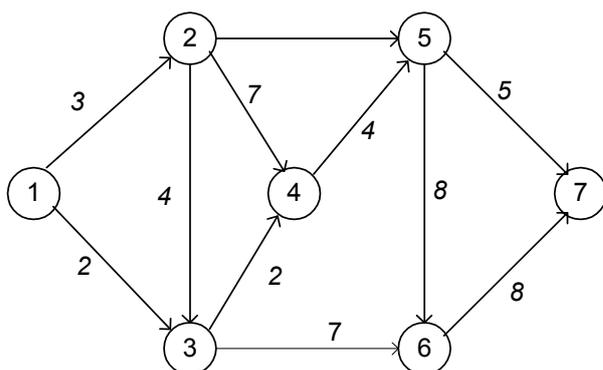


Рис. 3.10. Граф для демонстрации алгоритма Дейкстры. Граф ориентирован. Алгоритм начинает работу с выбора вершины — истока (вершина 1) и продолжает, пока не будет достигнута конечная вершина — сток (под номером 7)

Последовательность действий алгоритма будет следующей.

1. Вершине 1 — истоку приписываем постоянную пометку [0], а остальные вершины имеют временные пометки  $\infty$ . Схематически это можно изобразить так:

1	2	3	4	5	6	7
[0]	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

2. Узлы 2 и 3 непосредственно связаны с вершиной 1. Приписываем им новые временные пометки, равные сумме постоянной пометки вершины 1 и длин соответствующих дуг:  $d_2 = d_1 + a_{12} = 0 + 3$ ,  $d_3 = d_1 + a_{13} = 0 + 2 = 2$ . Поскольку  $d_3 < d_2$ , вершине 3 приписываем постоянную пометку [2].

1	2	3	4	5	6	7
[0]	3	[2]	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

3. Рассмотрим последнюю постоянно помеченную вершину 3. С ней связаны вершины 4 и 6. Поскольку  $d_4 = d_3 + a_{34} = 2 + 2 = 4$  и  $d_6 = d_3 + a_{36} = 2 + 7 = 9$ , то в ряду временных пометок наименьшее значение у второй вершины. Вершина 2 получает постоянную пометку [3].

1	2	3	4	5	6	7
[0]	[3]	[2]	4	$\infty$	9	$\infty$

4. Для вершины 2 вычислим временные пометки вершин 4 и 5, так как третья вершина уже помечена постоянной пометкой. Вершина 4 остается с прежней временной пометкой, так как новая временная пометка для нее  $d_4 = d_2 + 7 = 10 > 4$ . Для пятой вершины временная пометка примет значение  $d_5 = d_2 + a_{25} = 3 + 6 = 9$ . Вершина 4 получает постоянную пометку.

1	2	3	4	5	6	7
[0]	[3]	[2]	[4]	9	9	$\infty$

5. Произведем расчет временной пометки для соседней вершины с последней постоянно помеченной четвертой. Такая вершина единственная под номером 5:  $d_5 = d_4 + a_{45} = 4 + 4 = 8$ . Временная пометка улучшена ( $8 < 9$ ). Изменим ее и объявим пятую вершину постоянно помеченной.

1	2	3	4	5	6	7
[0]	[3]	[2]	[4]	[8]	9	$\infty$

6. У пятой вершины два соседа — 6 и 7. Временные пометки для них будут соответственно 9 и 13. Объявим постоянной шестую вершину и вычислим временную пометку у соседней вершины 7. Она не может быть улучшена, поэтому остается прежней. Постоянную пометку получает вершина 6. Пометка седьмой не может быть улучшена так же, как и для предыдущего случая, поэтому объявим ее постоянной и закончим работу алгоритма расстановки постоянных пометок.

1	2	3	4	5	6	7
[0]	[3]	[2]	[4]	[8]	[9]	[13]

Алгоритм расстановки пометок завершен, так как все вершины получили постоянные пометки. Конечной вершине приписана постоянная пометка 13. Следовательно, кратчайший путь графа равен 13. Этот путь состоит из последовательности дуг, для каждой из которых разность между значениями постоянных пометок ее концов равна длине ее дуги:  $[d_j] - [d_i] = a_{ij}$ . Кратчайший путь состоит из дуг, удовлетворяющих этому соотношению. Это обстоятельство можно использовать для нахождения кратчайшего пути, идя от конца графа к его началу и проверяя его от узла к узлу. Для нашего примера эта последовательность дуг такова: 1—3—4—5—7 (рис. 3.11).

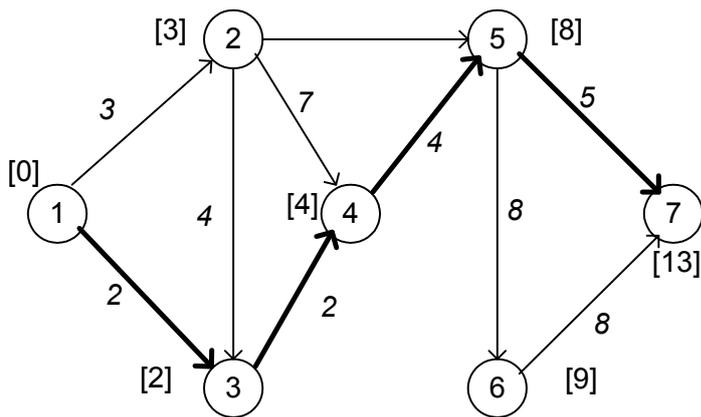


Рис. 3.11. Кратчайший маршрут как результат работы алгоритма Дейкстры

Рассмотрим пример применения алгоритма кратчайшего пути с использованием программы, реализованной на этом методе. В прил. 1 приведены примеры решения оптимизационных задач с помощью пакета сетевой оптимизации, который сопровождает лабораторный практикум по системному анализу. Программа задачи о кратчайшем пути входит в состав этого пакета и применяется при решении задач принятия решений, связанных с перевозками материалов.

Пусть требуется определить кратчайший путь для ориентированного графа, представленного на рис. 3.12. Для ввода исходных данных в ЭВМ составим матрицу расстояний (рис. 3.13).

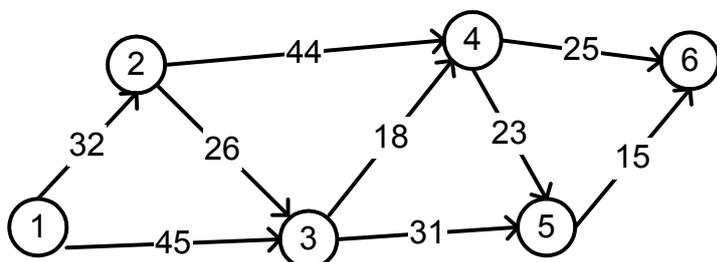


Рис. 3.12. Граф для демонстрации работы алгоритма Дейкстры на ЭВМ

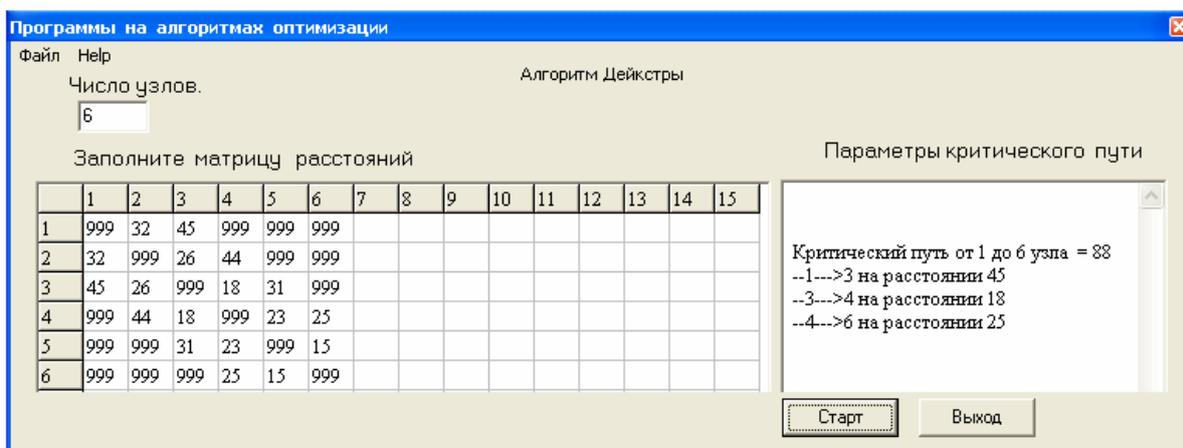


Рис. 3.13. Окно сетевой оптимизации для решения задачи о кратчайшем пути

Знак бесконечности ( $\infty$ ) в матрице расстояний ассоциируется большим по сравнению с ценой дуг числом 999. В правой части окна диалога выводится результат расчета кратчайшего пути, который составляет 88 ед. с последовательностью вершин 1—3—4—6.

Используем ЭВМ для проверки алгоритма Дейкстры, реализованного нами вручную. Заполним матрицу смежности для примера, на котором был рассмотрен метод временных и постоянных пометок, и запустим программу, полностью подтверждающую полученное решение (рис. 3.14).

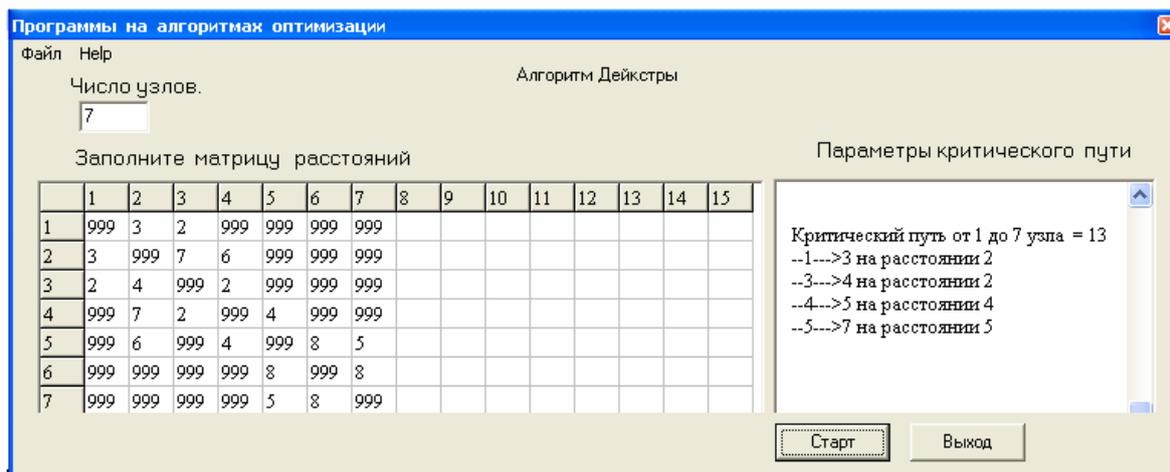


Рис. 3.14. Решение примера (см. рис. 3.10) на ЭВМ

### 3.4.3. Пример использования алгоритма кратчайшего пути

Мы рассмотрели формальную задачу о кратчайшем пути. Она безотносительна к предмету применения, универсальна. Практическое применение задачи о кратчайшем пути весьма широко: можно использовать, например, для решения вопроса о том, когда следует производить замену старого оборудования новым.

Аналогично решается задача о замене автомобиля. В расчет принимаем его стоимость и эксплуатационные расходы, возрастающие с увеличением времени эксплуатации. Рассмотрим восьмилетний период. Автомобиль можно покупать в начале каждого года. Модель принятия решений может быть представлена в виде графа (рис. 3.15) с дугами, стоимости которых вычисляются по формуле

$$c_{ij} = C_n - C_o + \sum_{l=i}^{j-1} \mathcal{E}_l, \quad (3.3)$$

где  $C_n$  — стоимость нового автомобиля;  $C_o$  — остаточная стоимость;  $\mathcal{E}_l$  — эксплуатационные расходы за  $l$ -й год эксплуатации после покупки автомобиля;  $i$  — год покупки автомобиля;  $j$  — текущий год эксплуатации.

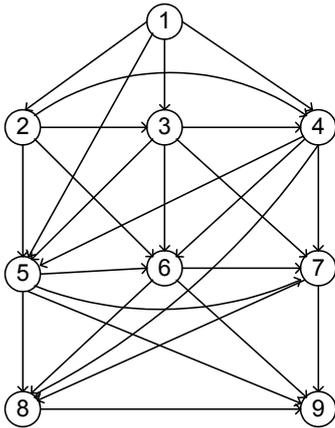


Рис. 3.15. Ориентированный граф для решения задачи о замене автомобиля

Произведем необходимые вычисления (тыс. р) для случая 10%-й годовой инфляции, когда эксплуатационные расходы линейно возрастают во времени. Матрица расстояний представлена ниже и имеет симметричный вид.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$\infty$	10	21	33	46	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
2	10	$\infty$	11	23	36	50	$\infty$	$\infty$	$\infty$
3	21	11	$\infty$	12	25	39	54	$\infty$	$\infty$
4	33	23	12	$\infty$	13	27	42	58	$\infty$
5	46	36	25	13	$\infty$	15	30	46	63
6	$\infty$	50	39	27	15	$\infty$	16	32	49
7	$\infty$	$\infty$	54	42	30	16	$\infty$	17	33
8	$\infty$	$\infty$	$\infty$	58	46	32	17	$\infty$	19
9	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	32	49	33	19	$\infty$

Элементы матрицы расстояний вычислены по формуле (3.3). Отсутствие смежных вершин выражается знаком  $\infty$ . Это означает, что в исходной постановке задачи расстояние между ними бесконечно большое. Отсутствие петель демонстрируется на элементах диагонали.

Реализуем алгоритм Дейкстры для определения принятия оптимальных решений при замене автомобиля. Схема расчетов, пошаговое выполнение алгоритма кратчайшего пути представлена ниже.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
[0]	[10]	21	33					
		[21]	33	46	60			
			[33]	46	60	75		
				[46]	60	75	92	
					[60]	75	92	109
						[75]	92	109
							[90]	108
								[108]

Анализ полученных постоянных пометок определяет последовательность вершин и дуг, входящих в кратчайший путь: 1—3—7—9 (рис. 3.16), что означает замену автомобиля в соответствующие годы, так как номер вершины — это время в годах.

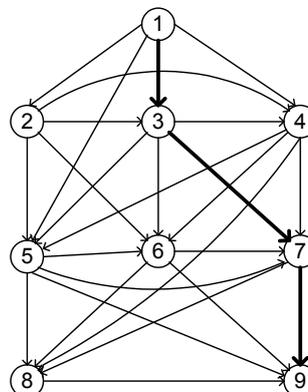


Рис. 3.16. Результат решения задачи о замене автомобиля

Определим кратчайший путь для этой задачи с использованием ЭВМ. Для ввода исходных данных составим матрицу расстояний, которая слева на панели диалога ввода данных (правая часть окна — реализация алгоритма) (рис. 3.17).

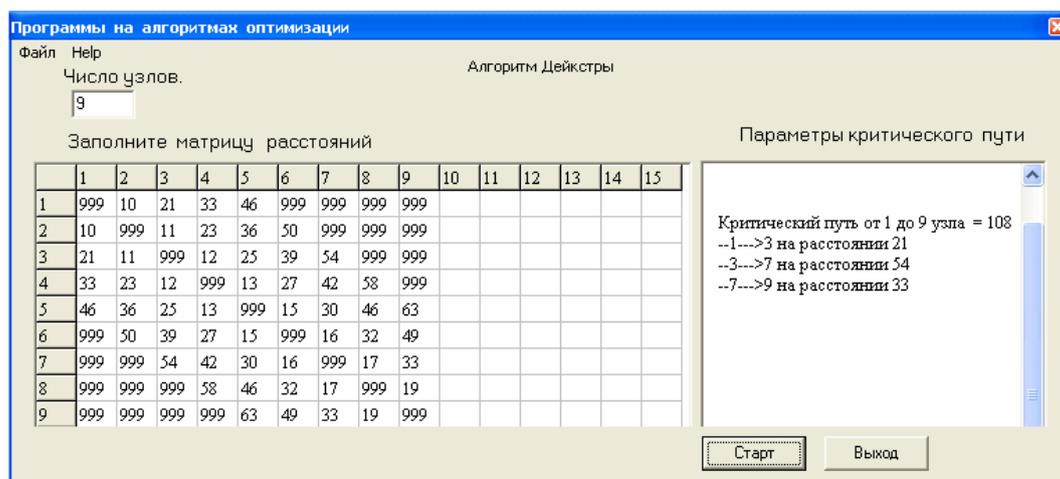


Рис. 3.17. Компьютерная реализация задачи о замене автомобиля

Результаты, полученные в данной модели, дают «пищу» для размышлений и заставляют задуматься над насущным для пользователей личного автотранспорта вопросом. Вместе с тем следует заметить, что результаты могут быть иными, если изменить исходные данные, которые были получены нами с известными предположениями. Приведенный пример демонстрирует решение оптимизационной задачи в виде поэтапного принятия решений. Разрабатывается своеобразная стратегия поведения ЛПР. Такие проблемы часто встречаются в управлении запасами стройматериалов, эксплуатационными затратами и т. д.

### 3.4.4. Кратчайший остов дерева

Задача о кратчайшем остове — одна из немногих задач, которые (как и предыдущая) решаются с помощью «поглощающего» алгоритма.

Кратчайший остов дерева — это дерево, покрывающее заданный неориентированный граф с минимальной стоимостью. Алгоритм достаточно прост и начинается с выбора произвольного узла графа и кратчайшей дуги из множества дуг, соединяющих этот узел с другими вершинами. Найденная дуга определит две вершины на своих концах, которые будут принадлежать будущему кратчайшему остову.

Для решения задачи введем в рассмотрение два множества  $S$  и  $S^*$ . В  $S^*$  поместим все выбранные вершины, а  $S$  — пустое пока множество. Выберем любую вершину из множества  $S^*$  и переместим ее в  $S$ . Найдем ближайшую к ней в  $S^*$  и перенесем ее в  $S$  вместе с дугой. К двум вершинам, расположенным на множестве  $S$ , выберем ближайшую и перенесем ее из множества  $S^*$  на  $S$ . Этот процесс будем продолжать до тех пор, пока все вершины не будут перенесены на  $S$ -множество. На каждом этапе алгоритма следует запоминать дуги, сопровождающие процесс переноса вершин из одного множества в другое. Работу алгоритма рассмотрим на конкретном примере (рис. 3.18).

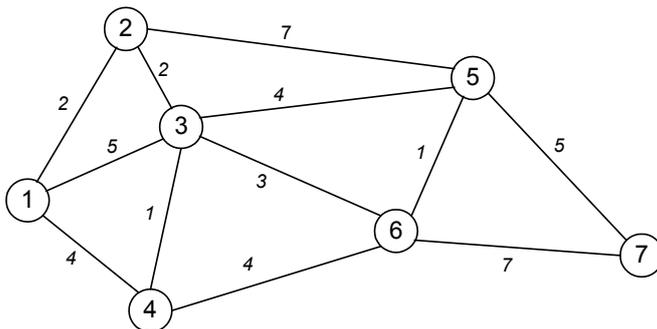


Рис. 3.18. Граф для демонстрации алгоритма кратчайшего остова дерева. Граф неориентирован. Алгоритм начинает работу с произвольной вершин

Алгоритм кратчайшего остова состоит из следующих шагов:

1.  $S^* = \{1,2,3,4,5,6,7\}$ ,  $S = \{0\}$ . Множество  $S$  пустое,  $S^*$  содержит все вершины графа.

2. Выбрать вершину (любую из множества  $S^*$ , пусть это будет вершина номер 6), найти ближайшую к ней (вершина 5). Поместить обе вершины в множество  $S$  и записать дугу, входящую в искомый кратчайший остов дерева:  $S^* = \{1,2,3,4,7\}$ ,  $S = \{6,5\}$ , дуга (6—5).

3. Выбрать вершину 3, так как она является ближайшей к множеству  $S$ , и запомнить ее дугу:  $S^* = \{1,2,4,7\}$ ,  $S = \{6,5,3\}$ , дуги (6—5; 6—3).

4. Вершина 4:  $S^* = \{1,2,7\}$ ,  $S = \{6,5,3,4\}$ , дуги (6—5; 6—3; 3—4).

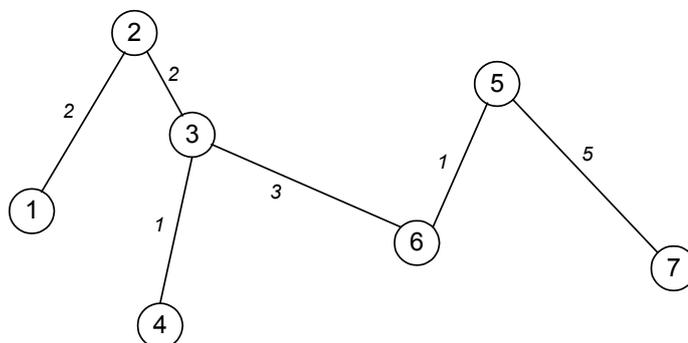
5. Вершина 2:  $S^* = \{1,7\}$ ,  $S = \{6,5,3,4,2\}$ , дуги (6—5; 6—3; 3—4; 4—2).

6. Вершина 1:  $S^* = \{7\}$ ,  $S = \{6,5,3,4,2,1\}$ , дуги (6—5; 6—3; 3—4; 4—2; 2—1).

7. Вершина 7:  $S^* = \{0\}$ ,  $S = \{6,5,3,4,2,1,7\}$ , дуги (6—5 ;6—3; 3—4; 4—2; 2—1; 7—5).

Алгоритм закончил свою работу. Стоимость кратчайшего остова определяется суммой всех дуг, равной 14 единицам. Кратчайший остов дерева, найденный нами только что, изображен на рис. 3.19.

Рис. 3.19. Остов дерева, полученный после реализации алгоритма



Рассмотрим пример применения этого алгоритма с использованием ЭВМ (рис. 3.20). Программа задачи о кратчайшем остове входит в состав пакета программ и применяется при решении задач принятия решений об оптимальном покрытии при строительстве сети дорог, канализации, водоснабжения, информационных локальных сетей и т. д.

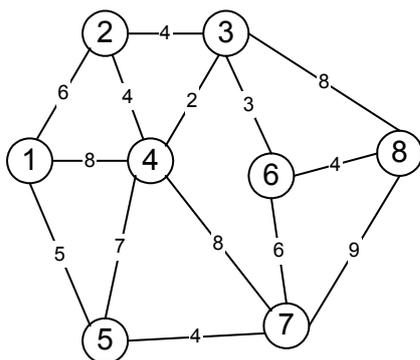


Рис. 3.20. Граф для демонстрации задачи о кратчайшем остове дерева на ЭВМ

Пусть требуется определить кратчайший остов для неориентированного графа. Для ввода исходных данных в ЭВМ составим матрицу расстояний, которая расположена слева на панели диалога ввода данных (рис. 3.21).

Результат работы программы представлен в виде списка справа (см. рис. 3.21), указывающего последовательность включения вершин и дуг в оптимальное покрытие с общей минимальной стоимостью, равной 28 единиц.

Проверим результаты работы алгоритма для графа, представленного на рис. 3.18, полученные нами вручную (см. рис. 3.19). Введем матрицу расстояний и запустим программу (рис. 3.22). Совпадение результатов стопроцентное. Значит, в расчетах вручную ошибок не было.

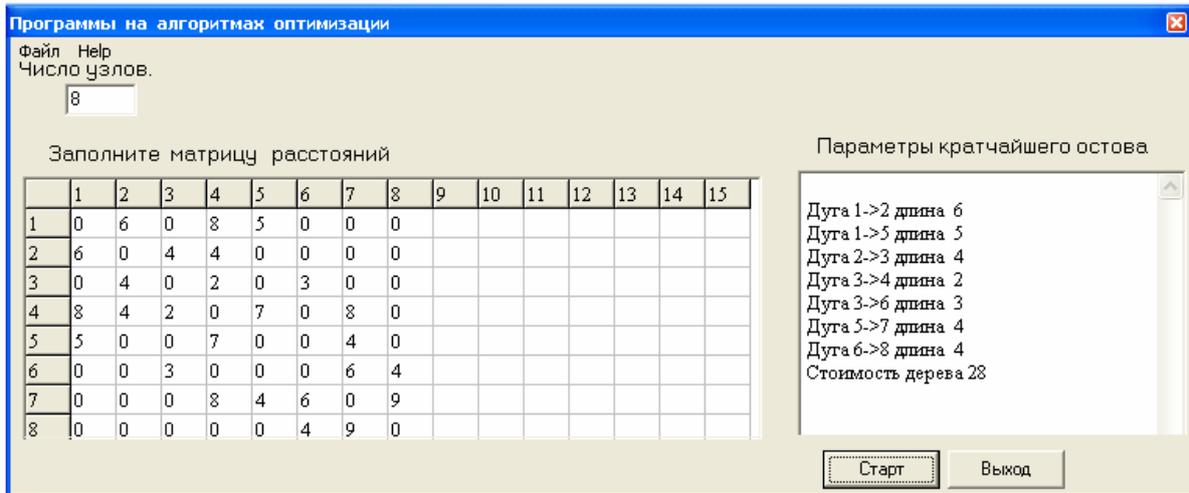


Рис. 3.21. Окно пакета сетевой оптимизации задачи о кратчайшем остове

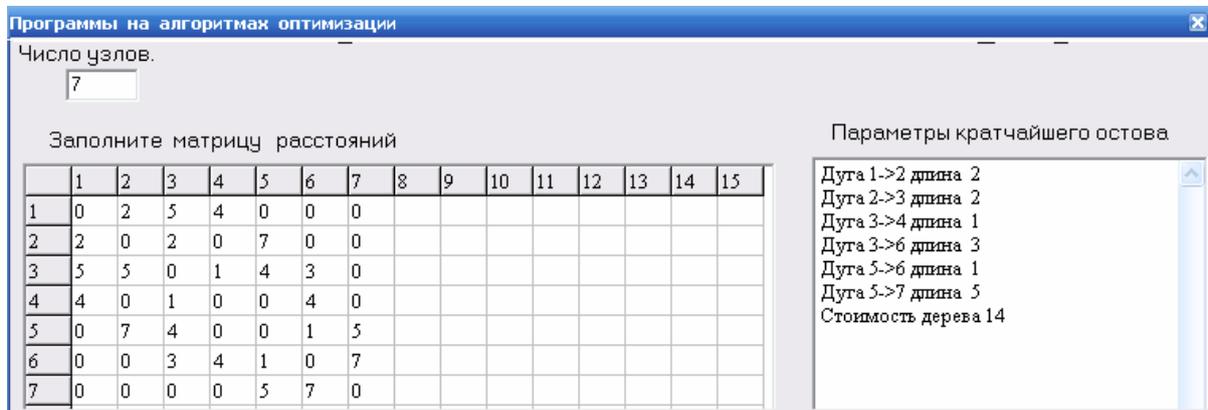


Рис. 3.22. Окно сетевой оптимизации при решении задачи по рис. 3.18, 3.19

### 3.4.5. Максимальный поток в сети

Задачи о потоках имеют большое значение при доставках материалов, передачи информации, расчетах сетей коммуникаций, проектировании городской инфраструктуры и т. д. Будем рассматривать детерминированные потоки с известными параметрами — пропускными способностями дуг на сети, представленной в виде ориентированного графа. Пусть имеется ориентированный граф с истоком  $S$ , стоком  $t$  и дугами с ограниченной пропускной способностью  $R(i, j)$ . Задача о максимальном потоке заключается в поиске таких потоков по дугам, чтобы результирующий поток был максимальным. Рассмотрим процедуру поиска решений данной задачи.

Алгоритм начинает работу с некоторого допустимого потока по некоторому пути от истока к стоку. Затем выполняется процедура расстановки пометок, с помощью которой выбирают другой возможный путь, увеличивающий существующий поток. Вершины будем рассматривать как промежуточные пункты передачи потока, а дуги как распределительные каналы.

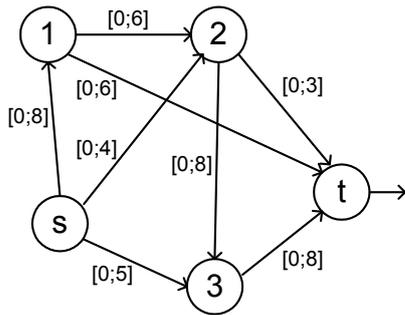
Введем два понятия «пометка» и «аугментальный путь». Пометка узла используется для указания величины потока, поступающего в него, и его источника, вызывающего изменения текущей величины потока по дуге, соединяющей этот источник с рассматриваемой вершиной. Если  $q_j$  единиц потока посылается из узла  $i$  в узел  $j$  и вызывает увеличение потока по этой дуге, то будем говорить, что узел  $j$  помечается из узла  $i$  символом  $+q_j$ . В данном случае узлу  $j$  приписывается пометка  $[+q_j, i]$ , а если поток уменьшается, то  $[-q_j, i]$ . Если поток направлен против стрелки, то дуга называется обратной. Если дуга  $(i, j)$  прямая, то поток по ней увеличивается и оставшаяся пропускная способность будет изменена. Узлу  $j$  приписывается пометка, после того как узел  $i$  уже помечен.

Аугментальный путь потока из  $S$  в  $t$  определяется как последовательность прямых и обратных дуг, по которым из  $S$  в  $t$  можно еще послать некоторый поток. В процессе расчетов потоки по прямым дугам увеличиваются до максимальной пропускной способности, а по обратным уменьшаются, не становясь при этом отрицательными. Пусть  $(i, j)$  — дуга. Когда поток по этой дуге можно увеличить? Предположим, что дуге  $(i, j)$  уже приписан поток  $F_{ij} > 0$  ( $F_{ij} < R_{ij}$ ). Отметим, что в узел  $j$  можно передать столько единиц потока, сколько их добавилось в узел  $i$ . Следовательно, поток по прямой дуге  $(i, j)$  можно увеличить на величину  $q_j$ , где  $q_j = \min[q_i, R_{ij} - F_{ij}]$ . Действительно, в вершину  $j$  поступит поток из вершины  $i$  равный  $q_i$  в том случае, если он меньше остаточной пропускной способности  $(R_{ij} - F_{ij})$  или равен ей.

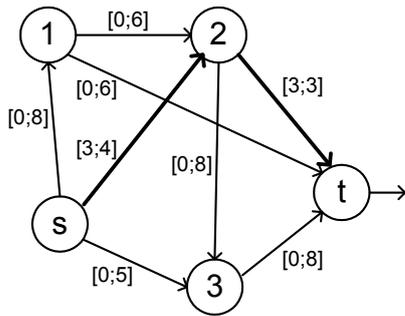
Рассмотрим работу данного алгоритма на примере сети, изображенной на рис. 3.23 с ограниченными способностями в дугах. В исходной сети на дугах стоят пометки из двух чисел, из которых первое — поток по дуге, второе — пропускная способность  $(R_{ij})$ . Вначале потоки в дугах равны нулю.

На первом шаге выберем один из возможных аугментальных путей и вычислим пометки для вершин. Выберем путь  $\{s-2-t\}$  и поставим пометки в вершинах:  $s[\infty, -]$  (исток  $s$  получает сколько угодно по величине поток из вне);  $2[+4, s]$  (вторая вершина получит поток  $+4$  из вершины  $s$ );  $t[+3, 2]$  (в сток  $t$  поступит из вершины под номером 2 поток  $+3$ ).  $P_1 = 3$ .

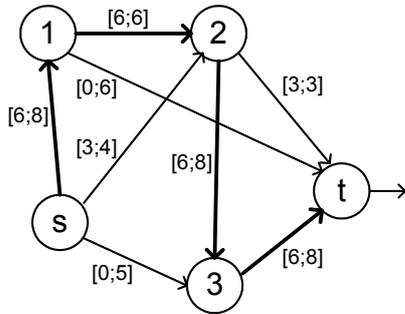
Таким образом, на первом шаге поток на выходе составил 3 единицы. Заменяем пометки в дугах на новые: вместо нуля — 3, констатируя факт возрастания потока в сети на три единицы (см. рис. 3.22). Итерационный процесс реализации алгоритма максимального потока показан на рис. 3.23. Алгоритм заканчивает свою работу на третьем шаге, так как более не существует аугментальных путей. Суммарный поток по сети будет равен:  $\sum P_i = 3 + 2 + 6 + 2 = 13$  единицам.



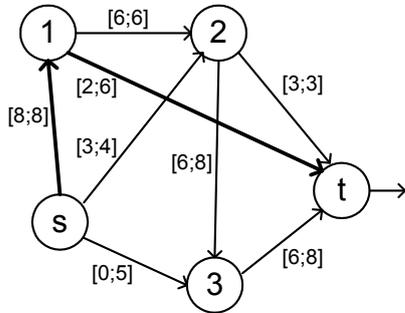
Исходная сеть с заданными пропускными способностями в дугах



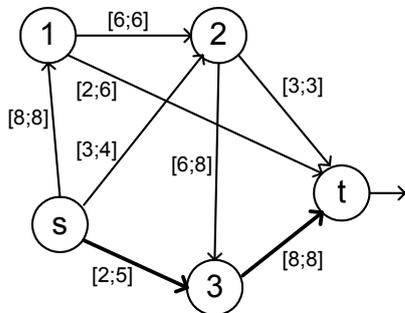
Шаг 1. Выберем аугментальный путь  $\{s-2-t\}$  и поставим пометки в вершинах:  
 $s[\infty, -]$  (исток  $s$  получает сколько угодно по величине поток из вне);  
 $2[+4, s]$  (вторая вершина получит поток +4 из вершины  $s$ );  
 $t[+3, 2]$  (в сток  $t$  поступит из вершины под номером 2 поток +3),  $P_1 = 3$ .



Шаг 2. Путь  $\{s-1-2-3-t\}$ .  
 Пометки в вершинах:  
 $s[\infty, -]$ ,  
 $1[+8, s]$ ,  
 $2[+6, 1]$ ,  
 $3[+6, 2]$ ,  
 $t[+6, 3]$ ,  $P_2 = 6$ .



Шаг 3. Путь  $\{s-1-t\}$ .  
 Пометки в вершинах:  
 $s[\infty, -]$ ,  
 $1[+2, s]$ ,  
 $t[+2, 2]$ ,  $P_3 = 2$ .



Шаг 4. Путь  $\{s-3-t\}$ .  
 Пометки в вершинах:  
 $s[\infty, -]$ ,  
 $3[+5, s]$ ,  
 $t[+2, 3]$ ,  $P_4 = 2$ .

Рис. 3.23. Пошаговый процесс реализации алгоритма максимального потока

После определения максимально возможного потока по сети следует обратить внимание на пометки в дугах, несущих информацию об их загруженности. Из рис. 3.23 для шага 4 следует, что некоторые дуги используются частично, так как имеют отличную от нуля остаточную пропускную способность. Это означает, что если ставится задача только лишь об обеспечении условий максимальности потока на выходе, то пропускные способности дуг должны быть изменены с целью экономии средств.

### 3.4.6. Пример применения алгоритма максимального потока. Проектирование централизованной водоочистой станции

Рассмотрим пример использования алгоритма о максимальном потоке с применением программы, реализующей метод аугментальных путей. На водоочистную станцию поступают сточные воды с девяти насосных подстанций, расположенных в городе (рис. 3.24).

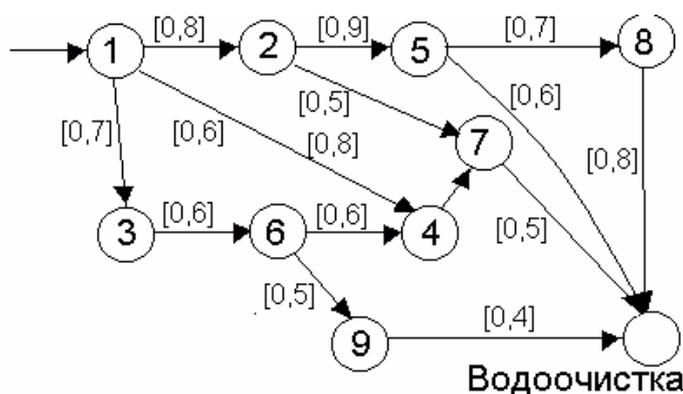


Рис. 3.24. Ориентированная сеть для задачи водоочистой станции

Разрабатывается проект перестройки города. В результате реализации этого проекта в существующую очистную систему дополнительно будет поступать большой объем сточных вод. Задача состоит в определении максимального объема сточных вод, который может проходить через систему при существующем оборудовании. Программа задачи о максимальном потоке входит в состав пакета сетевой оптимизации (см. прил. 1) и применяется при поддержке принятия решений. Решим эту задачу с помощью этой программы. Исходные данные и результаты алгоритма показаны в окне ввода вывода программы (рис. 3.25).

Итогом является возможный поток равный 15 единицам (см. рис. 3.25). Результаты в правой части окна свидетельствуют о том, что некоторые дуги остались без потоков. Это является дополнительной информацией для проектировщиков сети коммуникаций, а значение максимального потока, который должно обеспечить водоочистное сооружение, является главной информацией, необходимой для определения мощности станции.

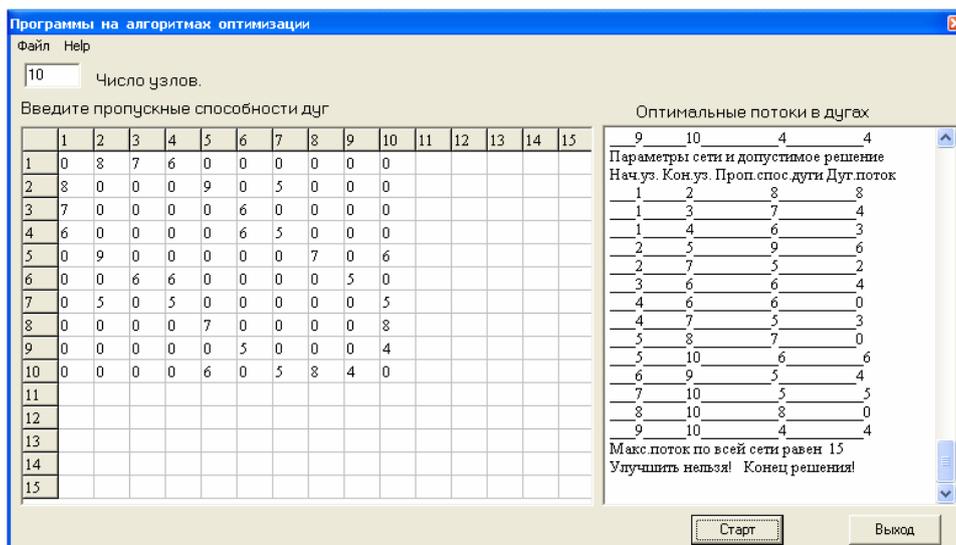


Рис. 3.25. Окно алгоритма задачи о максимальном потоке

### 3.4.7. Многополюсная кратчайшая цепь

В строительной практике и в системном анализе коммуникационных структур при выборе оптимальных вариантов требуется оценивать возможные трассировки маршрутов между различными парами объектов (поставка товаров, передача информации по коммуникационным сетям и т. д.), т. е. решать задачу о так называемой многополюсной кратчайшей цепи. Принятие решений о планах перевозок грузов с минимальными затратами — одна из важнейших задач экономики решается с помощью алгоритма многополюсной кратчайшей цепи. В таких задачах ставятся условия минимальных затрат при общении поставщиков с потребителями. Проблемы закрепления поставщиков за потребителями требуют знаний о расстояниях между ними, их геометрическом расположении и маршрутах (путях) между каждой парой «поставщик — потребитель».

Между каждой парой узлов, представленных на графе (рис. 3.26), существует множество возможных путей, каждый из которых имеет свою стоимость. ЛПР необходимо определить оптимальные маршруты между всеми парами вершин с минимальной стоимостью.

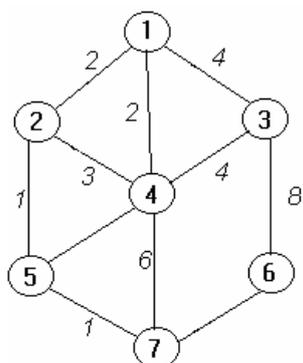


Рис. 3.26. Исходный граф для задачи о многополюсной кратчайшей цепи

Таким образом, ставится задача отыскания кратчайших путей между каждой парой вершин графа. Алгоритм начинает свою работу с выбора вершины и вычисления кратчайших расстояний всех остальных до нее в следующей последовательности:

1. Выбираем произвольную вершину  $M$ , до которой надо найти расстояние от всех остальных. Записываем пометку «0» для этой вершины, так как расстояние до нее самой равно нулю.

2. Для соседних с выбранной вершиной узлов записываем их пометки, равные расстоянию до нее, а на дугах ставим стрелки в сторону вершины  $M$ .

3. Помечаем вершину  $M$  значком «\*», имея в виду, что операции над вершиной  $M$  закончены.

4. Рассматриваем соседние вершины и ставим пометки для всех вершин, связанных с ними. Пометки вычисляются как сумма  $d_{ij} = d_j + a_{ij}$ , где  $d_j$  — пометка вершины, через которую продвигаемся к  $M$  (она уже подсчитана);  $a_{ij}$  — расстояние до рассматриваемой вершины. После обработки всех соседних вершин она помечается знаком «\*».

5. Продолжаем расстановку пометок до конца графа. Если в процессе обработки окажется, что пометка улучшена (принимает меньшее значение, чем было ранее) и обработана, т. е. имеет знак «\*», то проводим пересчет пометок всех вершин, инцидентных ей. Реализуем описанный выше алгоритм для графа, приведенного на рис. 3.27.

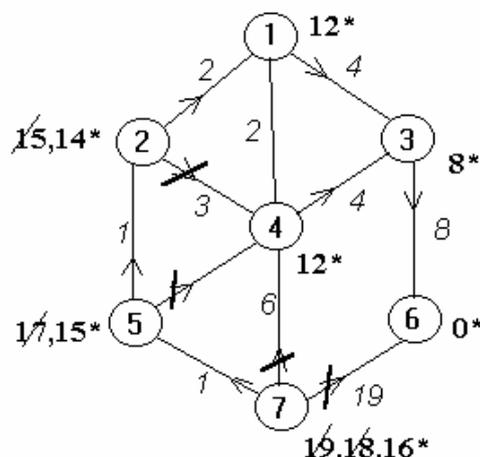


Рис. 3.27. Реализация алгоритма многополюсной кратчайшей цепи

1. За исходную вершину выберем шестую и припишем ей пометку «0\*». На дугах, ведущих к инцидентным с ней вершинам, поставим стрелки, а рядом с номерами вершин запишем их пометки, вычисленные по формуле  $d_{i6} = d_6 + a_{i6}$ . Для вершин 3 и 7 получим  $d_{36} = d_6 + a_{36} = 0 + 8$ ,  $d_{76} = d_6 + a_{76} = 0 + 19 = 19$ . Запишем полученные пометки рядом с рассматриваемыми вершинами и поставим стрелки из этих вершин в сторону вершины 6. Далее вычислим пометки для соседних вершин по такому же правилу.

2. Вершина 3 имеет две соседних вершины 4 и 1 с пометками  $d_{43} = d_3 + a_{43} = 8 + 4 = 12$ ,  $d_{13} = d_{36} + a_{13} = 8 + 4 = 12$ . Расставим на графе пометки, стрелки-направления, через которые получены последние оценки пометок, и пометим вершину 3 пометкой «\*», констатируя тот факт, что операции над этой вершиной закончены.

3. Вершина 4 имеет соседей 7, 5, 2 и 1. Вычислим пометку для седьмой вершины:  $d_{74} = d_4 + a_{74} = 12 + 6 = 18 < 19$ . Пометка улучшена, следовательно, изменим ее и направление стрелки. Далее  $d_{54} = d_4 + a_{54} = 12 + 5 = 17$ . Ставим стрелку в сторону четвертой вершины и записываем рядом с пятой вершиной пометку «17». Аналогично вычисляем для остальных вершин:  $d_{24} = d_4 + a_{24} = 12 + 3 = 15$ ,  $d_{14} = d_4 + a_{14} = 12 + 2 = 14 > 12$ . У второй вершины ранее не было пометки, следовательно, приписываем число 15 и изменяем направления стрелки в сторону вершины 4. Для первой вершины пометка не улучшена, оставляем прежнюю.

4. Вершина 1. У этой вершины всего три соседа: 4, 2 и 3; получим  $d_{21} = d_1 + a_{21} = 14 < 15$  (пометка улучшена!). Пересчитаем пометки вершин, которые являются ее соседями:  $d_{41} = d_1 + a_{41} = 12 + 2 = 14 > 12$  и  $d_{31} = d_1 + a_{31} = 12 + 4 = 16 > 8$ . Третью вершину пометим «\*», так как все инцидентные ей вершины обработаны.

5. Вершина 7. Здесь соседние вершины 5 и 4. Вычислим их пометки:  $d_{57} = d_7 + a_{57} = 18 + 1 > 17$ ,  $d_{47} = d_7 + a_{47} = 18 + 6 = 24 > 12$ . Вершину 7 помечаем «\*».

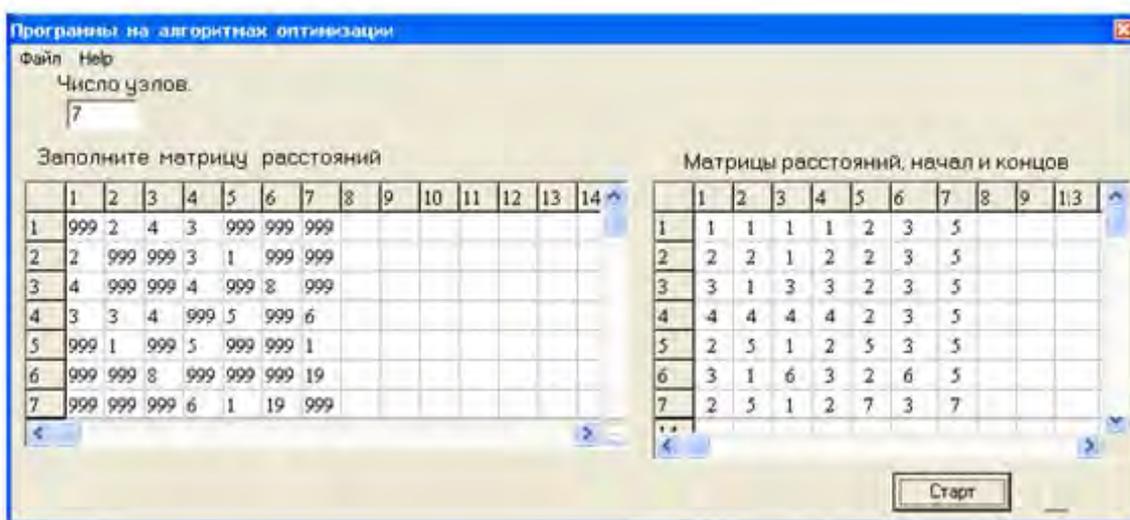
6. Вершина 5. Она еще не помечена. Для вершин 2, 4 и 7 вычислим пометки:  $d_{25} = d_5 + a_{25} = 17 + 1 = 18 > 14$ ,  $d_{45} = d_5 + a_{45} = 17 + 5 = 22 > 12$ . Помечаем вершину 5.

7. Вершина 2. Проведем вычисления пометок для ее соседей 5, 4 и 1:  $d_{52} = d_2 + a_{52} = 14 + 1 = 15 < 17$ . Внимание! Вершина 5 улучшила пометку и ранее уже была помеченной. Следовательно, надо пересчитать пометки всех соседних с ней вершин. Для второй и четвертой вершин пометки не улучшаются от изменения пометки пятой, оставляем их без изменения. У седьмой вершины в результате улучшения пометки пятой вершины также улучшена пометка  $d_{75} = d_5 + a_{75} = 15 + 1 = 16 < 18$ . Изменим направление стрелки у седьмой вершины и поставим новую пометку. Так как вершина 7 была помечена, то пересчитаем пометки у ее соседей. Они не изменились. На данном этапе алгоритма мы обрабатываем вершину 2 и ее соседние вершины. Перейдем к вершине 4:  $d_{42} = d_{21} + a_{42} = 14 + 3 = 17 > 12$ . Для вершины 1 имеем  $d_{12} = d_2 + a_{12} = 14 + 2 = 16 > 12$ . Вершину 2 помечаем «\*».

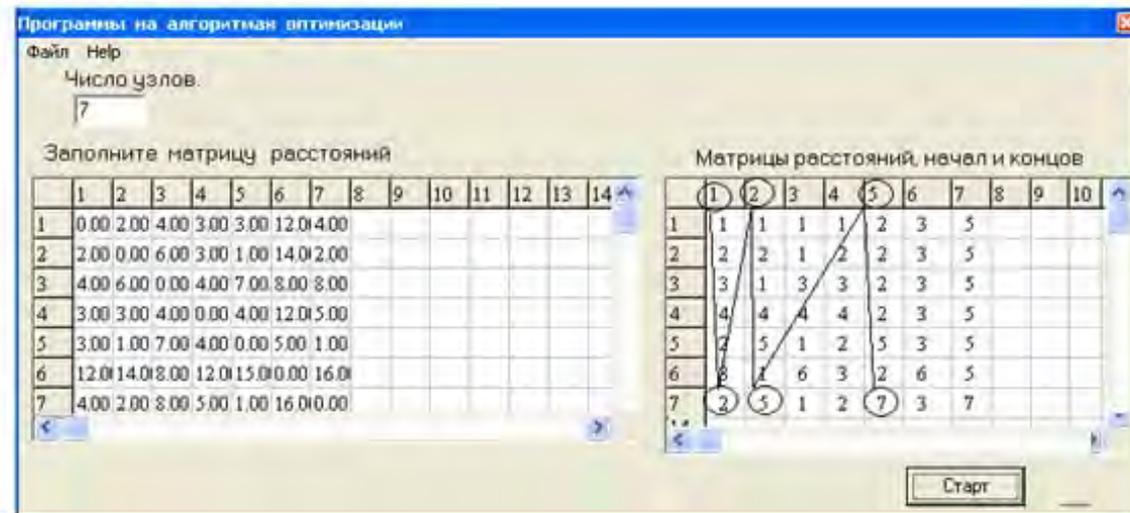
8. Вершина 1. Это последняя вершина алгоритма. Вычислим пометки соседних вершин 2, 4 и 3:  $d_{21} = d_1 + a_{21} = 12 + 2 = 14$ ,  $d_{41} = d_1 + a_{41} = 12 + 2 > 12$ ,  $d_{31} = d_1 + a_{31} = 12 + 4 = 16 > 8$ . Пометим вершину 1 «\*».

Все вершины помечены. Конец алгоритма. Результатом его работы явилось некоторое построение на исходном графе, которое позволяет определять кратчайшие маршруты всех вершин до рассмотренной вершины под номером 6. Кратчайший путь от 2-й — последовательность дуг 2—1—3—6, от 7-й — 7—2—1—3—6 и т. д.

Продемонстрируем рассмотренный алгоритм на ЭВМ, входящий в состав электронного учебника (см. прил. 1). Ввод-вывод данных осуществляется в двух матрицах (рис. 3.28). Слева вначале заполняется матрица смежности с расстояниями между ближайшими соседями, правая матрица пока пуста.



а



б

Рис. 3.28. Пакет сетевой оптимизации для решения задачи о многополюсной кратчайшей цепи: а — ввод исходных данных; б — результаты расчетов; слева — матрица расстояний между вершинами; справа — матрица начал и концов, указывающая оптимальные маршруты

После расчета левая матрица заполняется значениями рассчитанных кратчайших расстояний между вершинами, а правая матрица, так называемая матрица начал и концов, определяет кратчайшие маршруты (последовательность вершин и дуг) между каждой парой узлов на сети, что, собственно, и является целью алгоритма. На рис. 3.28 схематически показано, как определять маршруты между вершинами. Приведен пример определения оптимального маршрута между первой и седьмой вершинами. Выбрав вершину под номером 1, «спускаемся» по ее столбцу вниз до вершины 7 и видим, что в этом столбце в седьмой строке находится вершина под номером 2. Возвращаемся к вершине 2 и снова пытаемся прийти в вершину 7. Попадаем в пятую. И, наконец, в седьмую из пятой. Таким образом, маршрут состоит из последовательности 1—2—5—7 на расстоянии 4 единицы, показанном в левой матрице, которая была заполнена заново. Для примера, решенного вручную (см. рис. 3.27), можно сравнить результаты с компьютерными расчетами до шестой вершины. Из матрицы начал и концов маршрутов до шестой вершины находим последовательности вершин, ведущих из первой: 1—3—6; для второй: 2—1—3—6; для пятой: 5—2—1—3—6: что полностью совпадает с маршрутами на рис. 3.27.

### 3.4.8. Задача коммивояжера

Формулировка задачи: коммивояжер должен выехать из заданного города, побывать в каждом из остальных ( $n - 1$ ) городах ровно один раз и вернуться домой. Задача заключается в определении такой последовательности объезда городов, при которой коммивояжеру требуется проехать наименьшее расстояние. Вместо длины пути можно рассматривать любые другие критерии эффективности, такие как стоимость, время и т. д. Можно показать, что всего существует  $(n - 1)!$  возможных маршрута.

Рассмотрим алгоритм решения под названием «метод ветвей и границ». Вначале определяется некоторое допустимое решение, после чего множество всех оставшихся маршрутов разбивается на все более мелкие подмножества, с вычислением нижней границы (минимум стоимости маршрута); так вычисляются все маршруты с определением их нижних границ и последовательно отбрасываются маршруты, превышающие по стоимости текущую нижнюю границу. Отказ от маршрутов осуществляется методом ветвления, основанном на сравнении текущих нижних границ. Если на некоторой итерации нижняя граница маршрутов из одного подмножества превосходит нижнюю границу другого подмножества, то первое подмножество можно исключить, т. е. ветвление из соответствующего узла не производится. Мы не будем конкретизировать работу алгоритма, реализацию которого осуществит готовая программа пакета электронного пособия. Однако основную идею метода вы должны представлять. Кроме задачи коммивояжера метод ветвей применяется во многих прикладных задачах, связанных с составлением расписаний.

Рассмотрим пример применения алгоритма ветвей и границ с применением программы, реализованной на этом методе. В прил. 1 приведены примеры оптимизационных задач в пакете сетевой оптимизации, который сопровождает лабораторный практикум по системному анализу. Программа для задачи коммивояжера также входит в этот пакет и применяется при решении задач принятия оптимальных решений в поиске оптимальных маршрутов доставки. Суть примера состоит в том, чтобы решить задачу коммивояжера, в которой число городов равно 6, а время (в часах) проезда из города  $i$  в город  $j$  задается матрицей стоимостей, представленной ниже.

	1	2	3	4	5	6
1	—	7	43	15	30	26
2	7	—	16	11	30	25
3	20	13	—	35	5	10
4	21	16	25	—	18	18
5	12	46	27	48	—	5
6	23	5	5	9	5	—

Реализация на ЭВМ показана на рис. 3.29.

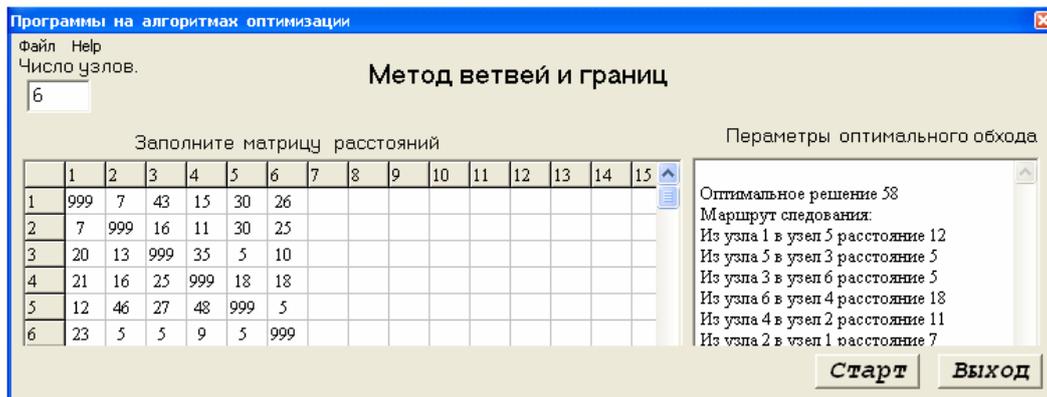


Рис. 3.29. Окно программы для решения задачи коммивояжера

Задача решена. Минимальная стоимость объезда шести городов с заданной матрицей равна 58 часов с последовательностью вершин: 1—5—3—6—4—2—1.

### Вопросы и задания

1. Почему удобно использовать графы для описания структуры систем? Дайте определение графа и его основных свойств.
2. Для графа, изображенного на рис. 3.18, составьте матрицы смежности и расстояний.
3. Постройте граф, отражающий технологический процесс строительства жилого дома. Составьте математическое описание полученного графа в виде матриц расстояний, смежности и инцидентий. Вы получите матрицы с большим количеством нулей — разреженные матрицы. Придумайте другой способ, более экономичный для ввода информации о графе в ЭВМ.

### 3. Дискретные модели и оптимальные решения

4. В этой главе был описан вариант алгоритма кратчайшего пути, в котором предполагается, что все параметры дуг неотрицательные. Модифицируйте данный алгоритм таким образом, чтобы он был применим к сетям, содержащим дуги с отрицательными параметрами. Какое условие в данном случае имеет решающее значение?

5. Какие алгоритмы называются поглощающими?

6. Чему равно число возможных покрытий на множестве из  $N$  вершин?

7. Определите диаметр структуры графа, изображенного на рис. 3.30.

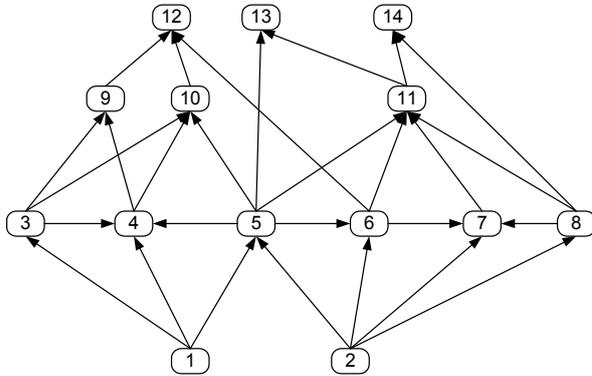


Рис. 3.30. Орграф для задания 7

8. Сколько возможных маршрутов в задаче коммивояжера?

9. Приведите примеры возможного использования алгоритмов сетевой оптимизации на практике.

10. Приведите несколько примеров практического использования задачи о пути максимальной длины, когда она может быть сведена к эквивалентной задаче о кратчайшем пути.

11. Постройте минимальные остовые деревья для графов, изображенных на рис. 3.31.

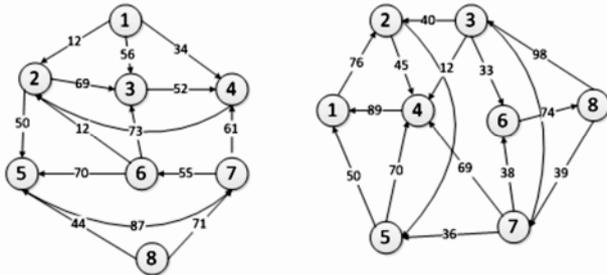


Рис. 3.31. Орграф для задания 11

12. Используя алгоритм кратчайшего пути, найдите кратчайший путь из узла 1 в узел 10 графа, изображенного на рис. 3.32.

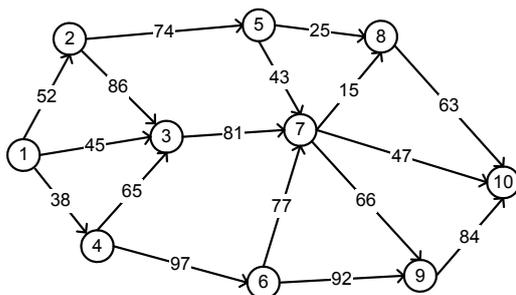


Рис. 3.32. Орграф для задания 12

13. Промышленная компания планирует производство кондиционеров, состоящих из трех основных частей: корпуса, вентилятора и мотора. Затраты на оборудование предприятия станками, производящими корпуса, вентиляторы и моторы, составляют 20 000, 50 000 и 80 000 \$ соответственно. Однако если вначале наладить выпуск вентиляторов, то затраты на оборудование предприятия станками, производящими корпуса и моторы, будут уменьшены на 5 %. Если вначале пустить в производство моторы, то затраты на оснащение предприятия станками двух других типов уменьшатся на 10 %. Если же в первую очередь будет налажен выпуск корпусов, то остальные затраты уменьшатся на 5 %. После того как будет налажен выпуск двух компонентов, затраты на производство третьего дополнительно уменьшатся на 5 %. Построить сеть с одним источником и одним стоком. Указать, чему соответствуют узлы, дуги и параметры дуг. Сформулировать и решить соответствующую задачу о кратчайшем пути.

14. Найти кратчайший путь между каждой парой узлов сети, приведенной на рис. 3.33.

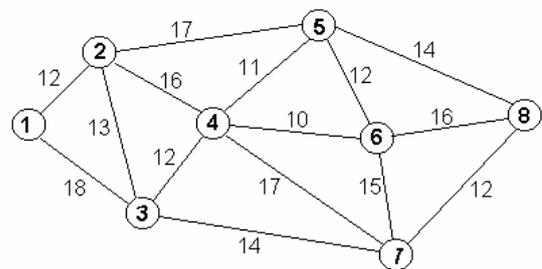


Рис. 3.33. Неориентированная сеть для задания 14

15. Директор некоторой фирмы намеревается вложить 12 000 \$ в осуществление трех проектов. Минимальные суммы, которые он должен вложить в эти проекты, составляют 3000, 2000 и 1000 \$ соответственно. Сверх указанных сумм можно дополнительно вкладывать любые суммы, кратные 1000 \$. Построить сетевую модель для данной задачи.

16. Решить задачу коммивояжера, в которой число городов равно 6, а плата (в долл.) за проезд из одного  $i$ -го в город  $j$ -й задается нижеследующей матрицей расстояний.

	1	2	3	4	5	6
1	—	27	43	16	30	26
2	27	—	16	11	30	25
3	43	16	—	35	15	2
4	16	11	35	—	18	18
5	30	30	15	18	—	5
6	26	25	2	18	5	—

17. Рассмотрим одно из промышленных предприятий г. Волгограда, в котором три цеха (формовка, окраска и сборка), между ними имеются дороги и подъездные пути. Расстояния между пунктами заданы в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Данные для задания 17

Дуга ( $i, j$ )	1,2	1,3	1,4	2,3	3,4	4,5	4,7	5,6	6,7
Расстояние, м	40	90	120	90	80	70	80	60	140

В цехах расположены шесть заводских контор (узлы 2, 3, 4, 5, 6 и 7), в которых следует вести уборку в третью смену. Уборочная машина со всем инвентарем для уборки помещений находится в пункте 1. Инженер-технолог, выполняющий работу по учету

### 3. Дискретные модели и оптимальные решения

постоянных издержек, с помощью нормативного справочника определил время, необходимое для уборки контор и перехода из одной конторы в другую, и решил, что необходимо исследовать возможность использования внешних дорог. Правила техники безопасности ограничивают скорость передвижения уборочной машины по внутренним дорогам до 6 км/ч, а по внешним можно передвигаться со скоростью 10,9 км/ч. В табл. 3.3 указаны дополнительные дороги и приведены соответствующие расстояния.

Таблица 3.3

Дополнительные данные для задания 17

Неориентированная дуга $(i, j)$	Расстояние, м	Неориентированная дуга $(i, j)$	Расстояние, м
(1,4)	140	(3,5)	190
(1,7)	180	(4,6)	110
(6,7)	150		

Определите, изменится ли построенный ранее наиболее экономичный маршрут в результате использования новых или дополнительных дорог. Какова длина нового маршрута и время, необходимое для его прохождения?

18. Проверьте реализацию алгоритма кратчайшей цепи (рис. 3.34). Студент группы ЗИСТ пытался вычислить все возможные кратчайшие пути до седьмой вершины.

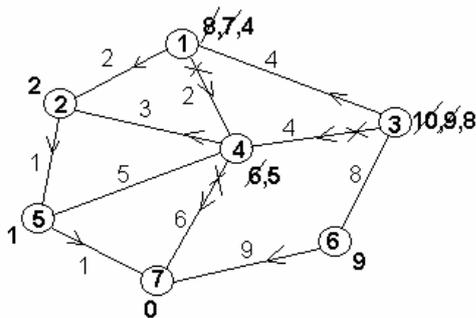


Рис. 3.34. Схема реализации алгоритма многополюсной кратчайшей цепи

19. Некоторое устройство состоит из восьми узлов. Вероятность выхода из строя каждого узла показана на рис. 3.35. Устройство работает правильно, если нормально функционирует каждый узел некоторого пути, ведущего из  $s$  в  $t$ . Предположим, что если после работы блока 1 используется блок 2, то блок 1 не может быть снова использован. Сформулировать задачу минимизации вероятности выхода устройства из строя как задачу о кратчайшем пути.

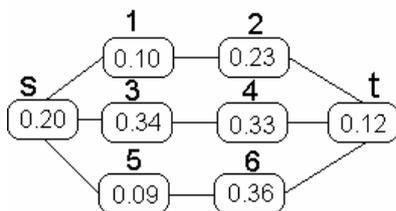


Рис. 3.35. Граф возможных состояний устройства

20. Фирма, занимающаяся прокладкой труб, доставила необходимое количество труб для сооружения водосточной системы в загородном доме (рис. 3.36). Фирме известна пропускная способность каждой трубы. Для того чтобы определить оптимальный размер еще не установленной трубы, ведущей к главной водосточной линии, и тем

самым минимизировать затраты, фирме необходимо знать максимальный объем воды, который может поступать из дома. Сетевое представление водосточной системы дома дано на схеме. Числа, приписанные дугам, указывают максимальную пропускную способность труб (л/мин).



Рис. 3.36. Сеть водоснабжения для задания 20

21. Федеральное управление автомобильных дорог планирует строительство дорог, которые соединят пять соседних областных центров. Все города должны быть соединены друг с другом либо непосредственно, либо дорогой, проходящей через другой город. Затраты (в тыс. долл.) на строительство дорог приводятся в матрице затрат. Какие дороги следует построить?

	A	B	C	D	E
A	—	10	40	60	80
B	10	—	80	70	60
C	40	80	—	20	30
D	60	70	20	—	25
E	80	60	30	25	—

22. Проект исследований и научно-технических разработок состоит из трех задач, темпы решения которых зависят от выделенной суммы (табл. 3.4). Найти наилучшую стратегию, при которой проект будет завершен не позднее, чем через 18 месяцев, а расходы не превысят \$35 000. Найти вторую наилучшую стратегию.

Таблица 3.4

Данные для задания 22

Темп	Задача A		Задача B		Задача C		Задача D	
	Длительность, мес.	Затраты, \$						
Низкий	6	6000	5	8000	6	2000	7	10 000
Средний	4	8000	3	9000	3	3000	5	12 000
Высокий	3	9000	2	10 000	1	5000	3	18 000

23. Молодой человек намеревается вложить деньги в строительный бизнес сроком на 6 лет. Он может купить акции и хранить их в течение 6 лет, или заменить их в конце пятого года новыми акциями и хранить еще один год, или же хранить акции 4 года,

### 3. Дискретные модели и оптимальные решения

затем заменить их новыми и хранить в течение пятого и последнего годов. Он может также заменять акции в конце каждого года. Сформулировать задачу в виде сетевой модели и найти оптимальное решение.

24. Фирма по проектированию погрузочно-разгрузочного оборудования планирует создать высокоскоростную систему перевозки пассажиров между шестью различными пунктами аэропорта в Волгограде. Значение каждого элемента матрицы равно расстоянию (в метрах) между соответствующей парой пунктов, вычисленному по кратчайшему пути, соединяющему их (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Данные для задания 24

Пункты	1	2	3	4	5	6
1	—	870	910	796	860	712
2	8703	—	1100	560	430	630
3	910	1100	—	270	600	250
4	796	560	270	—	300	850
5	860	430	600	300	—	370
6	712	630	250	850	370	—

1. Инструкции по технике безопасности не позволяют, чтобы пути высокоскоростной системы пересекались. Найти длину пути минимальной стоимости, имеющего форму цикла, проходящего через все пункты. Стоимость одного метра пути постоянна и равна 100 р.

2. Фирма намеревается спроектировать другую систему, в которой центральный распределительный пункт соединяется со всеми остальными пунктами путями с двусторонним движением. Устройство данной системы похоже на колесо велосипеда, а центральная станция играет роль «втулки». В табл. 3.6 даны расстояния между «втулкой» и каждым из шести пунктов.

Таблица 3.6

Дополнительные данные для задания 24

Пункты	1	2	3	4	5	6
Втулка	150	175	210	180	175	190

Составить проект системы минимальной стоимости и сравнить полученные результаты с предыдущим решением задачи.

25. Задача о транспортировке угля. Четыре шахты поставляют каменный уголь пяти газоперерабатывающим заводам, расположенным на севере РФ. Расходы на транспортировку угля, задаваемые матрицей стоимостей (в тыс. р), включают плату за его перевозку по железным и автомобильным дорогам, а также плату за погрузочно-разгрузочные работы (табл. 3.7). Построить схему транспортировки угля, имеющую минимальную стоимость.

Таблица 3.7

Данные для задания 25

Пункт назначения	Заводы					Предложение, т	
	1	2	3	4	5		
Шахты	1	10	9	8	9	7	500
	2	4	8	12	7	9	900
	3	6	3	4	2	8	700
	4	7	6	5	4	3	600
Спрос, т	400	700	400	500	700	—	

## 4. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ

*Управление и выбор. — Проблема многокритериальности. — Линейное программирование в задачах выбора. — Разработка моделей линейного программирования.*

### 4.1. Управление и выбор

Руководитель, как правило, принимает решения на основе рационального выбора наилучшего варианта из множества возможных. ЛПР в управлении сложными системами использует качественно новые методы выбора, основанные на вычислительных экспериментах, имитации, интерактивном решении формальных алгоритмов, использовании пакетов программ поддержки решений. Моделирование процессов принятия решений позволяет ЛПР не отвлекаться на несущественные детали. Вместе с тем большую роль при этом играют эвристические приемы и опыт руководителя.

Системный анализ, обобщая опыт экспертов из различных областей знаний, с помощью методологии, основанной на выявлении системности, строит математические модели, имитирует ситуацию, обрабатывает данные, получает новые. Таким образом, в целенаправленной деятельности ЛПР можно выделить два аспекта: формальный и эвристический (неформальный).

Методология системного анализа, основанная на системности любой целенаправленной деятельности, рано или поздно сталкивается с проблемой выбора на предлагаемом множестве возможных альтернатив. Выбор является действием, преследующим четко поставленную цель, и направляет деятельность человека к ее достижению. Что же такое «хороший выбор»? Будем считать, что он определяет рекомендации, как приблизиться к лучшему решению при достижении цели, а если возможно, то предложить алгоритм такого решения. Полная формализация поиска оптимального решения возможна лишь для хорошо структурированных задач (слабо

структурированные задачи формальных алгоритмов не имеют). Таким образом, системный анализ базируется на том, что лучший вариант выбора при управлении — это сочетание формальных и неформальных процедур с использованием компьютерного моделирования. В системном анализе можно определить принятие решения как некоторое действие над множеством альтернатив, в результате которого уменьшается область выбора вариантов и поиск упрощается.

Сужение области альтернатив — это продвижение к цели. Если в процессе решения остается единственный вариант, то он и будет решением. Многообразие ситуаций принятия решений в системном анализе «породило» новую методологию реализации выбора. При этом сужение множества альтернатив проводится с помощью сочетания формальных и эвристических приемов. Очень важна при этом сама цель, ради которой отбрасываются ненужные варианты. Еще раз отметим, что определение цели и правильная ее формулировка, четкая постановка задачи являются основой успешного принятия решений, быстрой реализации процедур и алгоритмов рационального выбора. Правильная формулировка цели сама по себе содержит направление ее достижения: правильно поставить задачу — наполовину решить ее. Это давно всем известное высказывание особо актуально в системном анализе.

На практике цель довольно часто указывается очень расплывчато. Как правило, интуитивно цель ясна. Это связано с желанием как-то улучшить существующее положение и уйти от проблемы. Не зная с чего начать, ЛПР еще раз обращается к сформулированной цели и пытается расчленив сложную задачу на более простые и обозримые. На первом этапе руководителю любого ранга необходимо составить структурную схему достижения цели, но ему не ясно, как это сделать.

Определение и структурирование проблемы отражается на математической модели системы, имеющей изоморфную структуру. Типы таких моделей мы рассмотрели выше. Основную и главную задачу, которая сопутствует структурированию проблемы, Т. Саати формулирует следующим образом: «... не только избежать неправильных решений, а научиться задавать «правильные» вопросы, чтобы решить именно ту проблему, которую следует» [2].

Системная концепция «правильного» вопроса и «правильной» цели при решении проблемы часто помогает выйти из тупика поиска правильных решений.

Научно обоснованные методы выбора позволяют выявить предпочтительные одних целей перед другими, решить проблему неопределенности, избежать замены цели средством. В основе таких методов лежат метод системного анализа проблемы и математическое моделирование.

Вопрос о том, какие наиболее важные факторы можно выделить в проблеме принятия решений, является весьма актуальным. Простое перечисление здесь неэффективно, поэтому мы опишем многообразие задач выбора на качественном уровне. Отметим, что множество альтернатив может быть дискретным, а может непрерывным (континуальным). Выбор типа конструкции — дискретный выбор, а решение проблемы инвестиций на долгосрочный период — континуальная задача. Распределение центром денежных средств среди предприятий — дискретная задача, а долгосрочный прогноз экологического состояния биосферы решается с помощью непрерывных функций. Оценка выбора может осуществляться по одному или множеству критериев. При этом критерии могут быть количественные, а могут быть и качественные. К количественным можно отнести эффективность производства, вес конструкции, цену на товар и другие, к качественным — комфорт офиса, внешний вид фасада здания, цвет автомобиля, моральный климат в коллективе и т. д. Процесс выбора можно проводить однократно или с помощью интерактивной итерационной процедуры, учитывая результаты предыдущего решения. Последствия выбора могут быть детерминированными или носить вероятностный характер. Кроме этого, имеется неопределенность, связанная с множеством возможных альтернатив, удовлетворяющих в целом поставленную цель. И наконец, выбор может быть индивидуальным или групповым. При этом ответственность за результат распределяется по-разному среди лиц, участвующих в принятии решений.

Различные сочетания перечисленных факторов образуют множество, на котором определяется многообразие приемов и задач выбора. Системы преследуют определенные цели, удовлетворяющие потребности различных слоев общества. Понятие цели в системном анализе вводится для того, чтобы получить возможность сравнивать системы между собой по степени предпочтительности.

Определим более четко само понятие цели. Цель — это желаемый результат. Естественно предположить, что этот результат имеет материальное происхождение, т. е. является материальным. Будем считать, что одна система лучше другой тогда, когда она в большей степени соответствует своему целевому назначению (имеется в виду, что цели систем одинаковые). Формирование и формулировка целей проходит через этап квантификации: исходную цель разбивают на совокупность более частных, простых и конкретных.

Последовательная квантификация порождает многоуровневое иерархическое дерево целей, каждый уровень которого отвечает на соответствующий ему вопрос. Приведем пример. Специалистам, сформулировавшим исходную цель, задают такие вопросы: «Как вы понимаете смысл данной цели? Какие требования должны выполняться? Сколько возможных

вариантов для выбора?» и т. д. Таким образом, получают некоторое множество целей, которые располагаются по иерархическому принципу. В элементарном виде иерархия строится от главной цели через промежуточные уровни (критерии), от которых зависят последующие уровни, к самому низкому уровню — перечню вариантов (альтернатив).

При сравнении моделей систем, отвечающих одной и той же цели, нужно уметь их оценивать. Для такой оценки введем понятие измеримости целей [3].

Пусть на некотором множестве систем, имеющих целевое назначение, лицо, принимающее решение, определяет соответствие двух систем  $S_1$  и  $S_2$  путем сравнения и устанавливает следующее из четырех соотношений:

- а)  $S_1 \succ S_2$  —  $S_1$  предпочтительнее  $S_2$ ;
- б)  $S_1 \prec S_2$  —  $S_1$  менее предпочтительнее  $S_2$ ;
- в)  $S_1 \sim S_2$  —  $S_1$  эквивалентно  $S_2$ ;
- г)  $S_1 \infty S_2$  —  $S_1$  несоизмеримо с  $S_2$ .

Если для сформулированной цели имеют место эти соотношения, то цель называется измеримой. Только для таких целей возможно сравнение систем по степени предпочтительности и осуществление поиска лучших систем.

Рассмотрим цель: создать предприятие, приносящее ежегодную прибыль 1 млн. дол. Обозначим эту цель  $C_1$ . Это настолько общая формулировка, что нельзя судить даже об основных направлениях, в которых следует продвигаться при проектировании системы. Выявив эти направления, получим второй уровень иерархии целей ( $C_2, C_3, C_4, C_5$ ). Пусть это будут подцели, отвечающие на вопрос: «В какой отрасли производства будем работать?» ( $C_2$  — сельское хозяйство,  $C_3$  — легкая промышленность,  $C_4$  — тяжелая промышленность,  $C_5$  — военно-промышленный комплекс). Далее следуют элементы третьего уровня, на котором можно рассмотреть конкретные виды продукции для производства в каждом виде отрасли. Для сельского хозяйства, например, это молоко, яйцо ( $C_6, C_7$ ), легкой промышленности — товары быта и парфюмерные изделия ( $C_8, C_9$ ) и т. д.

На рис. 4.1 изображена иерархическая структура рассмотренного примера в виде графа.

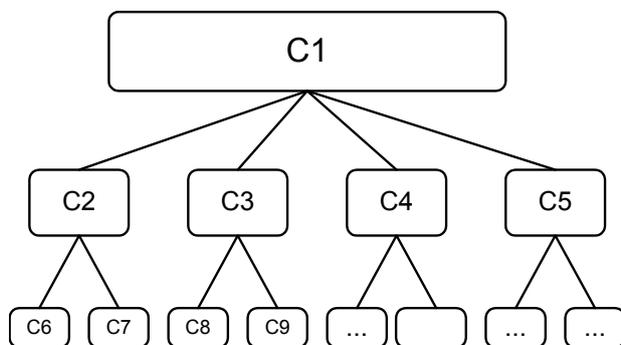


Рис. 4.1. Дерево целей, где проблема разбивается на подцели

Опираясь на дерево целей, ЛПР представляет поставленную задачу более четко и ищет способы ее решения. Любой поиск в итоге приводит к построению многоуровневого дерева целей, аналогичного тому, что мы получили в рассмотренном примере. Далее мы рассмотрим последовательно и детально процедуры системного анализа при решении задач выбора при поиске оптимального управления с примерами из практики строительного бизнеса.

## 4.2. Проблема многокритериальности

### 4.2.1. Общая постановка

При решении задач выбора приходится сравнивать предлагаемые варианты. Их сравнение посредством численной оценки является наиболее эффективным и надежным способом. Таким образом, если объект можно описать каким-то числом и это описание объективно (имеет физический смысл), то сравнение будет также объективным или, как говорят, формальным. Системный анализ при декомпозиции проблемы «доводит» структуру системы до уровня численного описания ее элементов.

Свойства объектов, для которых существуют количественные характеристики, будем называть **критериями**. Критерии, кроме того, участвуют в определении целевой функции и служат мерой достижения цели. Если какие-либо стороны элементов системы нельзя описать числом (запах, комфорт, цвет и т. д.), то ЛПР вводит искусственные оценки числа баллов с помощью шкалы предпочтений [9, 11].

Приведем примеры критериального описания проблемы. Т. Саати, основатель аналитического планирования и метода анализа иерархий, приводит результаты разработанной некоторым коллективом экспертов системы, целью которой являлось предсказание будущего для высшего образования в США. Проблема формулировалась так: развитие высшего образования в США (1982—2000). Были выявлены подцели первого уровня иерархии в виде сценариев:

- 1) проекция настоящего на будущее (прогноз);
- 2) ориентация на приобретение профессиональных навыков;
- 3) образование для всех (всеобщее образование);
- 4) образование для избранных (для тех, у кого есть деньги или исключительные способности);
- 5) ориентация на применение современных средств обучения.

В обсуждении участвовали преподаватели и студенты. При ответе на поставленные вопросы учитывались критерии: экономические, политические, социальные и технологические. Они определили первый уровень.

Каждый тип акторов (лиц, принимающих участие в обсуждении) характеризовался своим набором критериев (рис. 4.2). Для студентов, например, это были профессиональное обучение, самообразование, социальный статус.

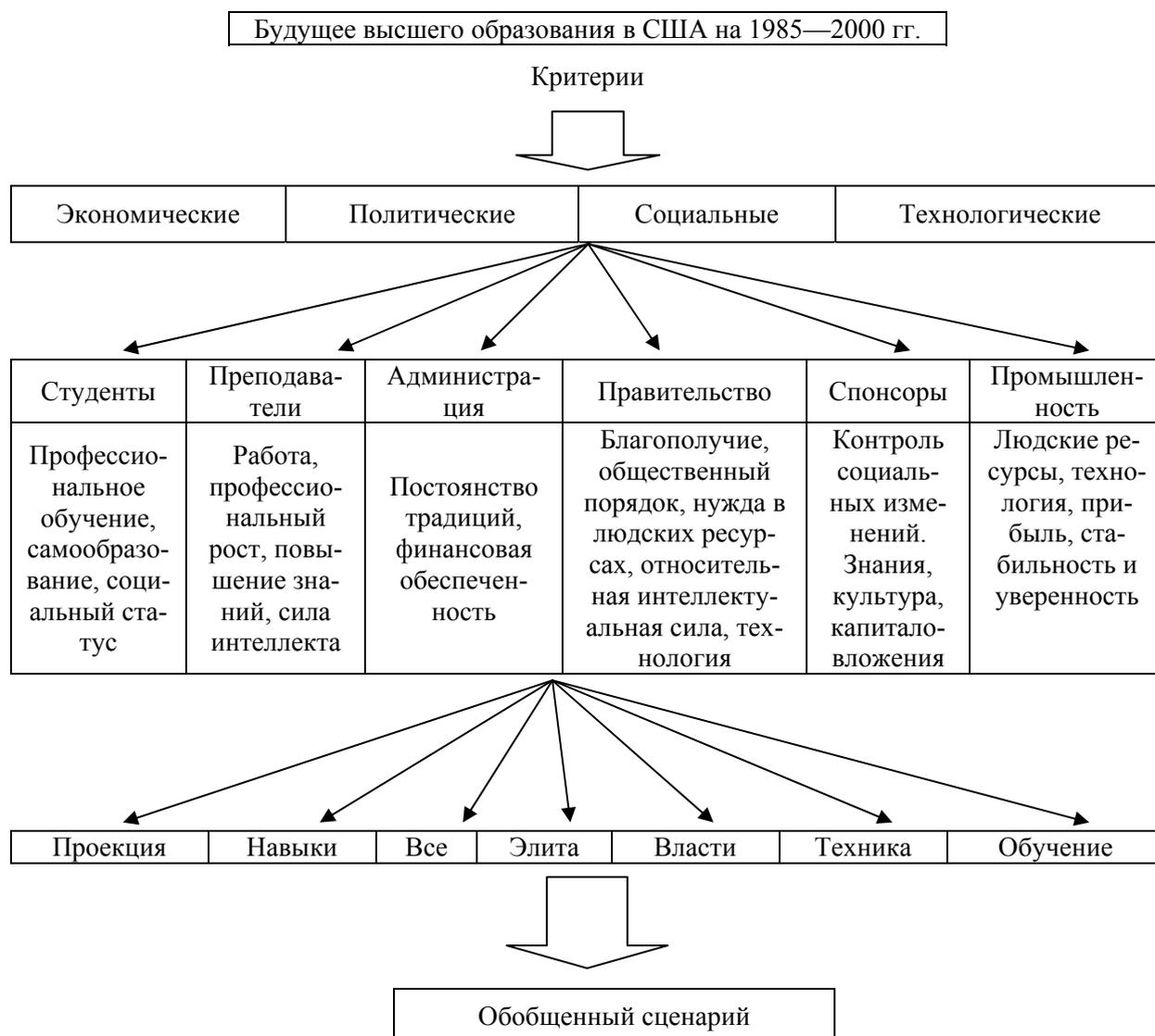


Рис. 4.2. Структура системы аналитического прогноза высшего образования в США [2]

В данном случае критериальный язык описания проблемы предполагает подцели каждого из участников. После постановки цели (целей) и разработки структуры иерархии моделируемой проблемы ЛПР стоит перед новой проблемой: как реализовать эту модель. В процессе достижения цели ЛПР управляет системой, и от того, как он действует, зависит его успех. При этом необходимо учитывать множество критериев с различными уровнями важности. Если управление системой осуществляется одним лицом или центром, то такая задача называется задачей с управлением.

Когда в управлении участвуют несколько лиц, то задача носит конфликтный характер в виде игры, а стороны, принимающие решения, являются игроками. При этом каждый игрок может принять любое решение на допустимом множестве. Поведение игроков определяется их стратегиями и зависит от управлений других игроков. Размерность множества стратегий в игровой задаче при переходе к многокритериальной проблеме резко возрастает.

Проблема принятия решения в сложной системе заключается в том, что из множества вариантов решения (допустимых альтернатив) необходимо выделить такое подмножество, которое предпочтительнее остальных. Принцип оптимальности — это правило, с помощью которого устанавливается предпочтительность одного решения на множестве допустимых.

Многокритериальность задач системного анализа является, скорее, правилом, чем исключением. Большинство проблем управления связано со сложными межэлементными связями внутри системы и между системами. Естественно, при этом требуется учитывать качественно разнородные характеристики объектов и видов их взаимодействий.

В рамках программы «Человек и биосфера» [14] была поставлена и решена задача высокогорной деревни Обергуль в Австрии [2]. Экологическая безопасность этого туристского места была нарушена строительством гостиниц и подъемников, резким увеличением числа людей и транспортных потоков. Появилась опасность, что деревня Обергуль потеряет свою туристскую востребованность.

На рис. 4.3 изображен упрощенный граф математической модели Обергуля, в разработке которой участвовали ученые разных стран и специальностей: метеорологи, ботаники, зоологи, микробиологи, экономисты, географы, социологи. На нем показано, как изменение какого-либо одного компонента может зачастую оказать неожиданное воздействие на другие компоненты. Как средство достижения цели критерий является фактором весомости доказательства истинности принимаемых решений, так как оценивает меру приближения к желаемому результату конкретным числом.

Когда сравнение альтернатив производится с учетом нескольких критериев, возникает проблема формального сравнения: какая альтернатива лучше? Часто бывает так. Автомобиль красиво выглядит, но имеет малую проходимость. Проект здания дешев, но несовременен. Мы привели сравнение по двум критериям, но их, как правило, гораздо больше, поэтому выбор представляет определенную проблему даже при небольшом числе альтернатив и критериев. В настоящее время проблема многокритериальности решается многими способами. В зависимости от конкретного случая выбирают тот или иной метод. Эти методы мы рассмотрим ниже.



Рис. 4.3. Иерархия структуры математической модели Обергуля [11]

#### 4.2.2. Сведение множества критериев к суперкритерию

Сведение множества критериев к суперкритерию — это самый простой прием «ухода» от проблемы. Все критерии оценивают по их важности и выбирают наиболее существенный из них. Его называют суперкритерием. Этот метод применим тогда, когда преимущество такого критерия очевидно. Если же ранжирование (упорядочение) не приводит к явному преимуществу, то этот метод неприменим, и следует использовать другие методы.

Приведем некоторые примеры. При выборе автомобиля лицом среднего достатка суперкритерием может служить стоимость, а для владельца крупного предприятия выбор офиса для деловых встреч может оказаться проблемой, которую нельзя решить с помощью суперкритерия, так как среди множества предлагаемых ему проектов некоторые из них близки сразу по нескольким мало отличающимся по важности критериям. Вместе с тем выбор суперкритерия сопровождается наложением ограничений на другие критерии. Математически это запишется так: найти  $\max f_i(x)$ ,  $f_j(x) \geq h_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j \neq i$ ,  $x \in X$ , где  $h_j$  — ограничения, накладываемые на

возможную область изменения критериев. Для различного набора  $h_j$  получим множество  $f_i(x)$  значений суперкритерия, на котором будем искать оптимальный в смысле его значимости.

### 4.2.3. Свертка критериев

Пусть имеется  $n$  критериев  $f_i(x)$ ,  $x$  — вектор на множестве альтернатив  $X \{x \in X\}$ , описывающий параметры варианта для выбора. В методе линейной свертки вместо  $n$  частных критериев предполагается рассмотреть один критерий в виде

$$F(x) = \sum_{i=1}^n c_i f_i(x), \quad (4.1)$$

где  $c_i$  — некоторые положительные числа, удовлетворяющие условиям нормировки  $\sum c_i = 1$  и отражающие значимость соответствующих им критериев.  $F(x)$  в данном случае является целевой функцией. Из (4.1) следует

$$c_i = \frac{\partial F}{\partial f_i(x)}. \quad (4.2)$$

Коэффициент  $c_i$  показывает, насколько изменится целевая функция  $F(x)$  при изменении  $i$ -го критерия. Эти коэффициенты часто в литературе называют весовыми коэффициентами критериев. Они характеризуют степень влияния  $i$ -го критерия на функцию цели. Если в процессе достижения цели ЛПР вынужден идти на компромисс, то он должен знать, какой из параметров альтернативы надо сохранить. Таким образом, если все коэффициенты  $c_i$  определены, то произведено ранжирование критериев — определение относительной значимости исследуемых объектов на основе оценок их предпочтения друг к другу. В этом случае многокритериальная задача сводится к однокритериальной с помощью линейной свертки (4.1). Целевая функция  $F(x)$  легко исследуется математическими приемами. Поиск экстремумов целевой функции, например, методом градиентного спуска определяет оптимальное решение поставленной проблемы.

Задача оптимизации может быть решена также методом линейного программирования, если на критерии наложены некоторые условия (ограничения) вида

$$f_i(x) < b_i, \quad (4.3)$$

и они являются линейными функциями вектора  $x$  с коэффициентами  $a_{jk}$  ( $\sum a_{jk} < b_j$ ). Тогда целевая функция будет иметь вид

$$F(x) = \sum_i \sum_k c_i a_{ik} x_k. \quad (4.4)$$

Оптимизация в этом случае проводится хорошо изученными методами линейного программирования. В приведенном примере многокритериальная задача сведена к формальному математическому приему линейного программирования и решается абсолютно точно. ЛПР должен уметь формализовать проблему до уровня, соответствующего использованию ЭВМ, а для этого надо знать приемы и методы математического программирования и исследования операций [13, 16].

#### 4.2.4. Компромиссы Парето

Сталкиваясь с различными по природе многокритериальными проблемами, ученые пытались найти способы сведения их к обычным задачам математического анализа или исследованию операций. Однако не всегда удается формализовать проблему до уровня, необходимого для решения, с помощью известных математических методов. Из-за отсутствия формальных приемов для таких задач используют неформальные методы.

Мы уже рассмотрели несколько способов «ухода» от неопределенности с помощью линейной свертки и суперкритерия. При этом вводились ранги (веса) критериев и некоторые математические операции над ними. Проблемой оптимизации целевой функции в виде суперкритерия или линейной свертки занимаются специальные разделы математики, посвященные разработкам поиска алгоритмов решения экстремальных задач. Задачей же ЛПР в системном анализе является формулирование цели и формализация задачи выбора альтернатив в условиях неполной информации. Это положение следует учитывать. Вряд ли будет правильным сравнивать два варианта промышленных товаров, если неизвестна информация о их стоимости. В задачах, где сведение к одному критерию не представляется возможным, список альтернатив можно сократить, исключив из рассмотрения заведомо плохие варианты. Как это сделать? Рассмотрим один из приемов, предложенный итальянским ученым В. Парето.

Критериальный язык описания позволяет оценивать свойства альтернатив посредством конкретной числовой процедуры сравнения. Выделение отдельного свойства альтернативы определяет какую-то ее сторону и описывается критерием. Такой процесс расчленения сторон и свойств альтернатив называется декомпозицией проблемы и используется в системном анализе при решении сложных многомерных задач. Декомпозиция также необходима при сравнении вариантов, так как нельзя сравнивать два объекта сразу по всем параметрам, описываемым критериями. В практике экономического менеджмента менеджер предлагает иногда президенту фирмы не иметь дела с предприятием *A*, а заключить контракт с предприятием *B*. Задача сравнения этих предприятий и последующий выбор — многокритериальная проблема и она требует декомпозиции. Сравнение альтернатив после выявления критериев проводится следующими тремя способами.

1. Парное сравнение вариантов по конкретному критерию проводится, если нельзя какое-либо свойство описать числовой характеристикой, т. е. оно описывается только качественно. С помощью парного сравнения можно избежать применения числового описания альтернативы. Мы часто рассуждаем при покупке «эта картина лучше, чем та ...», «этот человек более коммуникабелен ...» и т. д. Опишем операцию парного сравнения с помощью оператора бинарного сравнения ( $\succ$ ). Запись  $x_1 \succ x_2$  означает, что альтернатива  $x_1$  предпочтительнее альтернативы  $x_2$ , и наоборот:  $x_1 \prec x_2$ , если  $x_2$  предпочтительнее  $x_1$ . С помощью бинарного сравнения можно производить ранжирование альтернатив и их критериев.

2. Числовые характеристики являются наиболее прогрессивным способом сравнения при выборе и наиболее аргументированны, когда это можно сделать, т. е. описать некоторое свойство альтернативы числом. В таком случае мы имеем дело с числовым представлением критерия. Сравнение чисел наиболее объективный способ выбора. Объективно, например, сравнение двух конструкций по весу, а двух технологий по их экономической эффективности, двух клиентов банка по платежеспособности и т. д.

3. Когда естественные количественные оценки отсутствуют, вводят искусственные оценки типа баллов по шкале оценок. Баллы определяются специалистами-экспертами, суждения которых основаны на неформальном выборе. Примеры искусственных числовых оценок весьма разнообразны: коэффициент трудового участия при распределении фонда экономического стимулирования; рейтинг предприятий, фирм, отдельных личностей; степень износа механизмов, агрегатов, зданий и т. д. К искусственным оценкам относится также экзаменационная оценка, выставляемая преподавателем в виде балла.

Рассмотренные приемы описания и сравнения альтернатив позволяют ЛПР продвинуться вперед и проводить исследования качества альтернатив с учетом всего множества критериев, вошедших в вектор состояния, характеризующего альтернативу в целом.

Сначала проанализируем ситуацию, когда все свойства описываются численно. Пусть  $f(x)$  — многомерный вектор критериев для альтернативы  $x$ , обладающей  $n$  свойствами в виде компонент  $f_i(x)$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Таким образом, любой альтернативе в  $n$ -мерном пространстве ставится определенная точка. Такое пространство называется критериальным. Говорят, что альтернатива  $x_2$  не хуже  $x_1$  для критерия под номером  $i$ , если

$$f_i(x_2) \succ f_i(x_1), i = 1, 2, \dots, n, \quad (4.5)$$

и она называется неухудшаемой по этому критерию. Если это обстоятельство установлено на множестве всех критериев, то ЛПР свободно может отбросить альтернативу  $x_1$ , сузив, таким образом, область выбора. Необходимо

всегда «выкидывать» из рассмотрения «плохие» альтернативы и оставлять неулучшаемые. Как их выявить? Компромиссы Парето позволяют это сделать по специальному алгоритму. Рассмотрим его иллюстративно (рис. 4.4). На рис. 4.4, *а* изображены в виде точек альтернативы на плоскости для решения задачи о выборе с максимальными значениями критериев (в сравнении участвуют всего два критерия:  $f_1(x)$  и  $f_2(x)$ ).

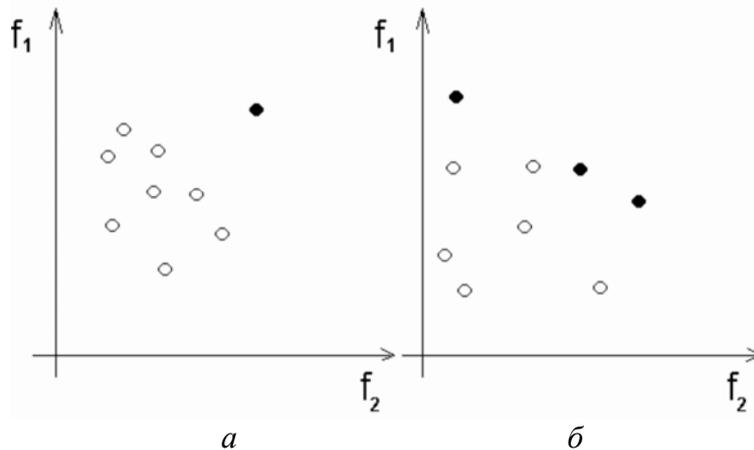


Рис. 4.4. Критериальные множества и множества Парето: *а* — область Парето содержит единственную точку, и задача решена; *б* — в области Парето располагаются три альтернативы, и решение требует дальнейшего уточнения

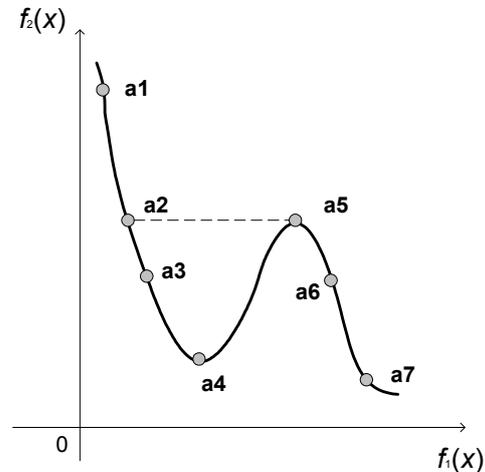
Неулучшаемой альтернативой здесь является единственная точка, которая выше и правее остальных. На рис. 4.4, *б* изображена ситуация, когда неулучшаемых альтернатив несколько и, следовательно, задача выбора требует дальнейшего решения по выбору альтернатив среди оставшихся. Множество неулучшаемых альтернатив называется множеством Парето. Определение множества Парето — это первый шаг в сравнении альтернатив. Не существует специальных приемов и формальных алгоритмов для определения множества Парето. Для формализации выбора вводятся ранее рассмотренные приемы: используется метод суперкритерия, т. е. определяется наиболее существенный критерий, по которому проводят сравнение или максимизируется линейная свертка критериев  $F(x) = \sum c_i f_i(x)$ .

С помощью этих приемов осуществляется начальный выбор и предварительно определяется множество Парето. Если пространство критериев и альтернатив непрерывно (континуально) и представляется возможным описать их функциональную зависимость аналитически, то на этом пространстве можно выделить неулучшаемые альтернативы, т. е. множество Парето.

На рис. 4.5 представлен случай непрерывного изменения критериальных оценок на критериальном пространстве. Пусть цели ЛПР определяются двумя однозначными функциями  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ . Причем  $f_1(x)$  должна быть макси-

мальной, а  $f_2(x)$  минимизируется. Каждому допустимому значению переменной  $x$  (вектору состояний) отвечает одна единственная точка на критериальной плоскости  $(f_1, f_2)$ . Кривая на плоскости задана параметрически.

Рис. 4.5. Область Парето сужена за счет удаления части кривой  $a_2a_3a_4a_5$ . Оптимальные варианты — на участках  $a_1a_2$  и  $a_5a_6a_7$



При рассмотрении можно увидеть, что к множеству Парето можно отнести далеко не всю кривую. Участок  $a_4a_5$  должен быть исключен, так как с ростом  $f_1$  растет и  $f_2$ . На этом участке изменение переменной  $x$  отвечает увеличению обоих критериев  $f_1$  и  $f_2$ . В задаче  $f_1$  максимизируется, а для  $f_2$  ищется минимум, следовательно, такие варианты должны быть исключены. Участок  $a_2a_4$  тоже исключается, так как любой точке  $a_3$  на этом участке может соответствовать улучшающая альтернатива на участке  $a_5a_7$ . Таким образом, область Парето сузилась значительно и определяется областями  $a_1a_2$  и  $a_5a_7$ . При постановке задачи с противоречивыми целями ЛПР достигает цель на компромиссе, выбирая такое значение  $x$ , при котором реализуется двойной экстремум.

#### 4.2.5. Решение многокритериальных задач на ЭВМ с использованием интерактивного метода

Компьютерная технология определения области Парето часто использует интерактивно-графический способ. Интерактивная процедура, заложенная в машинную программу, способствует наиболее эффективному использованию ЭВМ и позволяет, начиная с постановки цели и кончая получением конкретных результатов, участвовать эксперту в процессе выявления оптимального решения.

Непосредственное участие пользователя в процессе поиска оптимальных решений значительно сокращает машинное время и увеличивает круг задач благодаря использованию практического опыта ЛПР, его способности к анализу, интуиции, т. е. путем введения в программу неформальных процедур. Интерактивный режим — это такой режим работы ЭВМ, когда

промежуточные результаты решения оптимизационной задачи выводятся на экран дисплея в виде графиков или таблиц и лицо, принимающее решение, «направляет» дальнейший ход формального алгоритма, корректируя графики или числовые массивы таблиц.

В качестве графической основы информационной базы такой подсистемы приняты линейные сети, графы, эпюры, таблицы. Для определения области Парето необходим график возможных вариантов решений. Пользователь задает вариант графика, ЭВМ рассчитывает и выдает по его желанию на экран дисплея и принтер координаты возможных альтернатив, которые затем анализируются. Оценивая полученные данные, ЛПР, руководствуясь своим опытом, принимает этот вариант или отбрасывает его в результате анализа исходного множества и задает новую корректировку. Поскольку подавляющее большинство задач, решаемых в экономике, многокритериальные, независимо от используемого метода и модели решение многокритериальной задачи в интерактивном режиме расчленяется на этапы согласно формализованной цели.

Промежуточные индикаторы альтернатив, выводимые на экран дисплея, позволяют выявить области приемлемых значений (область Парето) исходных параметров и ввести соответствующие коррективы, тем самым сократив число возможных альтернатив.

Множество допустимых решений можно представить в виде ориентированного графа, в котором варианты решения — вершины, а связи между вариантами — дуги. В таком многокритериальном графе в каждой вершине содержится информация о критериях в виде вектора  $X$ , называемого индикатором. Затем ищется наиболее эффективный путь  $F_i^*(x)$  среди множества допустимых решений  $F_i(x)$  с учетом всех  $f_i(x)$  критериев:  $F_i^*(x) = \max F_i(x)$ , ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ),  $k$  — количество критериев. Каждый индикатор, описывающий вариант решения, можно представить в виде вектора

$$Z_j = \begin{pmatrix} f_1^j \\ f_2^j \\ \dots \\ f_k^j \end{pmatrix}, \quad (4.6)$$

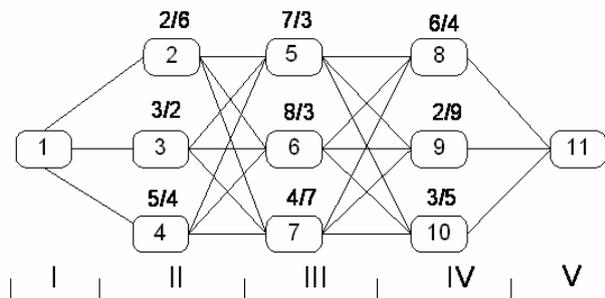
где  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $m$  — количество индикаторов вершин.

Процесс выбора отражается не только посредством графа с индикаторами вершин, но и возможными вариантами перемещения по этому графу при продвижении к цели. Им будет соответствовать многомерный индикатор вида  $Q(i) = \text{Возможные пути от начала } Q(1) \text{ до конца } Q(n)$ . Оптимальный путь среди множества возможных должен быть оптимальным одновременно по всем критериям, содержащимся в индикаторах вершин.

Рассмотрим пример использования интерактивной процедуры для решения двухкритериальной проблемы. В строительстве часто встречаются ситуации, приводящие к решению задач выбора по двум критериям: стоимости и времени. При строительстве коттеджа, например, ставится оптимизационная задача выбора типового проекта минимальной стоимости с минимальным сроком строительных работ. Пусть требуется осуществить оптимизацию некоторого проекта согласно графу, представленного на рис. 4.6.

В каждой вершине данного графа определены векторы  $Q$  состояний, характеризующие процесс выбора. Компонентами векторов служат переменные  $x$  (стоимость и продолжительность). II, III и IV этапы проекта соответствуют трем различным типам конструкций фундамента, стен и кровли соответственно.

Рис. 4.6. Математическая модель в виде графа для решения двухкритериальной задачи. Критерии записаны в виде дроби: числитель — время реализации проекта ( $T$ ), знаменатель — стоимость ( $C$ )



Компоненты  $Q$  оцениваются по девятибалльной шкале и указаны в табл. 4.1.

Таблица 4.1

*Двухкритериальная оценка вершин задачи*

Вершина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Время	—	2	3	5	7	8	4	6	2	3	—
Стоимость	—	6	2	4	3	3	7	4	9	5	—
Виды конструкций	—	Фундамент			Стены			Кровля			—

Компьютерная реализация задачи для данного примера сводится к построению на экране координат альтернатив решений в виде соответствующих точек. Возможные альтернативные решения вычисляются программой и сравниваются с кривой вида  $Q_1 Q_2 = \text{const}$ , график которой также изображается на экране (рис. 4.7).

Оптимальным вариантом для нашего иллюстративного примера является путь через вершины 1—3—5—10. Приведенный алгоритм позволяет решать двухкритериальные задачи любой природы. Напомним еще раз, что при этом проблема разбивается на элементарные этапы принятия решений, т. е. вначале производится декомпозиция задачи, а затем строится математическая модель в виде графа с двумерными индикаторами в вершинах.

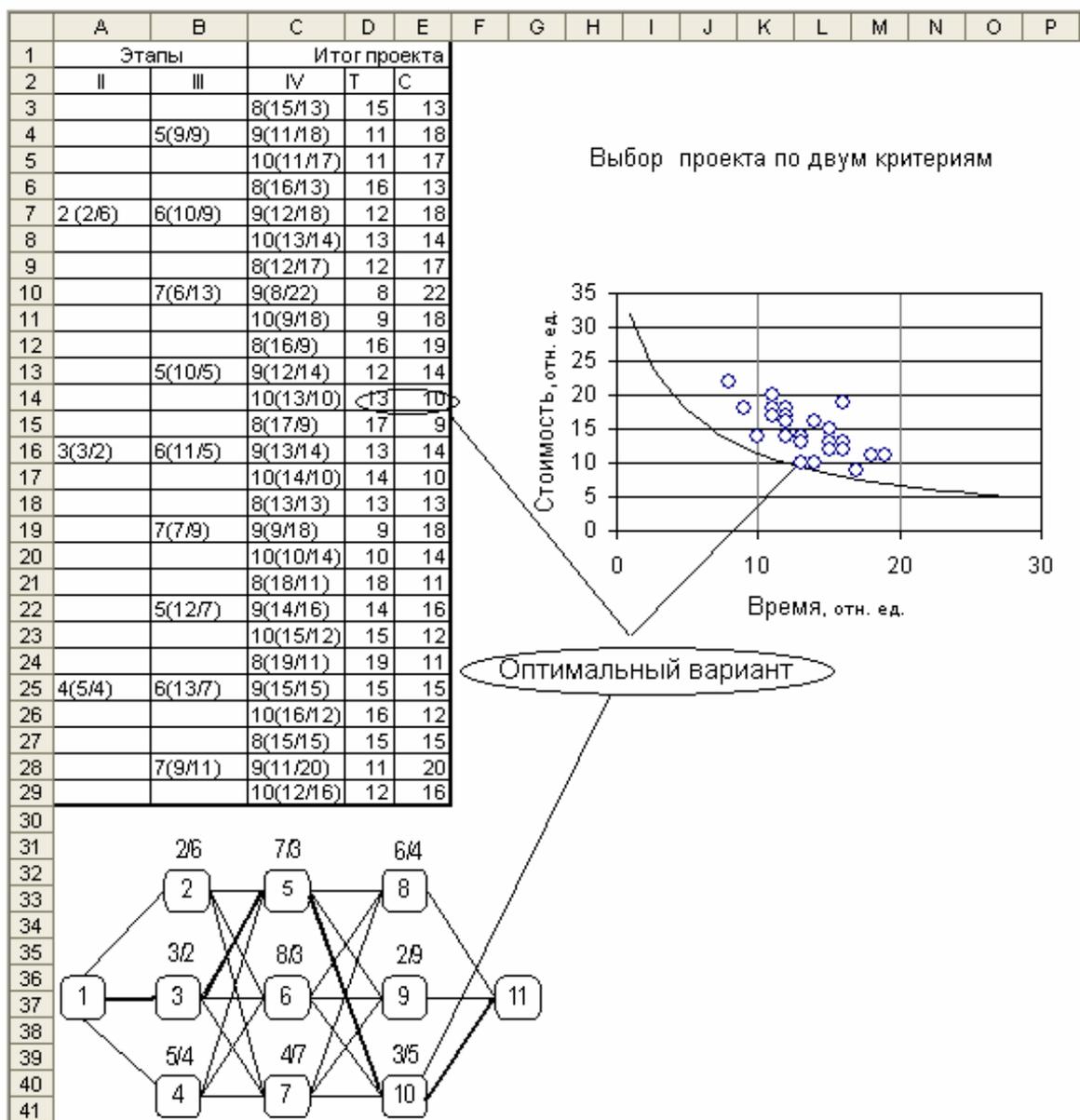


Рис. 4.7. Выбор оптимального варианта решения с помощью интерактивного режима на ЭВМ с использованием MS Excel. Минимизация целевой функции, содержащей два критерия, определяет наилучшую точку. На языке компромиссов Парето — это неулучшаемая альтернатива. Она соответствует минимальному пути на графе с вершинами 1—3—5—10

### 4.3. Линейное программирование в задачах выбора

#### 4.3.1. Общие положения

Методы линейного программирования (ЛП) оказались весьма эффективными для решения некоторых задач практического плана. Основные идеи линейного программирования возникли во время Второй мировой войны в связи с поиском оптимальных стратегий при ведении военных

операций. С тех пор они нашли широкое применение в промышленности, строительстве, экономике и управлении. При помощи этих методов можно решать многие задачи, связанные с эффективным использованием ограниченных ресурсов, оптимальным планом перевозок грузов, оптимальным раскроем материала и т. д. Задачи оптимального планирования, связанные с отысканием оптимума заданной целевой функции (линейной формы) при наличии ограничений в виде линейных уравнений или линейных неравенств, относятся к задачам линейного программирования. Линейное программирование — наиболее разработанный и широко применяемый раздел математического программирования в строительстве. Это объясняется тем, что большое число задач строительства линейны относительно искомых переменных; эти задачи наиболее изучены и для них разработаны программы для ЭВМ; многие задачи линейного программирования нашли практическое применение в реализации транспортных строительных задач и оптимального планирования ремонтных работ.

Математическая модель любой задачи линейного программирования включает целевую функцию, максимум или минимум которой требуется найти при условии, что выполняются ограничения в виде системы линейных уравнений и требования неотрицательности неизвестных. Если требуется решить задачу с двумя неизвестными и с ограничениями в виде системы линейных неравенств, то задачу решают с помощью графических построений. Графический метод имеет очень узкие рамки применения (только два неизвестных), поэтому о нем нельзя говорить как об особом способе решения задач линейного программирования. Вместе с тем он дает наглядное представление о содержании проблемы, поставленной в задачах линейного программирования, и имеет определенный интерес. Рассмотрим конкретный пример.

Строительная фирма производит две модели  $A$  и  $B$  строительных конструкций. При этом их производство ограничено наличием сырья и временем монтажа. Для каждого изделия модели  $A$  требуется 3 детали, а для изделия  $B$  — 4. Фирма может получить от своих поставщиков 1700 деталей в неделю. Для изготовления модели  $A$  требуется 12 мин рабочего времени, а для изделия  $B$  — 30 мин. В неделю можно использовать не более 160 ч рабочего времени оборудования. Необходимо определить, в каком количестве изготавливать те и другие модели, если одно изделие модели  $A$  приносит 20 тыс. р прибыли, а каждое изделие модели  $B$  — 40 тыс. р. Общая прибыль при этом должна быть максимальной.

Мы привели формулировку проблемы для строительной фирмы в вербальном (словесном) виде. Но чтобы решить эту задачу математически, надо уметь переводить ее на язык линейного программирования. Обозначим через  $x_1$  и  $x_2$  количество изделий типа  $A$  и  $B$ , соответственно, производимых в неделю. Еженедельная прибыль будет

$$P = 2x_1 + 4x_2. \quad (4.7)$$

Требуется найти такие значения  $x_1$  и  $x_2$ , когда  $P \rightarrow \max$ . Поскольку  $x_1$  и  $x_2$  выражают еженедельный объем выпускаемых изделий, то они не могут быть отрицательны, т. е.

$$x_1 > 0, x_2 > 0. \quad (4.8)$$

Но существуют ограничения на ресурс комплектующих (поставщик не дает больше 1700 деталей в неделю), а также на время работы (не более 160 ч). Эти ограничения запишутся в виде

$$\begin{aligned} 3x_1 + 4x_2 &\leq 1700, \\ 0,2x_1 + 0,5x_2 &\leq 160. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Задача состоит в том, чтобы найти значения  $x_1$  и  $x_2$ , удовлетворяющие этим ограничениям и максимизирующие функцию  $P$ . Задачу в такой постановке можно решить графически, так как всего два неизвестных.

Рис. 4.8 дает наглядное представление об области возможных решений, полученной из системы ограничений (каждая линия есть соответствующее ограничение по условию задачи).

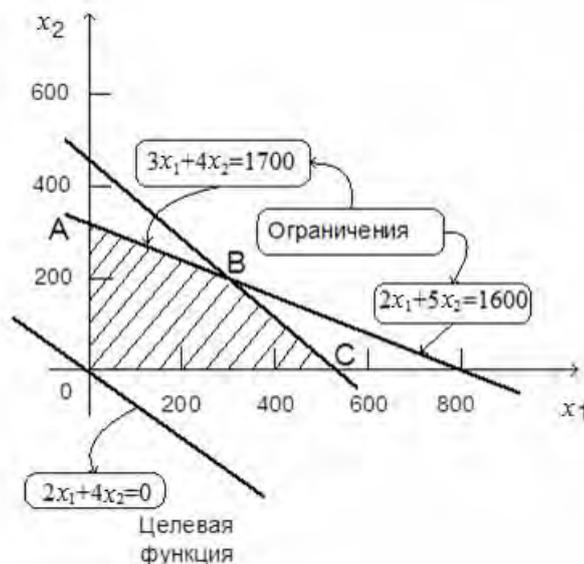


Рис. 4.8. Графическое решение задачи ЛП

Геометрические построения ограничений  $2x_1 + 5x_2 \leq 1600$  и  $3x_1 + 4x_2 \leq 1700$  и оси координат определяют область возможных значений для неизвестных  $x_1$  и  $x_2$ . Заштрихованная область, содержащая точки, для которых соблюдены условия ограничений, является допустимой. Внутри этой области бесконечное множество решений. Задача состоит в том, чтобы найти решение, максимизирующее функцию  $P$ . Для решения

этой задачи проведем через начало координат линию, на которой  $P = 0$ , т. е.  $0 = 20x_1 + 40x_2$ . На этой линии прибыль равна нулю. Если ее передвигать параллельно самой себе по области возможных решений, то прибыль  $P$  будет возрастать. Линия уровня  $P$  с максимальным значением  $P$  проходит через точку  $B$ . При этом  $P = 1400$ . Точка  $B$  с координатами  $x_1 = 300$  и  $x_2 = 200$  соответствует оптимальному решению задачи. Следовательно,  $P = 2 \cdot 300 + 4 \cdot 200 = 1400$ .

Мы рассмотрели простую задачу ЛП с двумя переменными, позволяющую простую геометрическую интерпретацию. Оптимальное решение получено: необходимо выпускать 300 штук моделей  $A$  и 200 —  $B$ . При этом будет получена оптимальная прибыль  $P = 1400$  тыс. р.

Эта задача может быть расширена на три и более неизвестных. Могут быть введены дополнительные ограничения (потребность рынка, возможность перевозок и т. д.).

В общем виде задача линейного программирования состоит в максимизации (минимизации) линейной функции:

$$P = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (4.10)$$

от  $n$  вещественных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , удовлетворяющих условиям неотрицательности:

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (4.11)$$

и  $m$  линейным ограничениям:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2, \\ \dots, \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Приведем некоторые типичные задачи линейного программирования, которые встречаются в строительстве.

### 4.3.2. Задача использования ресурсов

Предприятие имеет  $m$  видов ресурсов, количество которых соответственно равно  $b_i (i = 1, 2, \dots, m)$  единиц, из которых производится  $n$  видов продукции. Предприятие может обеспечить выпуск каждого вида продукции в количестве не более  $D_j (j = 1, 2, \dots, n)$  единиц. Для производства единицы  $j$ -й продукции необходимо  $a_{ij}$  единиц  $i$ -го ресурса. При реализации единицы  $j$ -й продукции прибыль составляет  $C_j$  единиц. Необходимо составить план выпуска продукции, который обеспечивал бы получение максимальной прибыли при реализации всей выпущенной продукции. Если

через  $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$  обозначить количество единиц  $j$ -й продукции, которое необходимо выпустить, то поставленная задача имеет следующую математическую модель.

Найти максимальное значение целевой функции

$$P = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

при ограничениях:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1,$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2,$$

.....,

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

для  $i = 1, 2, \dots, m, x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ .

### 4.3.3. Транспортная задача

Транспортная задача получила широкое распространение в практическом применении ЛП на транспорте и в строительстве. Особенно важное значение она имеет в поиске рационализации перевозок стройматериалов, а также оптимального планирования грузопотоков и работы различных видов транспорта.

Некоторый однородный продукт, сосредоточенный у  $m$  поставщиков  $A_i$  в количестве  $a_i (i = 1, 2, \dots, m)$  единиц соответственно, необходимо доставить  $n$  потребителям  $B_j$  в количестве  $b_j (j = 1, 2, \dots, n)$  единиц. Известна стоимость  $c_{ij}$  перевозки единицы груза от  $i$ -го поставщика к  $j$ -му потребителю. Необходимо составить план перевозок, позволяющий вывезти все грузы, полностью удовлетворить потребности и имеющий минимальную стоимость.

Обозначим через  $x_{ij}$  количество единиц груза, запланированных к перевозке от  $i$ -го поставщика к  $j$ -му потребителю; тогда условие задачи можно записать в виде табл. 4.2, которую в дальнейшем будем называть матрицей планирования.

От  $i$ -го поставщика к  $j$ -му потребителю запланировано перевезти  $x_{ij}$  продукции. Общая стоимость всего плана перевозок при этом выразится двойной суммой:

$$P = c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + \dots + c_{1n}x_{1n} +$$

$$+ c_{21}x_{21} + c_{22}x_{22} + \dots + c_{2n}x_{2n} +$$

$$.....$$

$$+ c_{m1}x_{m1} + c_{m2}x_{m2} + \dots + c_{mn}x_{mn}.$$



В задаче общее число работ равно общему числу лиц, т. е.  $\sum a_j = \sum b_i$ . Если  $\sum a_j > \sum b_i$ , то вводят фиктивную группу лиц, содержащую  $\sum b_j - \sum a_i$  человек, если наоборот, то используют фиктивную категорию работ, состоящую из  $\sum a_j - \sum b_i$  единиц.

«Поиск решений» является надстройкой пакета Excel 2003 и используется для решения задач линейного программирования. Не вдаваясь в детали, отметим, что эта процедура позволяет найти оптимальное значение формулы, содержащейся в ячейке, которая называется целевой и работает с группой ячеек, прямо или косвенно связанных с формулой в целевой ячейке. Чтобы получить по формуле, содержащейся в целевой ячейке, заданный результат, процедура изменяет значения во влияющих ячейках. Чтобы сузить множество возможных значений, используемых в модели, применяются ограничения. Эти ограничения могут ссылаться на другие влияющие ячейки. Запуск программы осуществляется из ниспадающего меню «Сервис».

#### 4.3.5. Оптимизация с помощью «Поиска решения»

В поле «Установить целевую ячейку» надо ввести ссылку на ячейку, ее имя. Чтобы максимизировать значение конечной ячейки или минимизировать, установить переключатель в соответствующее положение; чтобы установить значение в конечной ячейке равным некоторому числу, установить переключатель в положение значения и ввести число. В поле «Изменяя ячейки» ввести имена или ссылки на изменяемые ячейки, разделяя их запятыми. Изменяемые ячейки должны быть прямо или косвенно связаны с конечной ячейкой. Чтобы автоматически найти все ячейки, влияющие на формулу модели, нажмите кнопку «Предположить». В поле «Ограничения» ввести все ограничения, накладываемые на «Поиск решения». В разделе «Ограничения» диалогового окна «Поиск решения» нажать «Параметры». В поле «Ссылка» на ячейку ввести адрес ячейки, на значение которой накладываются ограничения. Выбрать условный оператор ( $\leq$ ,  $=$ ,  $\geq$ , цел. или двоич.), который должен располагаться между ссылкой и ограничением. Если выбрано «цел.», в поле «Ограничение» появится «целое». Если выбрано «двоич.», в поле «Ограничение» появится «двоичное». В поле «Ограничение» ввести число, ссылку на ячейку или ее имя либо формулу. Чтобы принять ограничение и приступить к вводу нового ограничения, нажать «Добавить». Чтобы принять ограничение и вернуться в диалоговое окно «Поиск решения» — кнопка «ОК».

**Пример 4.1.** Задача о распределении ресурсов, рассмотренная выше. Напомним кратко ее условие. Производятся две модели  $A$  и  $B$  строительных конструкций с ограниченными сырьевыми и временными ресурсами.

Для модели  $A$  — 3 детали, а для  $B$  — 4. В неделю всего 1700 деталей. Время для изготовления модели  $A$  — 12 мин, а для  $B$  — 30 мин. В неделю можно использовать не более 160 ч рабочего времени оборудования. Задача состоит в том, чтобы определить, в каком количестве изготавливать те и другие модели, если одно изделие  $A$  приносит 20 тыс. р прибыли, а модели  $B$  — 40 тыс. р. Общая прибыль при этом должна быть максимальной.

Условия задачи и ее решение приведены на рис. 4.9 в виде листа книги Excel.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Изменяемые ячейки							
2	x1	x2						
3	100	100						
4	Ограничения							
5	700	1700						
6	700	1600						
7	Целевая функция							
8	6000000							

The Solver dialog box is open, showing the following configuration:

- Установить целевую ячейку:  $\$A\$8$
- Равной:  максимальному значению  значению: 0  минимальному значению
- Изменяя ячейки:  $\$A\$3:\$B\$3$
- Ограничения:
  - $\$A\$3 \geq 0$
  - $\$A\$5 \leq \$B\$5$
  - $\$A\$6 \leq \$B\$6$
  - $\$B\$3 \geq 0$

Рис. 4.9. Электронная таблица исходных данных и форма поиска решения задачи о распределении ресурсов до выполнения алгоритма

**Пример 4.2.** Решается транспортная задача, рассмотренная нами теоретически в общем виде. Условия задачи приведены на рис. 4.10 в форме листа таблицы Excel. Требуется минимизировать затраты на перевозку стройматериалов от производителей на торговые склады. При этом необходимо учесть возможности поставок каждого из производителей при максимальном удовлетворении запросов потребителей (табл. 4.3). В этой модели представлена задача доставки товаров с трех заводов ЖБК на пять региональных складов. Продукция заводов может доставляться с любого завода на любой склад. Требуется определить объемы перевозок между

#### 4. Принятие решений. Выбор оптимального решения в управлении

каждым заводом и складом, в соответствии с потребностями складов и производственными заводами, при которых транспортные расходы минимальны. Введем после формализации задачи исходные данные в виде листа книги (см. рис. 4.10).

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H
6			Число перевозок от Ai к Bj					
7	Заводы:	Всего	B1	B2	B3	B4	B5	
8	A1	5	1	1	1	1	1	
9	A2	5	1	1	1	1	1	
10	A3	5	1	1	1	1	1	
11			---	---	---	---	---	
12	Итого:		3	3	3	3	3	
14	Потребн. складов -->		180	80	200	160	220	
15	Заводы:	Поставки	Затраты от зав. Ai к складу Bj					
16	A1	310	10	8	6	5	4	=C8*C16+C9*C17+C10*C18
17	A2	260	6	5	4	3	6	
18	A3	280	3	4	5	5	9	
20	Перевозка	83р.	19р.	17р.	15р.	13р.	19р.	

The Solver dialog box is configured as follows:

- Установить целевую ячейку: \$H\$20
- Равной:  минимальному значению
- Изменяя ячейки: \$C\$8:\$G\$10
- Ограничения:
  - \$B\$8:\$B\$10 <= \$B\$16:\$B\$18
  - \$C\$12:\$G\$12 >= \$C\$14:\$G\$14
  - \$C\$8:\$G\$10 >= 0

Рис. 4.10. Решение транспортной задачи с помощью программы «Поиск решения». Ввод исходных данных

Таблица 4.3

#### Исходные данные транспортной задачи

Результат	B20	Целевая функция
Переменные	C8:G10	Объемы перевозок от заводов к складам
Ограничения	B8:B10<=B16:B18	Количество грузов не превышает возможности заводов и не меньше потребностей
	C12:G12>=C14:G14	
	C8:G10>=0	Груз не может быть отрицательным

После нажатия кнопки «Выполнить» «Поиск Решения» выдаст окно с результатом решения транспортной задачи (рис. 4.11).

K11		fx					
	A	B	C	D	E	F	G
6			Число перевозок от $A_i$ к $B_j$				
7	Заводы:	Всего	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
8	A1	300	0	0	0	80	220
9	A2	260	0	0	180	80	0
10	A3	280	180	80	20	0	0
11			---	---	---	---	---
12	Итого:		180	80	200	160	220
13							
14	Потребн.складов -->		180	80	200	160	220
15	Заводы:	Поставки	Затраты от зав. $A_i$ к складу $B_j$				
16	A1	310	10	8	6	5	4
17	A2	260	6	5	4	3	6
18	A3	280	3	4	5	5	9
19							
20	Перевозка	3 200р.	540р.	320р.	820р.	640р.	880р.
21							
22	<div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> <p><b>Результаты поиска решения</b></p> <p>Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.</p> <p>Тип отчета            Результаты            Устойчивость            Пределы</p> <p><input checked="" type="radio"/> Сохранить найденное решение  <input type="radio"/> Восстановить исходные значения</p> <p>OK    Отмена    Сохранить сценарий...    Справка</p> </div>						
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							

Рис. 4.11. Электронная таблица после решения преобразована и соответствует оптимальному плану перевозок с затратами 3200 р.

## 4.4. Разработка моделей линейного программирования

Покажем несколько примеров задач, которые можно решать с помощью ЛП. Мы сделаем это для проблем, встречающихся в управлении строительным бизнесом при разработке оптимальных планов перевозок строительных материалов и конструкций, графика работы сотрудников, планирования рабочей силы и размещения рекламы в средствах массовой информации и т. д. Хотя некоторые из этих задач невелики в числовом выражении, принципы их решения применимы и к более крупным задачам.

### 4.4.1. График работы служащих (задача о назначениях)

Задачи назначения включают в себя определение наиболее рационального распределения сотрудников по рабочим местам, машин — по заданиям, уборочных машин — по участкам города, коммивояжеров — по регионам и т. д. Обычно цель таких задач — минимизировать время поездки или расходы либо максимизировать эффективность назначения. Задачи

назначения уникальны, потому что у них не только все переменные в ограничивающих факторах ЛП имеют коэффициент 1, но и правая часть каждого ограничивающего фактора также всегда равна 1. Применение ЛП дает решения 0 или 1 для каждой искомой переменной. Рассмотрим пример.

Юридическая фирма содержит большой штат молодых поверенных, которые владеют правом младшего адвоката. Адвокатская контора заинтересована в эффективном использовании своих кадров и пытается найти способ оптимального назначения адвоката клиенту. Все сотрудники перегружены, но менеджер не хочет упустить четверых новых клиентов, подавших заявки на обслуживание. Он просматривает текущую нагрузку и определяет четырех адвокатов, которых можно назначить на эти дела, несмотря на их занятость. Каждый молодой адвокат может оказать услугу только одному новому клиенту. Кроме того, у каждого адвоката своя специализация. Пытаясь максимизировать общую эффективность назначения адвокатов, была составлена таблица, в которой оценена эффективность (по шкале от 1 до 9) каждого адвоката в каждом новом деле (табл. 4.4).

Таблица 4.4

*Эффективность работы адвокатов*

Адвокат	Дела клиента			
	Развод	Корпоративное слияние	Присвоение чужих денег	Незаконные сделки с ценными бумагами
Маргулис	6	2	8	5
Амелин	9	3	5	8
Филин	4	8	3	4
Еркин	6	7	6	4

Чтобы решить задачу с помощью линейного программирования, употребим переменные с двойными индексами внизу. Пусть  $X_{ij} = 1$ , если адвокат  $i$  назначен на дело  $j$ ; 0, если не назначен, где  $i = 1, 2, 3, 4$  означает их фамилии,  $j = 1, 2, 3, 4$  — название дела.

Формулировка задачи: максимизировать  $P = 6X_{11} + 2X_{12} + 8X_{13} + 5X_{14} + 9X_{21} + 3X_{22} + 5X_{23} + 8X_{24} + 4X_{31} + 8X_{32} + 3X_{33} + 4X_{34} + 6X_{41} + 7X_{42} + 6X_{43} + 4X_{44}$ , если

- $X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} = 1$  (развод);
- $X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} = 1$  (слияние);
- $X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} = 1$  (присвоение);
- $X_{14} + X_{24} + X_{34} + X_{44} = 1$  (сделка);
- $X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} = 1$  (Маргулис);
- $X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} = 1$  (Амелин);
- $X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} = 1$  (Филин);
- $X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} = 1$  (Еркин).

Задача юридической фирмы решена (рис. 4.12) с оценкой общей эффективности в 30 баллов при условии, что  $X_{13} = 1$ ,  $X_{24} = 1$ ,  $X_{32} = 1$  и  $X_{41} = 1$ . Все другие переменные, следовательно, равны 0.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Адвокаты и клиенты						
2	Матрица стоимостей выполнения работ						
3	Клиенты\ Адвокаты						
4	1	6	2	3	4		
5	2	9	3	5	8		
6	3	4	8	3	4		
7	4	6	7	6	4		
8	Изменяемые ячейки						
9	Клиенты\ Адвокаты						
10	1	0	0	1	0		
11	2	0	0	0	1		
12	3	0	1	0	0		
13	4	1	0	0	0		
14	Ограничения						
15	1	1					= B10 + B11 + B12 + B13
16	1		1				
17	1			1			= B10 + C10 + D10 + E10
18	1				1		
19	Целевая функция						
20					P <sub>i</sub>		
21					8		= B4 * B10 + C4 * C10 + D4 * D10 + E4 * E10
22					8		
23					8		
24					6		
25	P=				30		= СУММ(B21: B24)
26							

Рис. 4.12. Задача о назначениях

#### 4.4.2. Планирование трудовых ресурсов

Задачи планирования трудовых ресурсов определяют потребность в штате на заданный период времени, когда у менеджера есть возможность в назначении рабочих на рабочие места, на которые требуются взаимозаменяемые специалисты. Разработка штатного расписания с помощью ЛП часто применяется в крупных строительных корпорациях.

Рассмотрим пример. Строительный банк сильно загружен и ему в зависимости от времени дня требуется 10—18 сотрудников. В табл. 4.5 указано число сотрудников, необходимых в разные часы, когда банк открыт. 12 человек в банке работают полный рабочий день, хотя многие из них находятся в списке частично занятых. Частично занятый служащий должен отработать четыре часа в день, но начинать работу может в любое время между 9 и 13 ч. Частично занятые работники — это недорогие трудовые ресурсы, так как им не предоставляется пенсия по старости. С другой стороны, служащим, занятым полный рабочий день с 9 ч утра до 5 ч вечера, полагается один час на обед. Таким образом, время служащих, занятых полный

рабочий день, составляет 35 ч в неделю. Согласно корпоративной политике время частичной работы не превышает 50 % от полного рабочего дня. Работающие неполный день зарабатывают 50 р в час (200 р в день), в то время как работающие полный день зарабатывают в среднем 1000 р в виде зарплаты и льгот. Требуется построить график, минимизирующий общие расходы на трудовые ресурсы и освободить сотрудников, работающих полный день, если это окажется выгодно.

Таблица 4.5

*Динамика необходимых сотрудников «Стройбанка»*

Период	Время, ч	Требуемое количество сотрудников
1	9—10	10
2	10—11	12
3	11—12	14
4	12—13	16
5	13—14	18
6	14—15	17
7	15—16	15
8	16—17	10

Допустим, что

$F$  — число работающих полный рабочий день;

$P_1$  — число работающих с 9 до 13 ч;

$P_2$  — число работающих с 10 до 14 ч;

$P_3$  — число работающих с 11 до 15 ч;

$P_4$  — число работающих с 12 до 14 ч;

$P_5$  — число работающих с 13 до 17 ч.

Целевая функция: минимизировать общую стоимость ежедневного труда  $P = 50F + 16(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5)$ . Сдерживающие факторы: доступные человеко-часы в любой час должны быть не меньше требуемых.

$$F + P_1 \geq 10 \text{ (с 9 до 10 ч);}$$

$$F + P_1 + P_2 \geq 12 \text{ (с 10 до 11 ч);}$$

$$1/2F + P_1 + P_2 + P_3 \geq 14 \text{ (с 11 до 12 ч);}$$

$$1/2F + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \geq 16 \text{ (с 12 до 13 ч);}$$

$$F + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \geq 18 \text{ (с 13 до 14 ч);}$$

$$F + P_3 + P_4 + P_5 \geq 17 \text{ (с 14 до 15 ч);}$$

$$F + P_4 + P_5 \geq 15 \text{ (с 15 до 16 ч);}$$

$$F + P_5 \geq 10 \text{ (с 16 до 17 ч).}$$

В распоряжении менеджеров 12 человек, работающих полный рабочий день ( $F < 12$ ). Часы работы сотрудников с неполным рабочим днем не должны превышать 50 % работающих весь день:  $4(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \geq 0,5(10 + 12 + 14 + 16 + 18 + 17 + 15 + 10) = 0,5 \cdot 112 = 56$  и все  $P_i \geq 0$ .

В результате оптимизации получаются два альтернативных расписания. Согласно первому, нужно десять человек на полный рабочий день ( $P = 10$ ) и два на неполный день с началом работы в 10 ч ( $P_2 = 2$ ), семь — с началом работы в 11 ч ( $P_3 = 7$ ) и пять — в 12 ч ( $P_4 = 5$ ). Никто из частично занятых сотрудников не приступает к работе в 9 ч утра или в 13 ч.

Второе решение также предусматривает десять служащих на полный рабочий день, но при этом шесть частично занятых приступают к работе в 9 ч ( $P_1 = 6$ ), один — в 10 ч ( $P_2 = 1$ ), по двое — в 11 и 13 ч ( $P_3 = 2$  и  $P_4 = 2$ ) и трое приступают к работе в 13 ч дня ( $P_5 = 3$ ). Стоимость обоих вариантов равна 724 рубля в день.

#### 4.4.3. Применение ЛП в маркетинге: выбор средств массовой информации

Модели линейного программирования используются в области рекламы как помощь в выборе средств массовой информации. Иногда этот метод применяется при размещении рекламы в СМИ при условиях ограниченного бюджета (возможно размещение рекламы на коммерческих радиоканалах или в телепередачах, газете, прямая реклама по почте, рекламные объявления в журналах и т. д.). Главная цель — максимизировать осведомленность аудитории. Выбор конкретных СМИ может быть ограничен требованиями контракта, нехваткой доступных средств или политикой компании. Рассмотрим пример.

Клуб дизайнеров малых форм продвигает на рынок свою продукцию и составил бюджет для местной рекламы до 8000 р в неделю, причем деньги должны быть распределены по четырем каналам: реклама на телевидении, в газете и два типа рекламы на радио. Цель рекламы — охватить более широкую аудиторию через различные средства информации. Число потенциальных клиентов, которое может быть достигнуто с помощью четырех видов рекламы, представлено в табл. 4.6, где содержатся данные о стоимости одного рекламного объявления и максимальное количество объявлений за неделю.

Таблица 4.6

*Характеристики различных типов реклам*

Реклама	Аудитория от одного объявления	Стоимость одного объявления	Число объявлений за неделю
ТВ	5000	800	12
Ежедневная газета	8500	925	5
Радио	2400	290	25
Радио (после 13 ч)	2800	380	20

Договорные условия требуют, чтобы не менее пяти раз в неделю по радио звучало рекламное объявление. Рекламная кампания должна быть широкомасштабной. Руководство настаивает, чтобы на всю рекламу по радио расходовалось не более 1800 р в неделю.

Формализуем задачу. Пусть  $X_1$  — количество минутных объявлений по телевидению в неделю;  $X_2$  — еженедельное количество объявлений в ежедневной газете;  $X_3$  — еженедельное число 30-секундных объявлений по радио;  $X_4$  — еженедельное количество одноминутных объявлений по радио. Целевая функция: максимизировать охват аудитории  $P = 5000X_1 + 8500X_2 + 2400X_3 + 2800X_4$ . При том, что  $X_1 \leq 12$  (максимум объявлений по ТВ в неделю),  $X_2 \leq 5$  (максимум газетных объявлений в неделю),  $X_3 \leq 25$  (максимум 30-секундных объявлений по радио в неделю),  $X_4 \leq 20$  (максимум одноминутных объявлений по радио в неделю),  $800X_1 + 925X_2 + 290X_3 + 380X_4 \leq 8000$  (еженедельный бюджет на рекламу),  $X_3 + X_4 \geq 5$  (минимум объявлений по радио согласно контракту),  $290X_3 + 380X_4 < 1800$  (максимум рублей, потраченных на радиорекламу). С помощью программы «Поиск решения» было найдено:  $X_1 = 1,9$  объявления на ТВ;  $X_2 = 5$  рекламных объявлений в газете;  $X_3 = 6,2$  тридцатисекундных объявлений на радио;  $X_4 = 0$  одноминутных объявлений на радио. Это охватывает аудиторию в 67 240 контактов. Так как  $X_1$  и  $X_3$  — дробные числа, их округляют.

Линейное программирование завоевало популярность как метод, который может справиться с широким разнообразием управленческих задач в строительстве. Небольшие задачи можно решить графически, но большинство строительных фирм решает эти задачи с помощью программного обеспечения.

### Вопросы и задания

1. Что такое критерий? Как критерий связан с целью задачи?
2. Что мы называем интерактивно-графической процедурой?
3. Какие приемы используются при создании программ диалогового режима поиска оптимальных решений?
4. Почему в задаче о выборе оптимальной конструкции коттеджа в качестве опорной функции взята гипербола?
5. Поставьте перед собой двухкритериальную проблему из области экономики и решите ее с помощью рассмотренного алгоритма.
6. Как строятся компромиссы Парето? Что такое неулучшаемая альтернатива? Какие точки критериального пространства принадлежат области Парето?
7. Свертка критериев применяется для формирования целевой функции. Сравните эту задачу с задачей линейного программирования. Сформулируйте свертку критериев на языке линейного программирования, если на них накладываются линейные ограничения. Определите круг задач, решаемых таким способом.
8. Приведите примеры многокритериальных задач в строительной экономике.
9. Что такое «хороший выбор» с точки зрения системного аналитика?

10. Дайте определение иерархии системы. Как строится иерархия структуры проблемы?
11. С помощью декомпозиции разработайте структуру в виде графа, отражающую систему образования в России.
12. Сформулируйте цель работы вашего факультета так, чтобы она не была общей для других факультетов, в том числе родственных в других вузах.
13. Сформулируйте задачу линейного программирования в общем виде.
14. Что такое целевая функция?
15. Расскажите об алгоритме поиска максимума целевой функции с помощью геометрических построений.
16. Как строится многоугольник возможных решений?
17. Сформулируйте типовые задачи линейного программирования.
18. Считается, что в каждой задаче линейного программирования есть область допустимых решений с бесконечным количеством решений. Объясните.
19. Является ли анализ чувствительности концепцией, применяемой только к линейному программированию, или его можно применять и при анализе другими методами? Приведите примеры, подтверждающие вашу точку зрения.
20. Какова сегодня роль компьютера в решении задач линейного программирования?
21. Решите следующую задачу линейного программирования, используя графический метод. Максимизировать прибыль  $P = 4X_1 + 4X_2$ , с ограничениями:  $3X_1 + 5X_2 \leq 150$ ;  $X_1 - 2X_2 \leq 10$ ;  $X_1, X_2 \geq 0$ .
22. Рассмотрите следующую формулу линейного программирования. Максимизировать стоимость  $= \$1X_1 + \$2X_2$ , если  $X_1 + 3X_2 \geq 90$ ;  $8X_1 + 2X_2 \geq 160$ ;  $3X_1 + 2X_2 \geq 120$ ;  $X_2 \leq 0$ . Проиллюстрируйте графически область допустимых решений. Укажите, какая точка экстремума дает оптимальное решение и чему в ней равна целевая функция.
23. Центральный ресторан открыт 24 ч в сутки. Официанты и помощники официантов сдают смену в 3, 7, 11 ч утра, 3 ч дня, 7 ч вечера. Каждый отрабатывает восемь часов (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Исходные данные к задаче 23

Период	Время, ч	Требуемое количество официантов и их помощников
1	3—7	3
2	7—11	12
3	11—15	16
4	15—19	9
5	19—23	11
6	23—33	4

Требуется определить, сколько официантов и их помощников должны приступать к работе в начале каждого периода, чтобы минимизировать штат, требуемый для одного дня обслуживания (Подсказка: пусть  $X_i$  равен числу официантов и их помощников, начинающих работу во временной период  $i$ , где  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ).

24. Директор по рекламе сети из четырех строительных супермаркетов рассматривает два варианта размещения рекламы в средствах массовой информации. Один вариант — серия рекламных объявлений на полстраницы в воскресном выпуске газеты, другой — реклама на телевидении. Магазины расширяют серию инструментов по строительству малых домов, и директор по рекламе заинтересован в 40 % охвате

#### 4. Принятие решений. Выбор оптимального решения в управлении

населения в прилегающих городских районах и 60 % — в сельских пригородах. Время, предлагаемое телевидением на один рекламный выпуск, имеет рейтинг охвата 5 % в городских домах и 3 % в пригородах. Воскресный номер газеты имеет, соответственно, рейтинги охвата 4 и 3 % на одно рекламное объявление. Стоимость рекламы на пол-страницы в газете — 2925 р, стоимость телевизионных выпусков — 20 000 р. Требуется выбрать наименее дорогостоящую рекламную стратегию, чтобы достичь нужного охвата. Формализуйте задачу для ЛП и решите с помощью «Поиска решения».

25. Компания специализируется на обработке зерна. В пятницу у нее были загруженные зерном вагоны в следующих городах в количестве: Воронеж — 35, Волгоград — 60, Саратов — 25 вагонов.

В понедельник следующие города нуждались в зерне: Балашов — 30, Калач — 45, Волжский — 25, Михайловка — 20 вагонов.

Используя карту расстояний по железной дороге, диспетчер строит таблицу расстояний для всех городов. Результат показан в табл. 4.8.

Таблица 4.8

*Расстояния между городами*

Откуда	Куда, расстояние в км			
	Балашов	Калач	Волжский	Михайловка
Воронеж	286	458	530	350
Волгоград	410	120	25	220
Саратов	240	530	410	450

Сформулируйте задачу линейного программирования, чтобы минимизировать общее расстояние по железной дороге к пунктам назначения. Вычислите оптимальный план перевозки вагонов с зерном с использованием программы «Поиск решения».

26. Имеются три энергетические компании ( $A$ ,  $B$  и  $C$ ). В течение пикового спроса власти разрешают им объединять свои ресурсы и распределять их среди более мелких независимых энергетических компаний, у которых нет достаточно крупных генераторов, чтобы справиться со спросом. Запасы распределяются на основе стоимости передачи киловатт-часа. В табл. 4.9 показан спрос и поставка миллионов киловатт-часов, а также стоимости передачи электроэнергии одного киловатт-часа четырем маленьким компаниям в городах  $W$ ,  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Таблица 4.9

*Потребность в электроэнергии*

Откуда	Куда				
	$W$	$X$	$Y$	$Z$	Поставка
$A$	12	4	9	5	55
$B$	8	1	6	6	45
$C$	1	12	4	7	30
Спрос на энергию	40	20	50	20	—

Сформулируйте модель линейного программирования для этой задачи и найдите наименьшую стоимость распределительной системы, используя компьютерную программу «Поиск решения».

27. Фирма «Химреактивы» разработала новую экологически чистую жидкость для мытья полов офисов и готовится к телевизионной рекламной кампании в масштабах всей страны. Руководство решило составить график показа односторонних рекламных роликов на время просмотра от 13 до 17 ч. Чтобы аудитория была как можно более широкой, фирма хочет распределить по одному ролику на четыре сети, чтобы он появлялся на экране один раз в час. Рейтинг охвата для каждого часа, представляющий количество зрителей на каждые потраченные 25 600 р, представлен в табл. 4.10. Как разработать сеть для каждого часа, чтобы охват аудитории был максимальным?

Таблица 4.10

*Эффективность разных видов рекламных сетей*

Время эфира, ч	Сети			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	Независимые
13—14	271	181	113	95
14—15	189	155	171	196
15—16	192	185	99	77
16—17	115	214	168	128

28. Руководитель новой шестимесячной программы для переподготовки прорабов беспокоится, на что 20 слушателей, занимающихся на курсе, тратят свое драгоценное время. Он исходит из того, что в неделю 168 ч, и думает, что слушатели используют его неэффективно. При этом  $X_1$  — количество часов сна, необходимое в неделю;  $X_2$  — количество личных часов (еда, личная гигиена и т. д.);  $X_3$  — количество часов обучения в классе и самостоятельно;  $X_4$  — количество часов отдыха (свидания, спорт, семья и т. д.). 30 ч в неделю должно хватить для обучения в аудитории, чтобы усвоить материал, и это главная цель для слушателей. Им нужно в среднем 7 ч сна, и эта цель стоит на втором месте. Цель под номером 3 — обеспечить хотя бы 20 ч в неделю на отдых. Сформулируйте это как задачу целевого программирования.

29. Предприятие коммунального обслуживания объявило открытие второго генератора на своей атомной электростанции. Отделу кадров поручили определить, сколько техников надо взять на работу и обучить за остаток года. В настоящее время на электростанции работает 350 полностью обученных техников. Потребность в рабочей силе указана в табл. 4.11.

Таблица 4.11

*Потребность в рабочей силе*

Месяц	Потребность в работе, ч
Август	40 000
Сентябрь	45 000
Октябрь	35 000
Ноябрь	50 000
Декабрь	45 000

По закону РФ человек, обслуживающий генератор, может работать не более 130 ч в месяц. Политика коммунального обслуживания также диктует, что в те месяцы, когда на электростанции переизбыток кадров, их сокращение не допускается. Таким образом, если обученных служащих больше, чем требуется в любой месяц, им платят полную

#### 4. Принятие решений. Выбор оптимального решения в управлении

---

зарплату, даже если они не работают положенных 130 ч. Обучение новых операторов — важная и дорогостоящая процедура. Она предусматривает один месяц индивидуального обучения в аудитории, прежде чем новому технику разрешат работать самостоятельно. Поэтому предприятие должно нанимать учеников за месяц до того, когда они будут востребованы. К каждому ученику прикрепляется опытный оператор, который тратит на него 90 ч, т. е. в этот месяц на 90 ч работает меньше. Текучесть обученных техников, по документам отдела кадров, равна 5 % в месяц. Другими словами, около 5 % служащих, обученных в начале месяца, увольняются в конце этого месяца. Обученный оператор зарабатывает в среднем 12 000 р в месяц (независимо от количества отработанных часов). Ученикам платят 3000 р в течение одного месяца. Сформулируйте задачу планирования штата, используя линейное программирование. Решите задачу: сколько слушателей следует брать в начале каждого месяца.

## 5. ЭВРИСТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

*Экспертизы и неформальные процедуры. — Эвристические методы в дискретных задачах. — Неопределенность при формировании целей управленческого решения. — Искусственный интеллект в управлении. — Экспертные методы в задаче упорядочения (ранжирования).*

### 5.1. Экспертизы и неформальные процедуры

Мы неоднократно обращали внимание на то, что далеко не все задачи системного анализа доступны формализации при применении алгоритмов для ЭВМ. В случае неопределенности цели или недостаточности информации для формальной постановки задачи руководителю приходится применять неформальные процедуры. Одна из основных задач системного анализа как дисциплины — научиться объединять строгие математические и неформальные методы. Но можно ли вообще ставить вопрос об объединении математических методов и методов, основанных на интуиции и опыте? Ведь интуиция не обладает математической строгостью. Любые утверждения, полученные нематематическим методом, можно ставить под сомнение — им всегда недостает доказательств. Поэтому рядовой обыватель скептически относится к «произволу» при выборе наилучших решений, не подтвержденных инструкциями или указаниями сверху.

В последние годы наука об управлении вплотную подошла к управлению систем, включающих людей в качестве активных элементов. Это системы, учитывающие поведение человека в коллективе (организации), что существенно отличает организацию людей как систему, состоящую из активно взаимодействующих индивидов. Попытки создания формальной процедуры в виде математической модели поведения такой системы (модели общества) до настоящего времени не дали положительных результатов. Это связано с тем, что организация людей оказывается сложнее любой самой сложной технической системы. Поведение человека как

интеллектуальной составляющей активной системы невозможно описать только количественными параметрами. Это принципиально отличает задачу об управлении техническими системами. Как указывалось выше, системы с участием человека или организации являются активными системами. Исследование таких систем было начато в 60-х гг. прошлого столетия и в настоящее время разработаны некоторые аспекты теории управления, являющиеся основой для математических методов принятия оптимальных решений.

Тенденцию, которую мы наблюдаем сегодня, можно охарактеризовать следующей формулой: математик во все большей степени становится активным участником содержательных исследований конкретных процессов. Происходит как бы возврат к эпохе Возрождения, когда каждый математик был еще и философом. В наши дни такой синтез наблюдается повсеместно и можно ожидать, что этот процесс будет продолжаться.

Математическая модель — это продукт неформального мышления, полученный в процессе творчества: в нем уже закодирована вся информация о природе изучаемого процесса с использованием известных формальных приемов над потоками исходных данных. Там, где не представляется возможным применение формальных алгоритмов, в математическую модель исследователь вводит неформальные (эвристические) приемы, основанные на опыте и интуиции. Системный анализ должен определенным образом организовать систему процедур, которые мы условимся называть неформальными или эвристическими, участвующими в математических моделях наравне с формальными алгоритмами.

Смысл этих процедур состоит в канонизации рассуждений и их упорядочении. В конечном счете делается попытка формализовать в какой-то мере процедуру принятия решений с привлечением эвристических приемов. Для этих целей приглашаются эксперты. Эксперт как бы играет роль некоторого прибора, который совершает предпочтительный выбор, устанавливает значения коэффициентов предпочтения, определяет ранги и критерии. Существуют коллективы экспертов, которые нам известны как комиссии по экспертизе и диагностике зданий и сооружений, ученые советы, дегустаторы, врачебный консилиум, жюри конкурсов и т. д.

## **5.2. Эвристические методы в дискретных задачах**

### **5.2.1. Формальные и неформальные приемы**

Когда мы говорим о формальных процедурах, то возникает ситуация, где формальные модели требуют неформального вмешательства эксперта. Причина заключается в том, что объем вычислительных работ математической модели может возрасти до такой степени, что он станет не под силу

ЭВМ из-за большой размерности вычислений. В таких случаях в интерактивном режиме можно «направить» многомерный переборный алгоритм по такому руслу, когда отбрасываются заведомо плохие варианты решений и время поиска оптимума значительно сокращается.

В программах, которые предусматривают варианты решения, а их большинство в системном анализе, таких решений может оказаться очень много. Любые задачи, требующие перебора, когда за конечное число шагов алгоритм заведомо приведет к окончательному решению, теряют смысл для ЭВМ, если время поиска вариантов слишком велико. Таким образом, между теоретической разрешимостью задачи и ее практической реализацией оказывается пропасть, и мы вынуждены прибегать к эвристическим приемам с неформализованными, в смысле математики, исходными данными и алгоритмами так называемой нечеткой логики.

Приведем пример. При моделировании расписания работ (календарное планирование) иногда имеют список из тысячи и более работ. Возникает ситуация, когда сложность задачи из-за ее большой размерности не позволяет использовать ЭВМ. Для пересчета всех возможных вариантов в некоторых задачах требуется время, сравнимое со временем существования нашей галактики, и сегодняшнее бурное развитие вычислительной техники вряд ли спасет нас от этого «проклятия размерности».

Выход из создавшегося положения заключен в использовании эвристических методов, который связан с использованием неформальных приемов при решении задач, не имеющих разработанных алгоритмов или многомерных задач, о которых говорилось выше. В эвристических методах отсутствуют привычные для математика обоснования применимости. Оправданием и обоснованием эвристики или неформального приема решения проблемы являются наши правдоподобные рассуждения, интуиция и опыт, подтвержденные и дополненные машинным экспериментом.

В настоящее время концепция математической модели постепенно приводит нас к широкому применению эвристических приемов в проблеме оптимальных систем. Рассмотрим один из таких приемов, разработанный Н. Н. Моисеевым.

### 5.2.2. Метод ранжирования работ (метод Н. Н. Моисеева)

Ранжирование работ — это процедура, которая приписывает работам календарного графика их вес (относительную значимость). Такая процедура качественно упрощает задачу, так как большое множество неупорядоченного числа работ становится меньшего размера и упорядоченным. Этот метод мы рассмотрим на конкретном примере.

Проблема составления расписания работ особенно актуальна, когда число их в строительном проекте велико. Предположим, что необходимо выполнить некоторый перечень строительных работ  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . При этом

работы должны производиться в определенной последовательности. Работа  $P_i$  не может начаться раньше, если некоторый список работ  $P_{i1}, \dots, P_{ik}$  (где  $i$  — номер работы,  $(1, \dots, k)$  — последовательность предшествующих работ) не будет выполнен.

План реализации проекта сводится к тому, что для каждого интервала времени  $t$  нужно назвать перечень работ и доли  $U(t)$  этих работ, которые должны быть реализованы таким образом, чтобы суммарное время выполнения проекта было минимальным. Задача построения расписания выполнения работ может быть решена простым перебором, поскольку имеется лишь конечное число возможных вариантов. Однако если число работ велико, то реализация перебора практически невозможна из-за огромных затрат машинного времени.

В настоящее время предложено много разных подходов к приближенному решению задачи теории расписаний. Как выйти, вернее, как обойти эту трудность? Попробуем произвести ранжирование работ, т. е. приписать работам «вес» и по ним предопределить порядок их выполнения, учитывая важность. Рассмотрим один из приемов ранжирования, предложенных Н. Н. Моисеевым в 1960 г. [17]. Этот пример относится к задачам, принадлежащим теории расписаний.

Пусть имеем граф (рис. 5.1), описывающий некоторый проект, содержащий 14 работ. Принципиально рассмотренный ниже пример безотносителен к природе задачи, а его алгоритм является универсальным при упорядочении работ любого характера, в том числе и строительного.

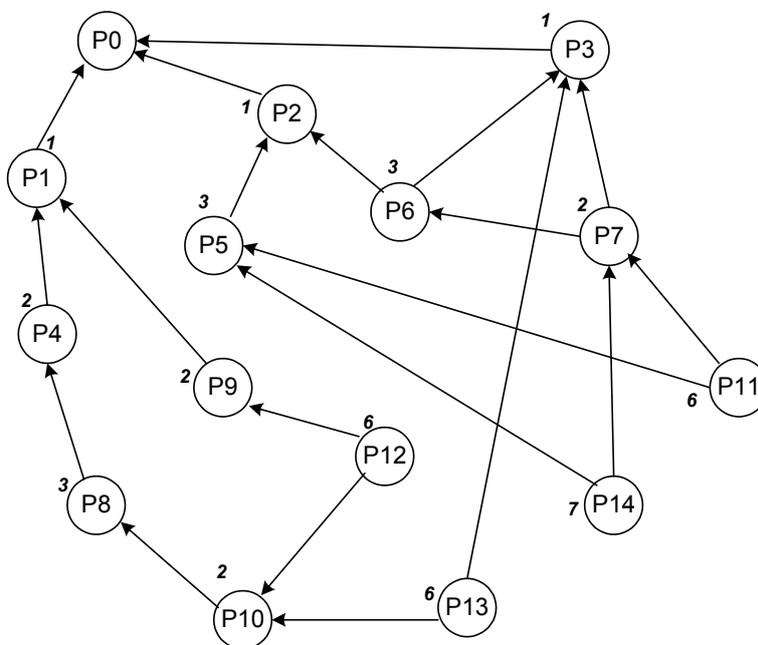


Рис. 5.1. Граф работ для демонстрации эвристики Н. Н. Моисеева

Рассмотрим поэтапно решение задачи по определению важности работ. Работы  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  завершают проект и они одинаково важны. Припишем им вес  $\gamma_i = 1$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Но если взять  $P_4$  и  $P_9$ , то их вес будет равен 2, так как им предшествуют  $P_0$  и  $P_1$ . Работа  $P_5$  получает вес  $\gamma_5 = 3$ , так как ей предшествуют  $P_0$ ,  $P_1$  и  $P_2$ . Работа  $P_{11}$  предшествует шести работам  $\gamma_6 = 6$  и т. д.

Проводить подсчет весов удобно с помощью нижеприведенной матрицы рангов, составленной аналогично таблицам для сетевых моделей с использованием графов.

Узлы	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	Ранги
$P_0$																0
$P_1$	1															1
$P_2$	1															1
$P_3$	1															1
$P_4$	1	1														2
$P_5$	1	1	1													3
$P_6$	1		1	1												3
$P_7$	1			1												2
$P_8$	1	1	1													3
$P_9$	1	1														2
$P_{10}$	1	1			1				1							4
$P_{11}$	1	1	1	1		1		1								6
$P_{12}$	1	1			1	1			1	1						6
$P_{13}$	1	1		1	1				1		1					6
$P_{14}$	1	1	1	1		1	1	1								7

В таблице ранжирование работ видно более четко. Наиболее «тяжелой» оказалась группа, состоящая из единственной работы  $P_{14}$ . Ее вес равен семи. Следующая группа работ с весом, равным шести, —  $P_{13}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{11}$ . Работа  $P_{10}$  имеет вес 4. Подобное ранжирование удобно во многих отношениях, но самой важной его особенностью является то, что работы, принадлежащие к одной группе, независимы: их можно производить в любом порядке, в том числе и одновременно.

Объединив вершины с одинаковыми рангами, получим некоторый линейный граф (рис. 5.2). Вершина  $Q_i$  является объединением всех работ с весом  $\gamma_i$ . Все расчеты для графа такой простой структуры уже никакого труда не составляют.

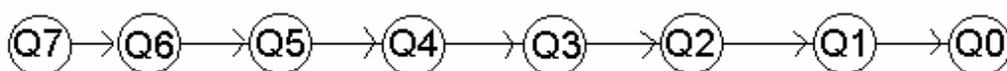


Рис. 5.2. Линейный граф, полученный в результате ранжирования работ. Каждый узел содержит список работ с одинаковой относительной важностью

Эвристики Н. Н. Моисеева используют при реализации крупных проектов, когда число работ достигает тысячи, и имеет значительный экономический эффект как с точки зрения сдачи под ключ, так и экономии сырьевых и трудовых ресурсов.

### 5.2.3. Разработка маршрута доставки материалов

Разработка маршрута и расписания перевозок грузов лежит в основе многих операций строительного производства. В некоторых случаях доставка строительных материалов — одно из наиболее важных звеньев строительного бизнеса. В любом случае от правильно разработанного расписания и маршрута транспорта зависит качество производства строительных конструкций и сооружения в целом.

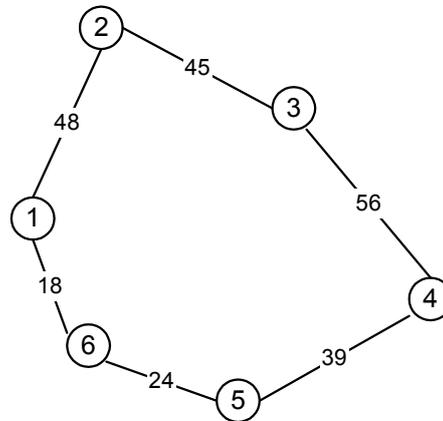
Цель разработки маршрута и составления расписания сводится к минимизации общей стоимости перевозок, куда входят стоимость транспортного средства, километраж и затраты на персонал. Например, при разработке маршрута и расписания цементовоза обычная цель — минимизировать время передвижения. Для срочного обеспечения материалами строительной площадки минимизация времени выполнения заказа имеет первоочередную важность. Своевременный ввод в эксплуатацию жилого здания зависит от своевременности поставок строительных деталей и оборудования к месту строительства. Таким образом, и в государственном, и в частном секторах соответствующая целевая функция должна предусматривать нечто большее, чем стоимость доставки.

Задача разработки маршрута формулируется в сетевой постановке. Использование графов удобно тем, что позволяет представить проблему визуально. В качестве примера обратимся к рис. 5.3. Узлы со 2 по 6 представляют собой пункты доставки, а узел 1 — базовый узел, где начинается и заканчивается передвижение транспортного средства. Узлы соединены между собой коммуникациями, которые изображаются дугами, соединяющими соответствующие вершины. Дуги в таких задачах описывают время, стоимость перевозки или расстояние от одного узла до другого. Числа на дугах означают расстояния в км. Учитывая среднюю скорость поездки, расстояние легко преобразовать во время (игнорируются физические преграды — горы, труднодоступные места или транспортные пробки).

Сеть, представленную на рис. 5.3, можно рассматривать как маршрут протяженностью 230 км для одного транспортного средства. В этом случае маршрут будет: 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 1. Аналогично, так как дуги ненаправленные, маршрут 1 → 6 → 5 → 4 → 3 → 2 → 1 также будет являться одним из возможных. Представленный маршрут — результат уже решенной задачи, цель которой найти оптимальный путь по критериям «расстояние» или «время поездки». Минимизация в такой задаче возможна при следующих условиях:

- 1) маршрут должен включать все узлы;
- 2) узел должен быть посещен только однажды;
- 3) маршрут должен начинаться и заканчиваться в одном базовом узле.

Рис. 5.3. Пример маршрутной сети



Результатом всех компьютерных программ разработки маршрутов является одно и то же: это оптимальный маршрут для транспортного средства или коммивояжера фирмы. Классификация задач по разработке маршрута доставки материалов зависит от характеристик строительной фирмы — количества транспортных средств и их дислокации. Решение задачи для одного транспортного средства, когда каждый узел посещается только один раз, а маршрут начинается и заканчивается в базовом узле, называют задачей коммивояжера.

В случае нескольких транспортных средств происходит расширение задачи коммивояжера, которое называется задачей многократного коммивояжера. При этом цель — создать индивидуальный маршрут для каждого транспортного средства и каждый узел посещает только одно транспортное средство, а у каждого транспортного средства более одного пункта назначения. Количество груза при этом не ограничивается. Как и в случае одного транспортного средства ищется набор маршрутов с минимальными затратами.

#### 5.2.4. Алгоритм ближайшего соседа

Задача коммивояжера — это одна из наиболее распространенных задач в управлении перевозками. Оптимальные подходы к решению основаны на математическом программировании. В действительности же большинство таких задач не имеет точного решения из-за своей большой размерности. Когда проблема настолько многомерна, что получить оптимальное решение не представляется возможным, а приближительные решения вполне подходят, применяются эвристические методы. Рассмотрим два наиболее часто используемых эвристических метода решения задачи коммивояжера — алгоритм ближайшего соседа (АБС) и эвристическая экономия.

Алгоритм ближайшего соседа ищет маршрут по стоимости от последнего посещенного узла до ближайшего узла, из оставшихся в сети. Такой подход позволяет получить оптимальное решение приближенно по шагам:

- 1) выбрать начальный узел (базовый узел);
- 2) найти узел, ближайший к последнему узлу, включенному в маршрут;
- 3) повторять шаг 2 до тех пор, пока не будут добавлены все узлы;
- 4) соединить первый и последний узлы для создания полного маршрута.

Алгоритм опирается на данные о расстоянии или стоимости между узлами в виде матрицы расстояний. Если дуги не направлены, то расстояние от узла  $i$  до узла  $j$  будет таким же как от  $j$  до  $i$  (сеть симметрична). Ниже приведена матрица расстояний для сети с шестью узлами (рис. 5.4).

От пункта	До пункта, км					
	1	2	3	4	5	6
1	—	54	28	105	82	41
2	54	—	50	95	50	85
3	28	50	—	78	60	36
4	105	95	78	—	50	95
5	82	50	60	50	—	92
6	41	85	36	95	92	—

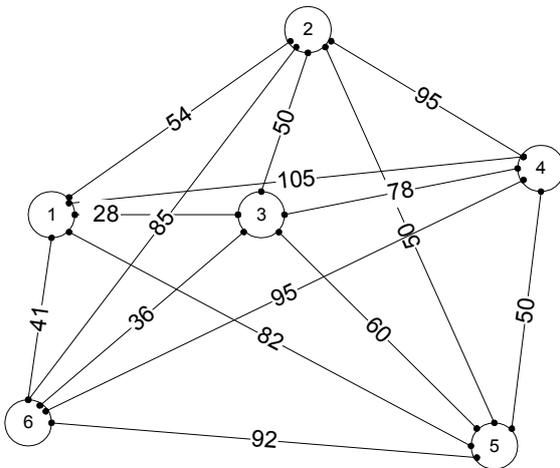


Рис. 5.4. Исходная конфигурация сети для моделирования наилучшего маршрута методом ближайшего соседа

На рис. 5.5 демонстрируется алгоритм решения задачи.

1. Выбрать базовый узел (узел 1). Проверить расстояние между узлом 1 и всеми другими узлами. Ближайшим к узлу 1 является узел 3, поэтому определим частичный маршрут:  $1 \rightarrow 3$  (рис. 5.5, а).

2. Найти узел, ближайший к последнему посещенному узлу (узел 3). Узел 6 отстоит на 36 км от узла 3, результатом будет путь из трех узлов  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6$  (рис. 5.5, б).

3. Найти узел, ближайший к узлу 6. Это узел 2, до которого 85 км. Получаем:  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 2$  (рис. 5.5, в).

4. Ближайшим к узлу 2 является узел 5:  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 2 \rightarrow 5$  (рис. 5.5, *з*).

5. Соединить последний узел (узел 4) с базовым. Весь маршрут будет:  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ . Протяженность маршрута составляет 354 км (рис. 5.5, *е*).

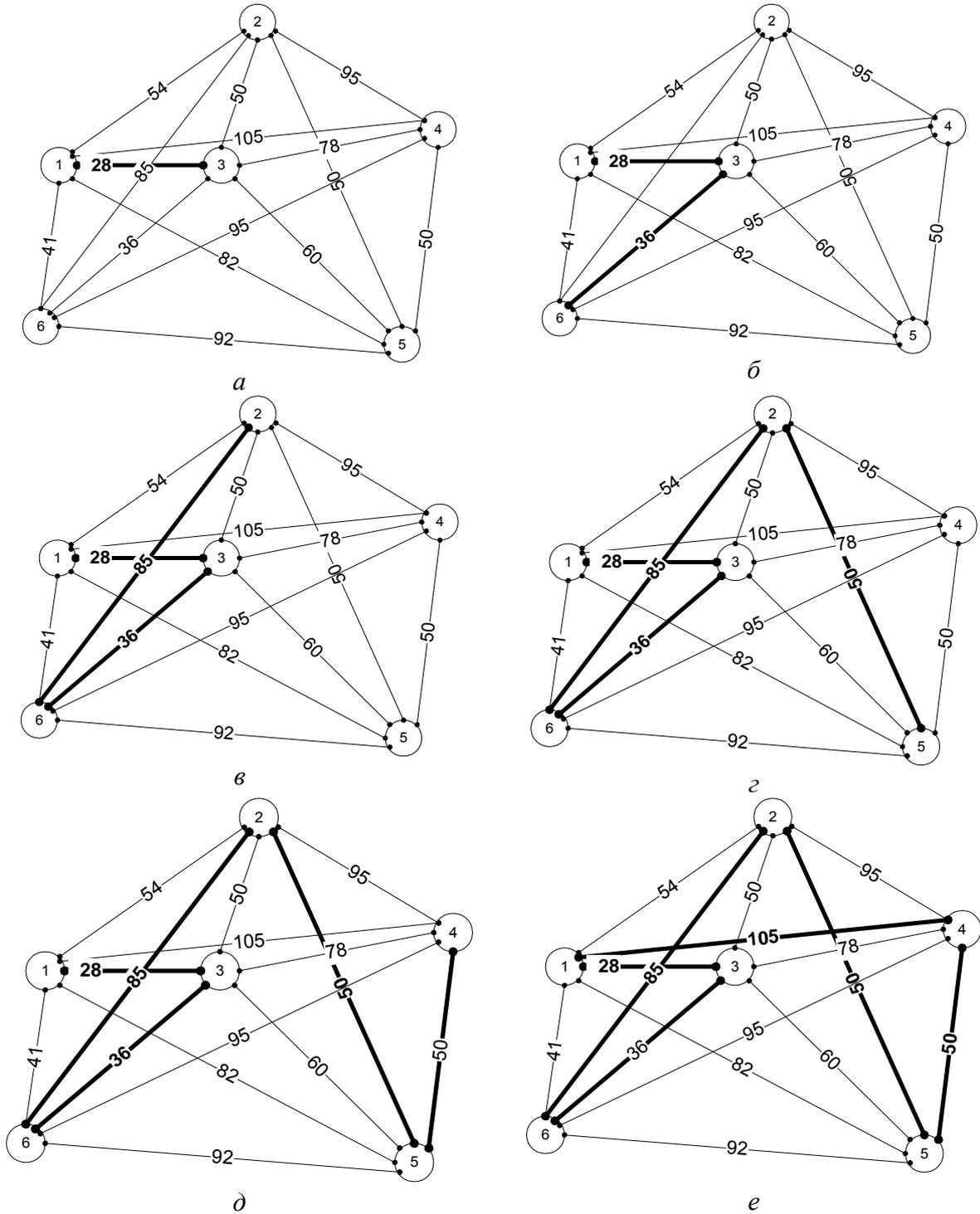


Рис. 5.5. Процедура алгоритма ближайшего соседа

Простота алгоритма ближайшего соседа имеет «подводные камни», как это часто бывает в таких ситуациях. Будет ли этот маршрут оптимальным? Оказывается, что маршрут  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 1$  имеет меньшее расстояние равное 309 км, чем по АБС. Этот факт указывает на ограниченность эвристических подходов: они не могут гарантировать полную оптимальность. Для этой маленькой сети можно перечислить все возможные маршруты. Однако для крупных задач со 100 и 200 узлами перечисление каждой комбинации нереально и применение эвристики будет оправдано: ведь АБС находит маршрут, близкий к оптимальному.

### 5.2.5. Эвристическая экономия

Этот метод является одним из наиболее известных методов решения задачи коммивояжера. Алгоритм начинается с выбора базового узла и присвоения ему номера 1, из которого доступно  $(n - 1)$  пунктов.

Каждое транспортное средство идет из базового узла к ближайшему узлу назначения и возвращается в базовый узел. Но это неправильное решение, потому что в задаче коммивояжера требуется найти маршрут, в котором все узлы посещаются одним транспортным средством, а не двумя, как показано на рис. 5.6. Чтобы сократить число транспортных средств, нужно объединить  $(n - 1)$  указанных маршрутов.

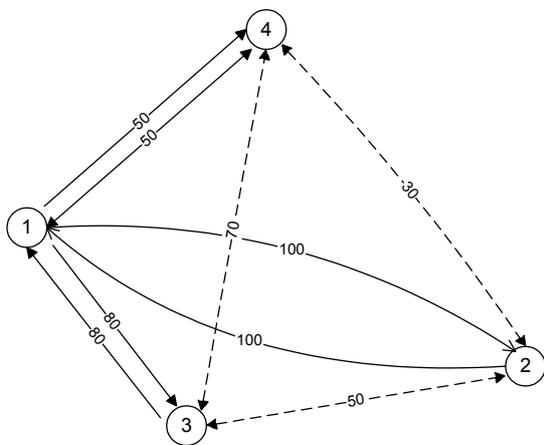


Рис. 5.6. Начальная сеть для задачи с четырьмя узлами

Ключом к данному эвристическому подходу является вычисление экономии. Экономия — это то, насколько можно сократить стоимость поездки с помощью «сцепления» пары узлов (в случае на рис. 5.6 — это узлы 2 и 3) и создания маршрута  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$  для одного транспортного средства. Экономия вычисляется следующим образом. Связывая узлы 2 и 3, добавляем 50 км (расстояние от узла 2 до узла 3), но экономим 100 км на поездке от узла 2 до узла 1 и 80 км на поездке от 3 до 1. Протяженность полного маршрута  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$  равна 230 км. Полученная экономия составляет 130 км.

Для сети с  $n$  узлами вычисляем экономию для каждой пары узлов, оцениваем сэкономленную прибыль от самого большого значения до самого малого и строим маршрут, составляя пары узлов до тех пор, пока не получим полный маршрут.

Алгоритм эвристической экономии:

- 1) выбрать базовый узел;
- 2) вычислить экономию  $S_{ij}$  для пары узлов  $i$  и  $j$ :  $S_{ij} = c_{1i} + c_{1j} - c_{ij}$ , где  $c_{ij}$  — стоимость поездки от узла  $i$  к узлу  $j$ ;
- 3) расположить значения экономии от большего к меньшему;
- 4) начиная с верхней позиции списка, формировать более крупные подмаршруты, соединяя соответствующие узлы  $i$  и  $j$  до тех пор, пока не будет получен полный маршрут.

Продолжим работу алгоритма (см. рис. 5.6), считая, что каждый узел посещается только одним транспортным средством. Сплошные линии изображают дуги, действующие на момент начала процедуры. Пунктирные линии показывают дуги, которые можно использовать, но в данный момент они не задействованы. Экономия, полученная от соединения узлов 2 и 3, уже подсчитана и составляет 130 км. Это вычислено по формуле:  $S_{23} = c_{12} + c_{13} - c_{23} = 100 + 80 - 50$  км. 100 и 80 км — расстояния обратной поездки из узлов 2 и 3 в базовый узел; 50 км — расстояние от узла 2 до 3. Экономия от соединения узлов 2 и 4 составляет 120 км:  $S_{24} = c_{12} + c_{14} - c_{24} = 50 + 100 - 30$  км. Последняя пара узлов — 4 и 3, соединение которых дает экономию в 60 км:  $S_{34} = c_{13} + c_{14} - c_{34} = 50 + 80 - 70$  км.

Оценим экономию для каждой пары узлов, которые еще не соединены. Следующие по порядку пары: [2; 3], [2; 4] и [3; 4]. Сначала связываем узлы с самой большой экономией — 2 и 3. Переходя к следующей величине экономии, связываем узлы 2 и 4. Общая экономия, полученная на маршруте, равна 250 км.

В общем случае при построении маршрута алгоритм экономии позволяет получить более оптимальное решение, чем АБС. Рассмотренные алгоритмы можно применить к задачам с направленными дугами в виде модели с ориентированными графами.

### 5.2.6. Составление маршрута для строительного транспорта

Ставится более сложная задача, расширяющая задачу коммивояжера, включая разные запросы грузов в узлах и разные грузоподъемности транспортных средств. Цель таких задач — минимизировать общую стоимость на всех маршрутах. Примером перевозок, требующих решения задачи составления маршрута для транспорта, может служить доставка строительных материалов на строительные площадки.

Задача составления маршрута для транспорта не может быть полностью решена с помощью тех же процедур, что задача многократных поездок коммивояжера.

Рассмотрим простой пример, показанный на рис. 5.7, где всего один базовый узел и два транспортных средства. Грузоподъемность транспортного средства 1 составляет 20 т, а второго — 10 т. Требуется взять груз в трех пунктах (количество требуемого груза указано в скобках около каждого узла) и доставить его в базовый узел.

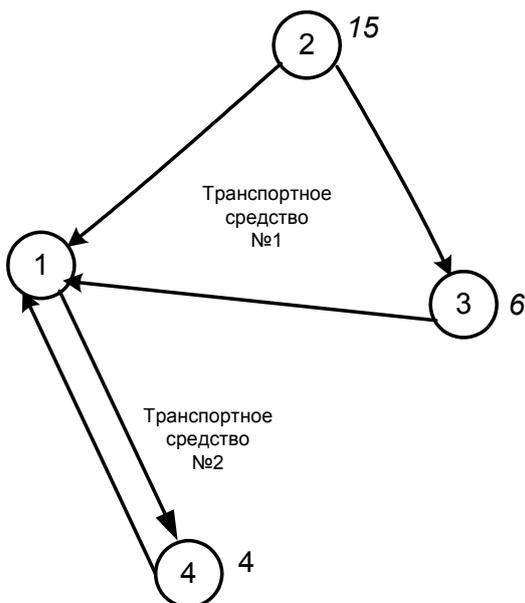


Рис. 5.7. Задача составления маршрута транспорта для четырех узлов

Игнорируя вначале грузоподъемность транспортных средств и спрос в каждом узле, с помощью эвристического алгоритма экономии определим маршруты для каждого транспортного средства:

- 1) транспортное средство 1: 1 → 2 → 3 → 1;
- 2) транспортное средство 2: 1 → 4 → 1.

Однако при таком распределении в транспортном средстве 1 окажется 21 т груза, что превышает его вместимость, и задача не решается как задача для многократных поездок коммивояжера. Особенности решения задачи составления маршрута транспорта с учетом грузоподъемности значительно усложняют поиск формального решения. Вместе с тем приемлемое эвристическое решение можно получить с помощью концепции «кластер — маршрут».

Метод «кластер — маршрут» проиллюстрируем на примере. На рис. 5.8 показана задача с 12 узлами, в которой два транспортных средства должны доставить груз к 11 станциям и вернуться на базу. Спрос на грузы указан в скобках возле каждого узла, а расстояния в км указаны на дугах.

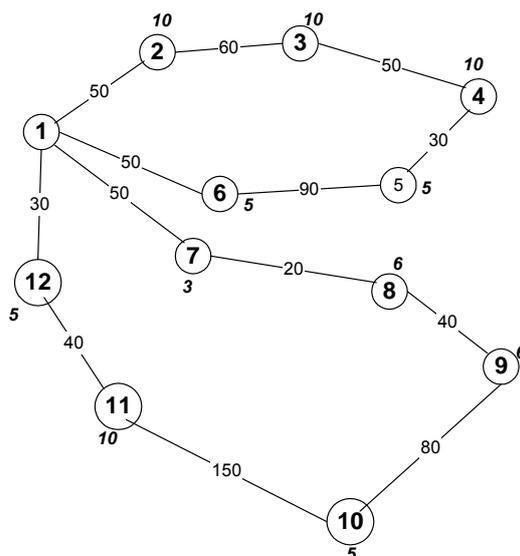


Рис. 5.8. Задача составления маршрута для транспорта

Сначала из 12 узлов формируют два кластера, один для каждого транспортного средства. Узлы со 2 по 6 предназначены для транспортного средства 1, а узлы с 7 по 12 — для транспортного средства 2. Узел 1 — базовый. На практике формирование кластеров учитывает физические преграды: реки, горы или межгосударственные автостреды, а также географические области, такие как пригороды и города, образовавшие собственную инфраструктуру. В этом примере вместимость транспортных средств 1 и 2 равна соответственно 45 и 35 т.

Сформировав кластеры, видим, что транспортное средство 1 должно перевезти 40 т, а транспортное средство 2 — 34 т. Оба назначения выполнимы (т. е. спрос не превышает вместимость транспортного средства). Используя эвристику экономии, строим маршрут для транспортного средства 1:  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 1$  протяженностью 330 км. Маршрут транспортного средства 2:  $1 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 1$  длиной 410 км.

Определим возможность переноса узлов из более длинного маршрута (маршрут 2) на маршрут 1 так, чтобы транспортное средство 1 не было перегружено и общая длина обоих маршрутов уменьшилась. Выделим узлы в маршруте 2, которые расположены ближе всего к маршруту 1 (узлы 7 и 8). В узле 8 спрос составляет 6 т, поэтому его нельзя присоединить к маршруту 1 без превышения вместимости транспортного средства 1. Однако в узле 7 спрос составляет 3 т и его можно перенести. Определим, в какую точку маршрута 1 можно вставить узел 7 так, чтобы сократить общую протяженность. Задачу будем решать с помощью метода минимальной стоимости вставки.

Минимальная стоимость вставки рассчитывается также, как эвристика экономии. Для симметричной матрицы стоимость вставки вычисляется

по формуле:  $I_{ij} = c_{ik} + c_{jk} - c_{ij}$ , где  $c_{ij}$  — расстояние от  $i$  до  $j$ . Узлы  $i$  и  $j$  всегда находятся в маршруте, а узел  $k$  — это тот узел, который вставляется. На рис. 5.8 узел 7 является кандидатом для вставки, потому что находится близко к маршруту 1. Узел 7 можно вставить между узлами 6 и 1 или между узлами 5 и 6. Оба варианта надо оценить. Чтобы вычислить стоимость вставки узла 7 в маршрут 1, требуется дополнительная информация о расстоянии, представленная в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Дополнительная информация о расстояниях

Из узла	К узлу	Расстояние
1	7	50
6	7	30
5	7	60
1	5	130
1	8	60

Стоимость вставки узла 7 между узлами 1 и 6 составляет 30 км:  $I_{16} = c_{17} + c_{67} - c_{16} = 50 + 30 - 50 = 30$  км. Стоимость вставки узла между узлами 5 и 6 равна 0:  $I_{56} = c_{57} + c_{67} - c_{56} = 60 + 30 - 90$ . Самая низкая стоимость определена для вставки узла 7 между узлами 5 и 6. В результате завершённый маршрут получается  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 1$ .

На рис. 5.9 показано пересмотренное решение. Общая протяженность маршрута 1 теперь составляет 330 км, а протяженность маршрута 2 — 400 км. Расстояние, которое должны проехать два транспортных средства, уменьшилось с 410 до 400 км. Рассмотренный пример можно использовать в ситуациях, когда спрос на перевозки в узлах изменяется во времени и транспортные средства вынуждены делать порожние пробеги.

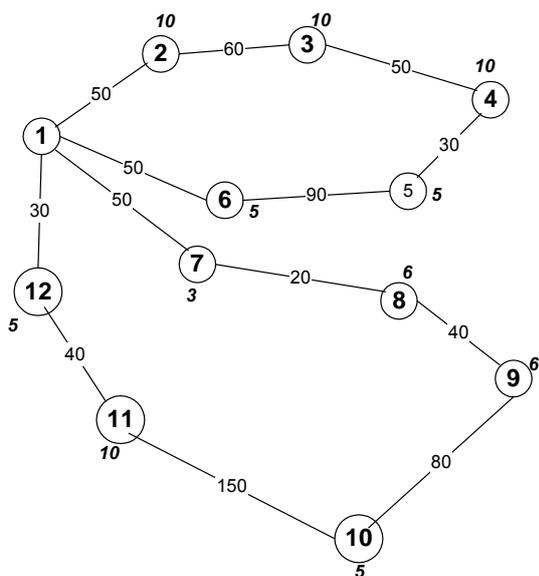


Рис. 5.9. Пересмотр решения для маршрута транспорта

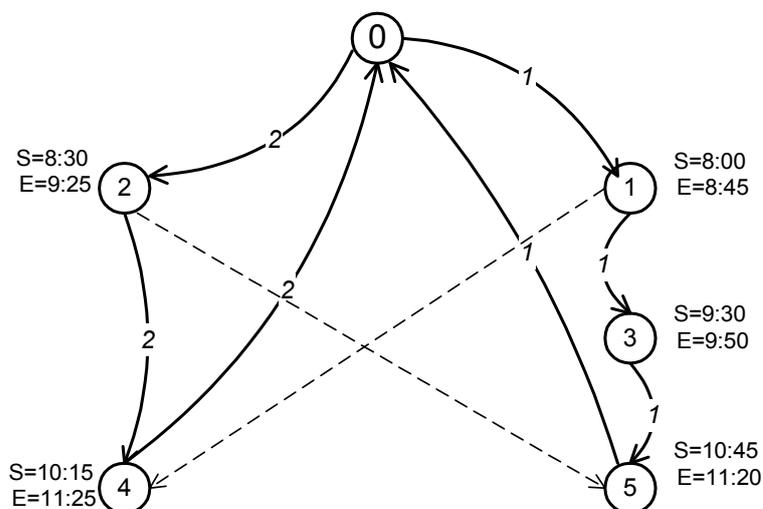
### 5.2.7. Разработка расписания доставки стройматериалов

При составлении расписания обычно приходится вписываться в жесткие временные рамки начала и окончания доставки груза. Если время ограничивается «временным окном»: бетон должен быть доставлен между 11 ч 30 мин и 13 ч. Это пример окна с двумя краями. Временное окно с одним краем ограничивает только время начала или время окончания предоставления услуги. Например, большинство строительных заводов стараются доставить раствор до 7 ч утра. Задача значительно усложняется, когда строительные материалы поставляются многократно одному и тому же потребителю в рамках недельного расписания.

В общем случае входные данные для разработки расписания состоят из набора заданий с временем начала и окончания и набора направленных дуг с фиксированными точками начала и конца. Парк транспортных средств может быть размещен в одном или нескольких базовых узлах.

Граф на рис. 5.10 демонстрирует задачу по составлению расписания с пятью заданиями и одним базовым узлом. Задания обозначены узлами. Каждое задание имеет время начала ( $S$ ) и окончания ( $E$ ). Направленные дуги означают, что два задания даны одному и тому же транспортному средству. Пунктирные дуги показывают события, которых в расписании еще нет.

Рис. 5.10. Расписание для сети с пятью заданиями ( $S$  — время начала;  $E$  — время окончания)



Дуга соединяет узел  $i$  с узлом  $j$ , если время начала задания  $j$  наступит позже, чем время окончания задания  $i$ . Кроме того, от окончания задания  $i$  до начала  $j$  должно пройти некоторое время, в данном примере 45 мин. Это так называемое время бесплатного проезда — непродуктивное время для перемещения от места одного задания к месту другого или для возвращения в базовый узел порожняком. Длина пути не ограничивается, а каждое транспортное средство должно начинать и завершать свой путь в базовом узле.

Чтобы решить эту задачу, пункты назначения надо распределить по маршрутам и транспортным средствам. Если минимизировать число маршрутов, то число необходимых транспортных средств и затраты на них тоже станут минимальными. Если каждой дуге присвоить вес, пропорциональный или равный времени поездки по этой дуге (т. е. время бесплатного проезда), то представляется возможным минимизировать количество персонала, а также время и стоимость обслуживания транспортного средства.

Параллельное расписание составляется по схеме, изображенной на рис. 5.10.

Пошаговое выполнение алгоритма:

1. Расположить все задания в порядке очередности времени начала (табл. 5.2).

2. Определить первое задание для ТС 1.

3. Если есть возможность назначить следующее задание, назначить его тому ТС, у которого для этого задания будет минимальное время бесплатного проезда. Если такой возможности нет, то взять следующее ТС и определить задание для него.

Таблица 5.2

*Расписание перевозок для двух транспортных средств*

Вид транспорта	Задание	Время начала перевозок
ТС 1	1	8:00
	3	9:30
	5	10:45
ТС 2	2	8:30
	4	10:15

В табл. 5.3 представлено время начала и окончания для 12 заданий. Время бесплатного проезда равно 15 мин. Задача решается методом параллельного расписания. Сначала назначаем задание 1 ТС 1. Так как задание 2 начинается до того, как машина 1 освобождается, это задание дается машине 2. Машина 2 завершает задание 2 вовремя и приступает к заданию 3. За это время ТС 1 завершает задание 1 и может приступить к заданию 4. Третье ТС не требуется до тех пор, пока не появится задание 5, когда ТС 1 и 2 заняты заданиями 4 и 3 соответственно. Продолжая, получаем расписание для первого ТС: 1 → 4 → 7 → 10 → 1, для второго: 2 → 3 → 6 → 9 → 12 и для третьего: 5 → 8 → 11 → 1. Данные о времени выполнения заданий и расписание на примере параллельного расписания приведены в табл. 5.4. и на рис. 5.11.

Таблица 5.3

Данные для начала и окончания заданий

Задание	Начало	Окончание	Задание	Начало	Окончание
1	8:10	9:30	7	13:00	13:45
2	8:15	9:15	8	13:15	12:45
3	9:30	10:40	9	13:45	15:00
4	9:45	10:45	10	14:00	14:45
5	10:00	11:30	11	15:00	15:40
6	11:00	11:45	12	15:30	16:00

Таблица 5.4

Пример параллельного расписания

Вид транспортного средства	Задание	Время начала
ТС 1	1	8:10
	4	9:45
	7	13:00
	10	14:45
ТС 2	2	8:15
	3	9:30
	6	11:00
	9	15:00
	12	16:00
ТС 3	5	10:00
	8	13:15
	11	15:40

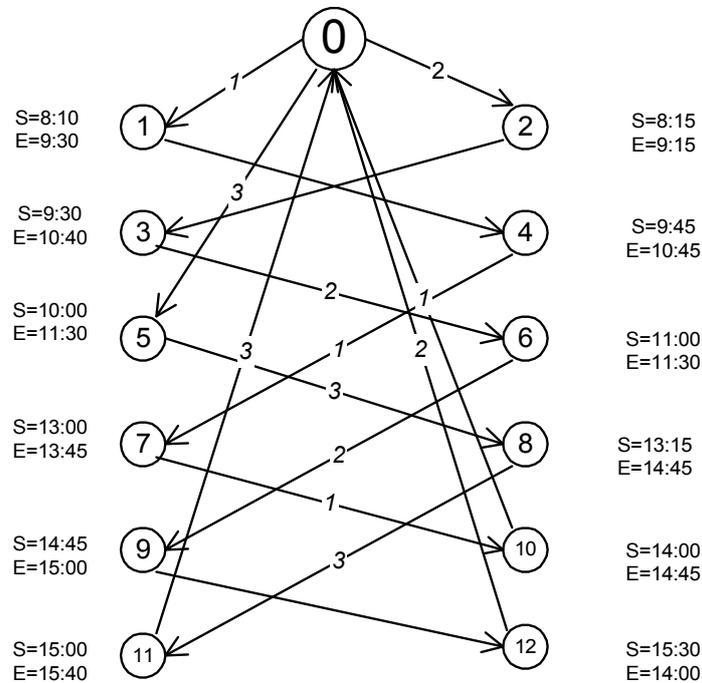


Рис. 5.11. Схема расписания перевозок в виде ориентированного графа (S — время начала; E — время окончания)

При распределении рабочих на строительном участке часто требуется укомплектовывать персоналом (грузчиками), обеспечивающим транспортировку доставляемых грузов. При этом необходимо учитывать связь этих двух факторов, так как расписание движения транспорта зависит от количества персонала и наоборот. Обычно сначала составляется расписание транспорта, а затем планируется численность рабочих. Такой способ подходит к перевозкам, где расходы на персонал малы по сравнению со стоимостью эксплуатации транспортного средства. Однако для некоторых случаев это не подходит совсем, например, для системы массовых перевозок, где расходы на персонал могут составлять до 80 % стоимости всего обслуживания. В таких системах лучше сначала планировать персонал, затем расписание транспортных средств или делать это одновременно.

Задач с одновременным составлением маршрута и расписания достаточно много. Некоторые задачи по планированию маршрута могут решаться с использованием характеристик объединенной задачи. Например, снегоочистители могут сначала очистить улицы с большим потоком людей и машин, а затем менее загруженные улицы. Кроме того, обычно повторяющиеся операции зависят от количества выпавшего снега. Эти компоненты вносят корректировку в составление расписания в задаче по планированию маршрута. Поскольку в такую задачу могут быть вовлечены буквально тысячи переменных, оптимальное решение получить невозможно. Чтобы решать реальные задачи такого уровня, ученые в области менеджмента разработали изящные процедуры принятия решения, которые используют эвристические подходы и получают «хорошие», хотя и не оптимальные, маршруты и расписания.

Для менеджеров, работающих в сфере снабжения строительными материалами, при разработке эффективного маршрута и расписания для транспорта надо решить эти две важные и трудные задачи. Плохое планирование обходится дорого, и тот, кто принимает решение, должен хорошо построить систему, чтобы быть уверенным, что потребности заказчика удовлетворяются своевременно и рентабельно. Разработка маршрута и расписания начинается с описания заказа. Характеристики могут быть такими: где локализуется спрос — в узлах или на дугах, ограничено ли время поставки, имеет ли значение вместимость транспортного средства. В зависимости от этих характеристик рассматривается тот или иной тип задачи. От типа задачи зависит способ ее решения.

Подводя итог, отметим, что в основном рассматривались эвристические приемы задач по разработке маршрута, составлению расписания, также объединенные, включающие разработку и маршрута, и расписания. Способы оптимизации таких задач основаны на математическом программировании и исследовании операций. Однако в строительной практике

часто бывает достаточно просто хорошего решения. Чтобы получить хорошее решение, разработано несколько эвристических подходов. Были представлены два известных алгоритма для решения задачи коммивояжера — алгоритм ближайшего соседа и эвристическая экономия. Также был представлен способ минимальной стоимости вставки узла для использования в разработке маршрута транспорта.

Метод «сначала кластер, затем маршрут» ориентирован на моделирование перевозок в сгруппированных областях. Однако есть и другая эвристика, называемая «сначала маршрут, затем кластер», которая больше подходит для случаев, в которых точки спроса рассеяны равномерно. Процедура начинается с маршрута, построенного с применением эвристики. Этот маршрут не подходит, потому что не используются все транспортные средства. Следующий шаг разделяет этот маршрут на более мелкие так, чтобы использовались все транспортные средства, а маршруты выстраивались от узлов, которые сгруппированы в кластеры из модели инфраструктуры.

Задача минимальной стоимости потока является частным случаем задачи сети, состоящей из базового узла, промежуточных узлов и узлов спроса. Суть этой общей задачи состоит в следующем. В базовом узле находятся материалы, которые должны быть доставлены в узлы спроса. Величина спроса каждого узла известна. В промежуточных узлах спроса нет. Промежуточным узлом может быть, к примеру, остановка поезда, где материал не выгружен из вагонов. В сеть входят также дуги, которые могут иметь или не иметь ограниченную вместимость. Например, дуга способна «перевозить» от 0 до 20 т материала. Кроме того, известна стоимость перевозки по дуге единицы материала. Цель задачи — найти наименьшие значения стоимости перевозки (составление маршрута) материала от базового узла до узлов спроса. Решение этой задачи выходит за рамки нашего учебника. При желании она может явиться основополагающей концепцией при разработке алгоритма и внедрена в практику строительного бизнеса. Рассмотренный нами ранее алгоритм о максимальном потоке может быть также применен здесь с определенными в условиях задачи допущениями.

Если интервалы времени между работами малы, то можно перейти к континуальной модели и использовать дифференциальные уравнения. Изменение состояния выполнения работы под номером  $i$  можно описать уравнением

$$p_i = \lambda_i(t), i = 1, 2, \dots, n, \quad (5.1)$$

где  $\lambda_i(t)$  — интенсивность выполнения  $i$ -й работы, доля  $p_i$  которой была бы выполнена в единицу времени.

От чего зависит  $\lambda_i$ ? Естественно предположить, что главный фактор быстроты выполнения работы — это ее ресурсное обеспечение (сырьевые и трудовые ресурсы).

Пусть, например, требуется выделить  $\alpha_{i1}$  ресурса сырья и  $\alpha_{i2}$  трудового ресурса для выполнения  $i$ -й работы. В итоге общее количество ресурса будет

$$K = \sum \sum \lambda_i(t) \alpha_{ij} = \sum \lambda_i(t) \alpha_{i1} + \sum \lambda_i(t) \alpha_{i2}. \quad (5.2)$$

Эта величина ограничена запасами сырья на складе и количеством штатного персонала:

$$\sum \lambda_i(t) \alpha_{i1} \leq q_1(t), \quad \sum \lambda_i(t) \alpha_{i2} \leq q_2(t). \quad (5.3)$$

В данном случае математическая модель (5.2—5.3) приведена в формальном виде и может быть решена при помощи методов математического программирования, если будет задана конкретная целевая функция. Итерационные процессы различной природы, хорошо разработанные в теории оптимального управления, здесь вполне применимы, и задача, поставленная перед ЛПР, может быть решена также с помощью готовых алгоритмов, поставляемых с библиотеками оптимизационных задач для ЭВМ.

Одна из идей упрощения многомерной задачи расписаний — введение промежуточных целей. Эта идея сводится к тому, что задача большой размерности разбивается на подзадачи меньшей размерности, т. е. осуществляется ее декомпозиция. Промежуточная цель позволяет, например, заменить весь календарный план на отрезки меньшей длительности. Остановимся на элементарном описании метода декомпозиции.

В способе ранжирования работ по алгоритму Моисеева каждой работе приписывается ее вес, характеризующий относительную значимость. Используя результаты работы этого алгоритма, получим список ранжированных работ, объединенных в отдельные группы, и граф меньшей размерности. Таким образом, мы уменьшаем объем вычислений для ЭВМ. Этот процесс, собственно, и является декомпозицией.

Допустим, что мы отобрали все работы  $p_i$ , такие, что их веса  $\gamma_i \geq M$ , где  $M$  — заданное число, т. е. получили некоторый список работ, удовлетворяющих требованию важности. Отбросим эти работы и будем производить ранжирование на следующем уровне и т. д.

Введение промежуточных целей — это эвристический прием, который не имеет математически строгого обоснования, и его можно отнести к неформальным процедурам. С другой стороны, это больше, чем просто интуиция ЛПР, так как при ранжировании и последующей оптимизации используют математическую обработку графа и применяют формальные алгоритмы системной оптимизации. Естественно, что для решения таких проблем необходима информация, добыча которой является отдельной

задачей, и современные информационные системы продвигаются в сторону всеобщей доступности. Такие информационные системы конкретно участвуют в управлении строительным производством.

Информационная система управления строительным объектом представляет собой совокупность массивов данных и взаимоувязанных этапов их переработки. Информация, содержащаяся в используемых массивах и документах, должна отвечать требованиям полноты, достоверности и нужной степени детализации.

В информационных системах, обеспечивающих выполнение алгоритмов технологий строительного бизнеса, должно быть соответствие между потоками информации и материалов. Структурная модель такой информационной системы содержит граф, в котором алгоритм  $j$  следует за алгоритмом  $i$ . При этом утверждается, что для реализации алгоритма  $j$  необходима информация, которая получается в результате реализации алгоритма  $i$ . Информация, поступающая в производственную систему, используется для реализации какого-либо алгоритма системы. Граф структуры информационной системы должен быть совместный, когда обеспечивается возможность реализации каждого алгоритма системы. Он не должен содержать путей бесконечной длины.

### **5.3. Неопределенность при формировании целей управленческого решения**

#### **5.3.1. Проблема формулирования цели**

Управление современным строительным производством предполагает привлечение большого количества разнообразной информации, характеризующей состояние и тенденции его развития. Объем этой информации непрерывно увеличивается. Объем экономической информации, например, увеличивается приблизительно в квадрате по отношению к росту произведенной продукции. Трудности, связанные с непрерывным возрастанием объема информации в строительном бизнесе, разрешаются путем создания интеллектуальных компьютерных информационных и управляющих систем.

Вырабатываемое решение должно приниматься комплексно, на базе общей системы сбора и передачи информации, моделирования ситуаций для руководителя, формирования и передачи решений в диалоговом режиме «руководитель — компьютерная система».

При выявлении и описании проблемной ситуации полученная информация может оказаться неполной или не совсем достоверной, что может привести к неопределенности в оценке ситуации. Устранению этой неопределенности способствует формирование полного перечня альтернативных ситуаций, суммарная вероятность возникновения которых равна единице.

На практике часто возникают случаи, когда удается сформулировать набор ситуаций, но нет ясности в том, является ли он полной группой. Определение полноты возможных ситуаций иногда невозможно из-за недостатка информации или времени на ее получение и обработку. Тогда все остающиеся неизвестные ситуации целесообразно объединить в одну общую ситуацию под названием «неизвестное», которая дополняет сформулированные ситуации до полной группы.

Вероятность  $p_k$  возникновения конкретной ситуации  $S_k$  из полного набора  $S = (s_1, s_2, s_3, \dots, s_n)$ , для которого  $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ , может быть определена двумя способами.

Первый способ основан на использовании накопленных в процессе статистических данных о возникновении этих ситуаций, в соответствии с ним  $p_k = n_k/n$ , где  $p_k$  — вероятность возникновения ситуации;  $n_k$  — число случаев, когда возникала ситуация  $S_k$ ;  $n$  — общее число случаев.

Определение вероятностей появления ситуации на основе статистики носит объективный характер. Однако возможность их определения зависит от объема имеющихся статистических данных и сохранения условий, при которых происходили прошлые события.

Во втором случае, когда требования не выполняются, вероятность возникновения ситуаций основывается на субъективных оценках экспертов. Точность определения субъективных вероятностей зависит от профессиональной компетентности и интуиции эксперта. Поэтому целесообразно проводить групповую экспертизу с соответствующей обработкой высказываний экспертов.

Неопределенность в задаче принятия решений может быть связана как с выявлением и описанием проблемной ситуации, так и с оценкой характера движения и положения, достигнутого на пути к поставленной цели, с оценкой ожидаемого эффекта.

Например, при возведении строительного объекта проблема решения состоит в определении приоритетов (теория очередей): какие участки объекта в условиях ограниченности ресурсов следует приостановить, чтобы за счет высвобождения ресурсов форсированно создать фронт работ для последующего его быстрого продвижения. В частности, летом, возможно, следует бросить все силы на создание теплоэнергетического хозяйства, чтобы зимой иметь возможность быстрого выполнения оставшихся работ, в том числе и тех, которые летом были приостановлены. Неопределенность состоит в том, в частности, как будут выполняться измененные сроки поставки оборудования, материалов и других видов ресурсов.

После выявления проблемной ситуации для принятия решения формируется множество целей. Одной целью здесь, как правило, нельзя ограничиться. Поэтому при выработке решений нужно установить градацию степени важности (приоритетность) поставленных целей.

Методы эвристических приемов используют знания и интуицию специалистов в узкой области знаний. Системный анализ оперирует знаниями из различных отраслей наук и, как правило, участие большого количества специалистов при решении одной проблемы приводит к трудностям методического характера. Иногда их (специалистов узкого профиля) просто нет в данный момент, а задачу надо решать. В таких случаях ЛПР обращается к программному обеспечению, банкам данных и знаний в памяти ЭВМ. Вместе с тем поиск и пролистывание большого объема информации занимают очень много времени, утомительно, непродуктивно да и мало чем отличается от простого пользования справочниками, учебниками, СНИПами, энциклопедиями и т. д. Нужны поисковые системы, использующие алгоритмы с подцелями и концепцию декомпозиции.

Другое направление в этой области — это разработка интеллектуальных систем на уровне искусственного интеллекта (ИИ) в виде экспертных систем (ЭС), получивших широкое распространение с внедрением вычислительной техники во все сферы деятельности человека. Они позволяют руководителю проекта, а также системному аналитику, решающему сложную комплексную проблему регионального масштаба, быстро вывести необходимую информацию из памяти компьютера и получить не только числа, таблицы, графики, изображения, но и консультацию по этой проблеме в режиме интерактивного диалога.

### **5.3.2. Коллективное принятие решений (метод Дельфи)**

Метод Дельфи получил свое название от греческого города Дельфи и мудрецов, славившихся в древности предсказаниями будущего. Впервые этот метод, разработанный в американской исследовательской организации под руководством О. Хелмера, использовался для целей военного научно-технического прогнозирования будущего. Метод Дельфи представляет собой ряд последовательно проводимых процедур, направленных на формирование группового мнения. Для этого метода характерны: анонимность опросов; регулируемая обратная связь, осуществляемая за счет проведения нескольких туров опроса; групповой ответ, получаемый с помощью статистических методов.

В основе метода Дельфи лежат следующие положения: поставленные в анкете вопросы должны допускать выражения ответа в виде числа; эксперты должны располагать достаточной информацией для того, чтобы дать оценку; ответ на каждый вопрос должен быть обоснован экспертом.

Алгоритм работы экспертов по методу Дельфи:

- 1) формулировка задачи;
- 2) выявление мнения каждого эксперта;
- 3) выявление преобладающего мнения;
- 4) выявление крайних суждений;

- 5) формулирование принципиальных расхождений между экспертами;
- 6) исследование причин расхождений во мнениях;
- 7) доведение до всех экспертов, участвующих в экспертизе, результатов, выданных каждым экспертом, и результатов обработки мнений;
- 8) анализ каждого эксперта указанных выше результатов и переоценка своего первоначального мнения (или сохранение его);
- 9) выявление преобладающего мнения.

Обычно бывает достаточно двух-четырёх раундов, чтобы выработать общее мнение, которое можно считать достоверным.

Конечная цель экспертизы — выявление картины вероятного будущего: определение возможностей, которыми следует воспользоваться, и потенциальных опасностей, которых следует избежать.

В методе исключается непосредственный контакт экспертов между собой и, следовательно, групповое влияние, возникающее при совместной работе и состоящее в приспособлении к мнению большинства. Индивидуальный опрос производится анонимно в несколько этапов. Результаты обрабатываются статистическими методами. Все эксперты знакомятся с суждениями, существенно отличающимися от общих значений.

Метод позволяет экспертам в каждом туре сопоставлять свое мнение с ответами и доводами коллег. Возможность пересмотра своих прежних оценок на основе соображений коллег стимулирует опрашиваемых к учету факторов, которые изначально были признаны несущественными. При использовании метода Дельфи уменьшается риск влияния таких психологических факторов, как присоединение к мнению большинства, нежелание публично высказывать свое мнение.

В первом туре опроса экспертам выдается анкета (лично, по почте, с помощью ЭВМ и др.), собираются ответы, обрабатываются результаты, каждый эксперт знакомится с результатами.

Во втором туре опроса результаты наносятся на шкалу, определяется среднее значение, экспертам предлагается скорректировать свою оценку, чтобы вписаться в необходимый интервал. При изменении мнения или отказе от изменения требуется объяснить свое решение.

В третьем туре всем экспертам представляются все экспертные оценки и вся аргументация (с сохранением анонимности). Если ответы экспертов перестают изменяться, это является сигналом к прекращению процедуры. По решению ведущего опрос объяснения могут представляться лишь экспертами, мнения которых существенно отличаются от среднего.

С помощью методов коллективного принятия решений с учетом важности различных ценностей удалось измерить индивидуальные и коллективные приоритеты для разных комбинаций возможных исходов. Понятия персональных и групповых приоритетов являются основой теории решений.

В связи с этим приведем несколько доводов о включении ценностей и суждений в системную парадигму. Ценности приоритетов следует включать в рациональное рассуждение для правильного отражения интересов вовлеченных лиц. Исследования источников знаний людей, реагирующих на сложные проблемы с обострением конфликта, накопление знаний и формулирование более общих концепций приоритетов служат для эффективных исходов альтернативных политик.

Существуют методы системного подхода, которые позволяют включать объективные и субъективные критерии для оценки относительной важности, приписываемой теми, кто вовлечен в процесс планирования.

Метод Дельфи представляет собой способ обработки экспертных суждений об объектах, которые трудно измерить или оценить числом. Чаще он применяется для прогнозирования. Например, по методу Дельфи можно прогнозировать будущее строительства в РФ. Это систематическая процедура, учитывающая междисциплинарные проблемы планирования. Экспертные комиссии состояются из людей, занятия которых представляют широкий диапазон профессиональных знаний. Каждая перспектива, очевидно, вносит вклад в более ясное понимание проблемы. Так, если метод Дельфи применить для оценки требований расширенной или модифицированной программы развития строительства, то она окажется полезной для получения различных перспектив борьбы с бедностью, включая мнения общественности, социальных психологов, экономистов, врачей, политиков и, конечно, нуждающихся в жилье людей.

Традиционные процессы метода Дельфи обеспечиваются путем интерактивной анонимной связи с компьютером. Члены комиссии не обсуждают ответы на вопросы, которые ставят перед ними организаторы. Анонимность и физическое разделение позволяют избежать потенциальных «ловушек» группового принятия решений, когда ее члены стремятся поддержать доминирование одного или более лиц, которые имеют склонность к лидерству или оказывают влияние на других в силу их положения в организационной иерархии.

Важным в этом методе является то, что через обратную связь обобщенный ответ группы на поставленный вопрос сообщается каждому члену комиссии. Цель обратной связи — позволить экспертам ознакомиться, как их суждения соотносятся с ответами других экспертов, не подвергаясь давлению. Обратная связь контролируется, так как экспертам предлагается ограниченная информация об ответах их коллег, т. е. им показывают усредненный ответ других членов комиссии. Этот процесс устраняет «помехи» прогнозов, так как усреднение в первую очередь действует на выпадающие из общего фона ответы. Управляемая обратная связь после нескольких туров обеспечивает основу для группового обучения и возможность корректировать свои суждения в соответствии с ответами других участников.

Метод Дельфи представляет одну из исторически первых формализованных процедур системного сбора групповых суждений в единое целое. В начале этот метод воспринимался как уникальный и творческий способ анализа проблем, для которых не существовало приемлемой теории, и не было достаточно информации, чтобы сформулировать новую теорию. Однако в процессе работы было выявлено несколько проблем. Создатели метода хотели максимально охватить расхождения во мнениях, включая в экспертную комиссию специалистов разных дисциплин. Однако введя анонимность, управляемую обратную связь и статистический групповой ответ, создатели метода тем самым непроизвольно внесли элемент «искусственного консенсуса», когда у членов комиссии была устранена возможность обсуждать допущения их суждений и в конечном счете свести процесс к усреднению мнений как окончательному продукту экспертизы. Поэтому, казалось бы, лежащий на поверхности междисциплинарный подход к прогнозированию и планированию фактически вырождается в произвольный консенсус, который терпит неудачу при попытках охватить разнообразие знаний, ценностей и надежд, имеющихся у всех участников.

Наиболее смущающая проблема традиционных форм метода Дельфи — анонимность и физическое разделение членов комиссии. Такое разделение экспертов исключает появление новых подходов к проблеме, которые могут быть выработаны и проверены в процессе дебатов и дискуссий. Традиционные процессы в методе Дельфи заметно несовершенны, так как они не в состоянии объединять элементы динамического взаимодействия между членами комиссии. Вместо этого альтернативные оценки проблемы формулируются индивидуально и тайно. Каждый участник получает после нескольких туров лишь ограниченную информацию о мнениях других членов комиссии.

Некоторые из недостатков традиционных методов Дельфи стараются преодолеть модификацией. В модификации, которая называется политизированным Дельфи, стремятся обострить конфликт, запрашивая суждения убежденных сторонников вместо суждений беспристрастных экспертов. Делается попытка включить интересы и ценности тех, на которых будут воздействовать результаты планирования. В политизированном Дельфи участники имеют возможность обмениваться идеями посредством ограниченных дискуссий и дебатов. Он устраняет процедурные слабости традиционных процессов, однако все же остается весьма трудоемким. Эксперты изолированы и анонимны в течение начальных туров процесса — и поэтому политизированный Дельфи не удастся применить при решении проблем, которые связаны с анонимными ответами. Подводя итоги, отметим, что этот метод значительно опережает процедуру простого голосования в коллективе специалистов.

## 5.4. Искусственный интеллект в управлении

### 5.4.1. Новые информационные технологии

В информационных технологиях изначально понятие «искусственный интеллект» (ИИ) было связано с областью исследований, которая к человеческому интеллекту имела довольно косвенное отношение. Имелись ввиду задачи, которые хорошо решались человеком и плохо вычислительной машиной. Задач оказалось так много, что автоматизация их решения стала обычным делом.

Искусственный интеллект, как правило, связан с распознаванием образов, пониманием естественного языка (текст или речь), планированием действий таким образом, чтобы последовательность действий приводила к требуемому результату (управление). Чем сложнее эти действия, тем больше объем вычислений.

Одной из задач ИИ является определение корреляций, связывающих две или несколько переменных, когда ЛПР пытается найти связи между объектами для их классификации с целью выработки системных определений. Задачей распознавания с помощью ИИ является выявление закономерностей на множестве сообщений, представленных для распознавания. Такие закономерности необходимо выявлять при обработке числовых массивов, графиков, текстов, процессов в экосистемах, схем управления и т. д.

Выявление закономерностей функционирования производственной системы, характера взаимодействия ее с окружающей средой является процессом познания, позволяющим предсказать поведение системы в той или иной ситуации. Процесс исследования поведения системы в этом случае обеспечивается алгоритмом, на основании которого ЛПР составляет ее модель и модель среды, где она функционирует. Сам метод заложен в программе, выявляющей общие законы поведения систем.

Примером простейшего приема здесь является случайный поиск, когда случайно изменяются исходные данные и проверяется адекватность установленной закономерности. В случае отрицательного результата алгоритм испытывает другую функциональную зависимость и снова подает ее на вход для распознавания случайным образом. Такой способ выявления аналитических закономерностей приводит к положительному результату, однако он требует больших временных затрат.

Алгоритмы выявления закономерностей необходимы при общении ЭВМ со сложной экономической средой и являются основным средством обработки информации, прогнозирования и адекватного управления в строительстве. Проблема планирования строительного бизнеса значительно шире, так как планировать действия приходится при решении

сложной задачи из области научных исследований, проектирования зданий и сооружений, анализе и экспертизе конструкций, сетевом планировании и многих др.

Схема таких задач для ЛПР состоит из постановки проблемы и разработки математической модели среды. Результатом моделирования, как правило, является представленная информация о том, что произойдет, если будет совершено то или иное действие. Располагая информацией, ЛПР планирует свои действия так, чтобы текущую ситуацию свести к целевой. Планирование действий при этом сводится к тому, чтобы складывающаяся ситуация была бы все ближе и ближе к целевой. Действуя так, компьютер «добирается» в итоге до цели, предлагая сценарий действий для руководителя.

Планирование в строительной экономике также строится с помощью модели системы, в которой реализуются бизнес-процессы. Программирование и составление алгоритмов довольно сложны, так как модели строительных систем бывают очень громоздкими. Математическая модель окружающей среды строится на основе знаний законов, результат которых нельзя предвидеть заранее — нужно сначала поставить, используя модель системы и окружающей среды, вычислительный эксперимент на компьютере. Отметим, что понятие окружающей среды должно конкретно определяться для каждой задачи отдельно, так как сложность составления математической модели зависит от того, насколько детально представлена среда в описании своей структуры.

Методы ИИ — это принципиально новая технология решения различных строительных проблем. Именно поэтому их часто называют новой информационной технологией. Применение искусственного интеллекта изменяет аппаратные средства и оказывает влияние на архитектуру ЭВМ будущего. Являясь сначала простым программным и аппаратным расширением традиционного компьютера, ИИ превращает его в интеллектуальную машину пятого поколения.

#### **5.4.2. Экспертные системы**

Экспертная система (ЭС) — это программа, которая ведет себя подобно эксперту в некоторой проблемной области. Это прикладные системы ИИ, в которых база знаний (БЗ) представляет собой формализованные эмпирические знания высококвалифицированных специалистов (экспертов) в какой-либо узкой предметной области. ЭС предназначены для замены экспертов из-за их занятости, недостаточного количества или отсутствия вообще. Они также необходимы при недостаточной оперативности решения управленческих задач.

Экспертные системы классифицируются с точки зрения их применения: для решения каких задач они используются и в какой области дея-

тельности. В связи с этим разрабатывается архитектура ЭС, состоящая из базы знаний для хранения экспертных знаний предметной области и машины вывода. БЗ состоит из набора фреймов и правил-продукций. Фреймы служат для описания самих объектов, событий и взаимосвязей между ними. Правила используются для описания отношений между объектами и событиями, определяемыми фактами (предикатами). На основе отношений, задаваемых в правилах, выполняется логический вывод из фактов. В условиях и выводах правил присутствуют ссылки на фреймы. База данных (БД) предназначена для временного хранения фактов, являющихся промежуточными решениями или результатом общения системы с внешней средой, в качестве которой обычно выступает человек, ведущий диалог с ЭС. Машина логического вывода — механизм рассуждений, оперирующий знаниями и данными с целью получения новых данных из знаний и других данных, имеющихся в БД и БЗ.

Интерфейс ЭС служит для диалога с пользователем, в ходе которого ЭС запрашивает необходимые факты для логического вывода, и дающий возможность ЛПР контролировать и корректировать ход рассуждений экспертной системы.

Подсистема объяснений разрабатывается с целью дать возможность контролировать ход рассуждений и, может быть, учиться у ЭС. При ее отсутствии экспертная система выглядит для ЛПР как «вещь в себе», решениям которой можно либо верить, либо нет.

Подсистема приобретения знаний служит для корректировки и пополнения базы знаний. В простейшем случае — это интеллектуальный редактор БЗ, в более сложных ЭС — средства для извлечения знаний из баз данных, неструктурированного текста, графической информации и т. д.

Экспертные системы включают в себя такие задачи, как диагностика состояния зданий, локализация неисправностей в оборудовании, диагностика болезни, анализ экологического и экономического состояния региона, интерпретация результатов измерений с целью составления прогноза и т. д. Интерес к экспертным системам обусловлен тем, что они ориентированы на решение широкого круга задач неформализуемых и ранее считавшихся малодоступными для ЭВМ. Важным также является то, что ЭС предназначены для решения задач в диалоговом режиме с пользователем, от которого не требуется умения программировать. Эти обстоятельства резко расширяют сферу использования вычислительной техники, которая выступает как инструмент подкрепления памяти специалиста и усиления его способностей к логическому выводу. Специалист, использующий экспертную систему при решении своих задач, может достичь уровня эксперта в данной области знаний, а иногда и превзойти его, что позволяет резко повысить квалификацию рядовых специалистов благодаря аккумуляции знаний экспертов высшей квалификации в памяти компьютера.

Простейшая экспертная система включает базу знаний, машину вывода и подсистему приобретения знаний (рис. 5.12).

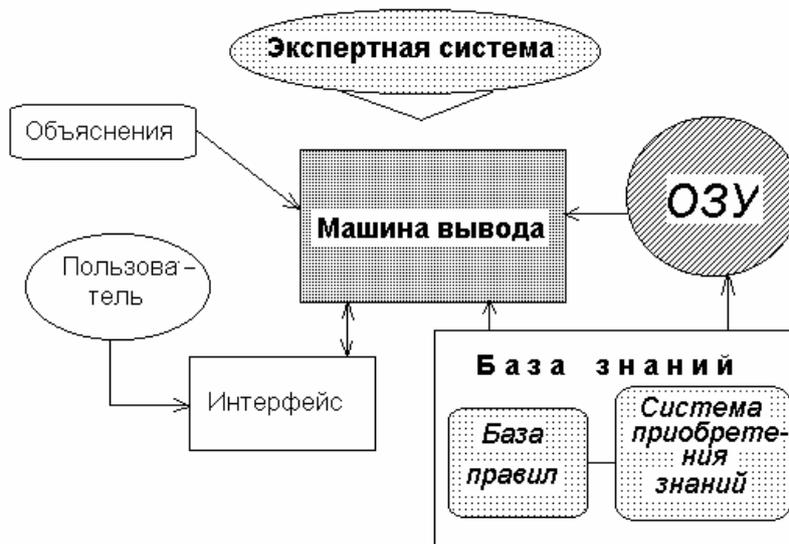


Рис. 5.12. Увеличенная блок-схема экспертной системы продукционного типа

Через подсистему общения с экспертной системой связаны: конечный пользователь (непрограммирующий специалист), эксперт, опыт и знания которого намного выше, чем у рядового конечного пользователя и инженер по знаниям, владеющий языком описания знаний. Знания, которыми должны быть наполнены ЭС, включают знания первого и второго рода.

**Знания первого рода** — это общезначимые факты, явления, признанные в данной области и зафиксированные в книгах, статьях, справочниках и т. п.

**Знания второго рода** — эмпирические правила, построенные по алгоритму: что будет, если... С помощью этих правил обрабатываются факты базы знаний для вывода их значений при достижении цели. В распоряжении пользователя должна быть инструментальная экспертная система — средство конструирования проблемно ориентированных ЭС на определенном «шаблоне». В настоящее время можно выделить следующие классы экспертных систем:

- 1) диагностирующие (техническое состояние здания или сооружения);
- 2) прогнозирующие (оценка будущего на основе модели прошлого и настоящего);
- 3) планирующие (обеспечивают принятие решений по оптимальному распределению ресурсов и календарному планированию);
- 4) системы для проектирования (не только помогают принимать проектные решения, но и позволяют выявлять мотивы их принятия через систему объяснения);
- 5) тестовые системы (для обучения и контроля знаний).

### 5.4.3. Продукционные экспертные системы

Экспертная система состоит из множества не связанных между собой правил вида  $P : A \rightarrow B$  (если истинно  $A$ , то следует  $B$ ) и множества фактов  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$ , таких, что, если записать  $P : A \& B \& C \rightarrow D$ , то это будет означать: «если события  $A$  и  $B$  и  $C$  истинны, то немедленно следует событие  $D$ ».

В качестве иллюстрации приведем пример составления экспертной системы на базе авторской программы SANEX. Пусть требуется разработать ЭС, консультирующую технолога-строителя, только что закончившего вуз. Экспертная система должна содержать базу знаний с такими объектами и фактами, как стройка, фундамент, котлован, опалубка, начать, закончить, монтировать, класть и т. д. Кроме этого БЗ должна обладать знаниями второго рода в виде правил вывода. Составим правило вывода с помощью логических операций и рассуждений для одной из технологических ситуаций на стройке. Например: пора строить опалубку для фундамента, так как вырыт котлован под него и завезены соответствующие материалы, а люди, работавшие ранее на укладке кирпича, освободились. Ниже приведем одно из возможных правил для вывода консультации.

*Правило 1: если*

*котлован вырыт и  
материалы = завезены и  
рабочие = освободились*

*то*

*н = можно приступить к изготовлению опалубки.*

Экспертная система SANEX, которая прилагается к данному учебному пособию, обладает также способностью генерировать новые знания. Последние получаются по алгоритму: если заключение  $D$ , вытекающее из условий  $A$ ,  $B$  и  $C$ , появилось в базе знаний, то это означает, что возник новый факт, расширяющий знания ЭС. Различные факты из множества  $A$  могут быть содержательно связаны друг с другом (котлован вырыт, котлован не вырыт, люди освободились, люди заняты и т. д.).

Задача продукционной экспертной системы — определение цепочки правил, позволяющих получить ответ на интересующий пользователя вопрос. Этот новый факт сохраняется в БЗ и может быть использован в дальнейшей продукции.

При разработке экспертной системы принято делить ее на три основных модуля (см. рис. 5.12):

- 1) базу знаний;
- 2) машину логического вывода (МЛВ);
- 3) интерфейс пользователя (ИП).

Остановимся подробнее и рассмотрим структуру ЭС продукционного типа. Продукционные экспертные системы — это программы, которые

отличаются от обычных тем, что почти не имеют процедурных, программных компонентов и оперируют лишь данными. Причем основные задачи этих операций состоят в том, чтобы приобретать новые факты, а следовательно, и знания, удовлетворять запросы пользователя, достигая целей с помощью логического вывода.

Будем рассматривать машину вывода и интерфейс как один крупный модуль, обычно называемый оболочкой экспертной системы или, для краткости, просто оболочкой. Как правило, она содержится в программе ЭВМ и может быть использована для организации работы ЭС, включая все этапы: ввод данных, диалог, ввод фактов и правил достижения цели.

База знаний располагается отдельно от оболочки в текстовом файле, имя которого система запрашивает в сеансе диалога с пользователем. БЗ состоит из трех блоков: факты, вопросы и правила.

Приведем пример создания БЗ для экспертной системы SANEX, входящей в состав программного обеспечения учебника.

Факты БЗ состоят из отношений типа «объект = значения». В общем случае объекты могут принимать множество значений, такие объекты называются многозначными:

*<человек> = мужчина; женщина; старик; юноша*

*<профессия> = инженер; маляр; плотник; физик*

*<возраст> = 18-20; 21-25; 26-30; 31-40; 41-50; 51-60;*

Вопросы служат для организации диалога и используются программой в процессе работы ЭС в следующем формате: вопрос (объект) = текст.

*Вопрос <человек> = какого пола?*

*Вопрос <профессия> = чем занимается?*

*Вопрос <человек> = какого возраста?*

Правила записываются в следующем формате:

*Правило N: если*

*<объект1> = значение и*

*<объект2> = значение и*

*<объект3> = значение и*

*то*

*цель = значение.*

Составим одно из возможных правил для нашей простой ЭС, которая вполне может быть использована в отделе кадров при приеме на работу в качестве эксперта, ведущего собеседование с клиентом при первой встрече.

*Правило 1: если*

*<человек> = мужчина и*

*<профессия> = инженер и*

*<возраст> = 26-30*

*то*

*цель = Вы прошли во второй тур.*

Приведенная схема экспертной системы не является универсальной. Существуют и другие структуры ЭС промышленного типа, обладающие большими возможностями. Но основной принцип построения экспертных систем здесь отражен в полной мере. В какой-то степени такая ЭС в ряде случаев имеет преимущество перед готовыми интегрированными оболочками, так как ЛПП может корректировать правила вывода и содержание фактического материала для своей конкретной области знаний, пополняя их и корректируя по мере необходимости.

Ниже приведен далеко не полный список промышленных ЭС с краткой аннотацией.

CLIPS — продукционная система, использующая вывод от фактов к цели, написанная на алгоритмическом языке. Механизм логического вывода этой системы включает сопровождение, динамическое добавление правил и настраиваемые стратегии разрешения противоречий. CLIPS, включая динамическую версию, легко встраивается в другие прикладные программы. Она включает объектно-ориентированный язык, который интегрирован с механизмом логического вывода и имеет довольно обширный список приложений.

DYNACLIPS (динамические Утилиты CLIPS) — включает доску объявлений, механизм динамического обмена знаниями и инструментальные средства для CLIPS. Она осуществлена как набор библиотек, который может быть связан с CLIPS. Для связи с другими интеллектуальными средствами используется доска объявлений в Интернете.

FuzzyCLIPS 6.02 — одна из версий экспертной системы CLIPS в виде оболочки ЭС. Программа основана на правилах, используемых для представления и управления нечеткими фактами и правилами. В дополнение к функциональным возможностям CLIPS FuzzyCLIPS может иметь дело с нечеткими (или неточными) знаниями, сложными рассуждениями, которые можно свободно смешивать в правилах и фактах экспертной системы.

WxCLIPS обеспечивает CLIPS с нечетким представлением знаний простым графическим внешним интерфейсом.

BABYLON — среда для разработки экспертных систем, включающая фреймы и модели данных. Пролог-подобный логический формализм и язык для написания диагностических прикладных программ.

MIKE (Микро интерпретатор для инженерии знаний) — полная, свободная и переносимая программная среда, разработанная для целей обучения в Открытом университете Великобритании. Она включает прямые и обратные правила вывода от цели к фактам с определяемыми пользователем стратегиями разрешения противоречий. Правила вывода автоматически снабжаются объяснениями. MIKE, который формирует ядро курса по инженерии знаний Открытого университета, написан на консервативном и переносимом подмножестве языка Пролог.

WindExS — полнофункциональная экспертная система, которая использует вывод от фактов к цели. Ее модульная архитектура позволяет пользователю заменять модули так, как это требуется для расширения возможностей системы. WindExS содержит процессор правил на естественном языке, механизм логического вывода, интерфейс пользователя, администратор сообщений и модули БЗ. Она поддерживает вывод от фактов к цели и графическое представление базы знаний.

RT-EXPERT — экспертная система общего назначения, что позволяет программистам интегрировать правила экспертной системы в прикладные программы на языке C++. В ее состав входит транслятор правил, который компилирует правила в код C, и библиотека, содержащая механизм выполнения правил.

#### 5.4.4. Экспертная система SANEX

Электронный учебник по системному анализу снабжен учебной версией электронной оболочки ЭС SANEX, написанной автором на алгоритмическом языке Pascal в виде Windows-приложения. Шаблоны и концепция ЭС были описаны выше. Здесь приводится описание и инструкция пользователя в сжатом виде.

Приведем демонстрационный пример составления ЭС применительно к практике работы отдела кадров. При разработке ЭС составляется текстовый файл, состоящий из трех блоков:

- 1) база знаний (описание фактов);
- 2) машина логического вывода (правила вывода для достижения цели);
- 3) интерфейс пользователя (список вопросов диалога ЭВМ и пользователя).

Принято рассматривать машину вывода и интерфейс как один крупный модуль, обычно называемый оболочкой экспертной системы или, для краткости, просто оболочкой. В нашем компьютерном курсе она содержится в программе SANEX.EXE (рис. 5.13) и может быть использована при организации работы ЭС, включая все этапы: ввод данных, диалог, ввод фактов и правил, достижение цели.

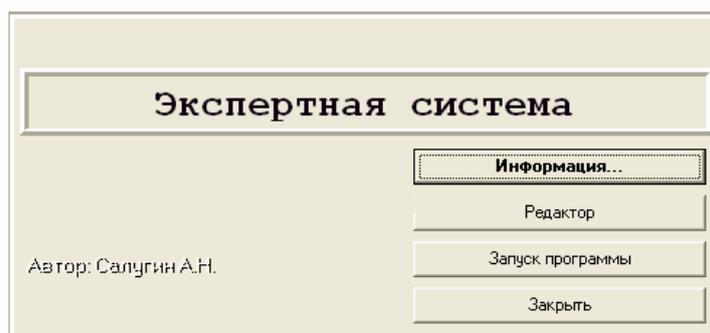


Рис. 5.13. Главная форма диалога ЭС

База знаний располагается отдельно от оболочки в текстовом файле, имя которого оболочка запрашивает в сеансе диалога с пользователем. БЗ состоит из трех блоков: факты, вопросы и правила.

1. Факты БЗ состоят из отношений типа: *разрешзн(объект) = значения*. В общем случае объекты могут принимать множество значений, такие объекты называются многозначными:

*разрешзн (человек) = мужчина; женщина*

*разрешзн (профессия) = \_инженер; моряк; плотник; физик.*

*разрешзн (возраст) = 18-20; 21-25; 26-30; 31-40; 41-50; 51-60;*

2. Вопросы служат для организации диалога и используются программой SANEX в процессе работы. Формат:

*вопрос (объект) = текст.*

Пример:

*вопрос (человек) = Какого пола?*

*вопрос (профессия) = Чем занимаетесь?*

*вопрос (возраст) = Сколько вам лет?*

3. Правила записываются в формате:

*Правило 1: если*

*(человек) = мужчина и*

*(профессия) = \_инженер и (возраст) = 26-30*

*то*

*n = Вы прошли во второй тур.*

Обратите внимание на структуру шаблона, в который записываются правила. Она должна быть соблюдена абсолютно точно вплоть до (.), заканчивающей ввод правила. Значения объектов и цели записываются без пробелов. Вместо них ставят знак подчеркивания (\_). Разделители (=), (и), (;), (если) служат для распознавания системой структуры правил и их содержания, поэтому они должны присутствовать обязательно в определенных местах.

#### 5.4.5. Работа с экспертной системой

**Вывод базы знаний.** Итак, Вы имеете уже готовую, записанную на языке SANEX базу знаний, включающую в себя перечень фактов, вопросов, а также правила достижения цели. В тексте нет ошибок!? Все разделители на месте, а имена объектов, обозначенные в файлах, вопросах и правилах, совпадают абсолютно точно. Если это так, то можно приступать к созданию файла БЗ. Для примера рассмотрим ЭС отдела кадров, частично приведенную выше. Запишем текст БЗ, вызвав редактор ЭС (рис. 5.14).

Определить мощность множества полного числа возможных продукций нетрудно. Для нашего примера оно равно произведению трех множеств:  $2 \times 4 \times 6 = 48$ . Сохранить БЗ на диск можно, войдя в окно диалога и задать имя

файла «Отдел кадров». Программа запишет БЗ на винчестер в каталог «Мои документы». Эти операции необходимы для создания рабочего файла экспертной системы, но это не означает, что ЭС совершенна и будет работать.

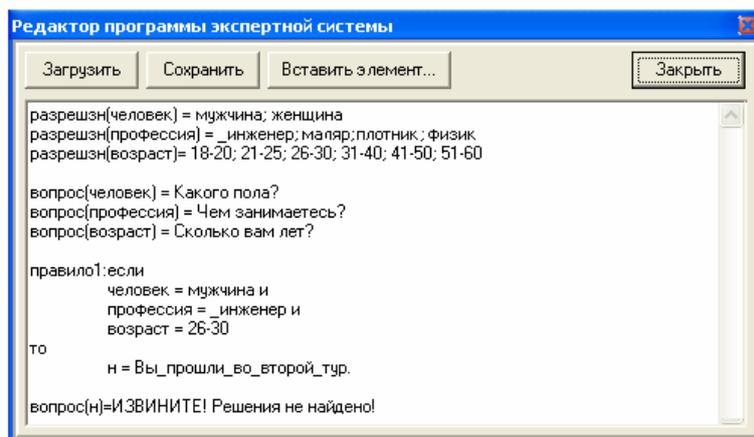


Рис. 5.14. Фрагмент ЭС «Отдел кадров»

**Отладка ввода-вывода.** Оболочка SANEX работает с пользователем в режиме диалога, который сформирован в файле БЗ и состоит из блока вопросов. Если в имени объекта или в вопросе в первой позиции слова стоит буква «и», то дойдя до него следующий текст будет проигнорирован. Поэтому этой букве должен предшествовать символ подчеркивания (\_). Кроме этого, тексты вопросов, вербальное описание целей, значение объектов записываются программистом не в формате экрана, а в формате SANEX — 256 символов в строке, поэтому нельзя использовать текстовый формат экрана и применять перевод строки. Если число символов в строке больше 256, то следует разбить текст на части. При этом порядок вывода блоков на экран обратный порядку следования этих блоков.

Отладку начнем с временного выхода в главное меню, выбрав режим редактора. Программу для БЗ можно написать в любом текстовом редакторе. Если используется Word, то текст БЗ следует сохранить в текстовом формате. После этого запустить программу SANEX и работать в диалоге, отвечая на вопросы, проверяя правильность достижения цели. Если окажется, что выводы неверны или возникнут другие неприятности: не печатается вопрос диалога, запрашивается значение, уже заведомо определенное в базе знаний, и др., то проверьте исходный текст БЗ. При этом следует помнить, что запись БЗ должна быть строга также, как и сама программа, иначе сказать, база знаний — это программа, по которой ЭВМ выводит результат. В случае обнаружения ошибки в работе ЭС следует снова войти в редактирование, исправить ошибки и вызвать файл БЗ, записать (!) его снова и войти в главную форму для дальнейшей работы и т. д. до тех пор пока система не заработает. Ниже (рис. 5.15—5.18) показаны диалоги ЭС для нашего примера.

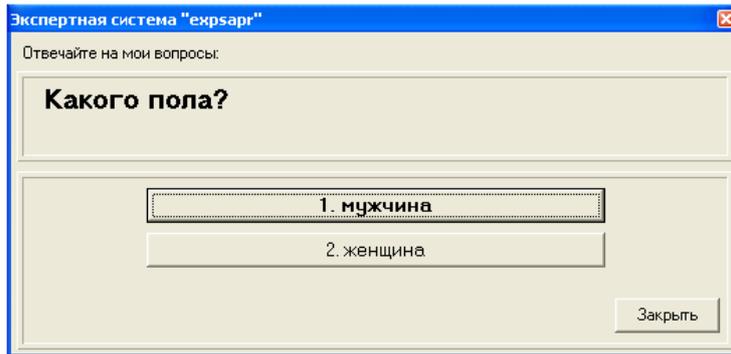


Рис. 5.15. Запрос ЭС на первый вопрос

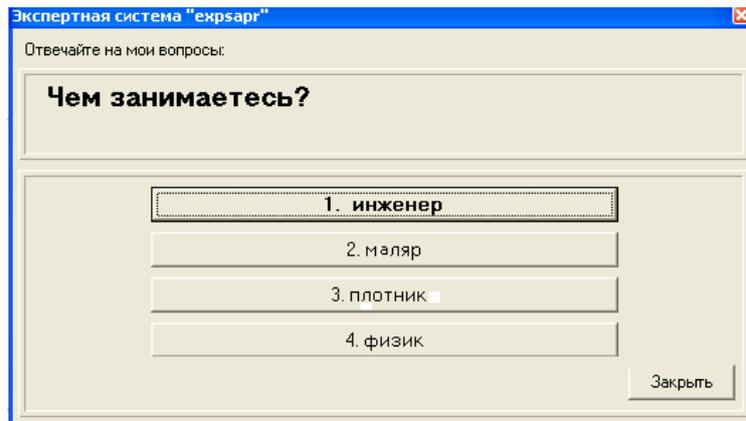


Рис. 5.16. Запрос ЭС на второй вопрос



Рис. 5.17. Запрос ЭС на третий вопрос

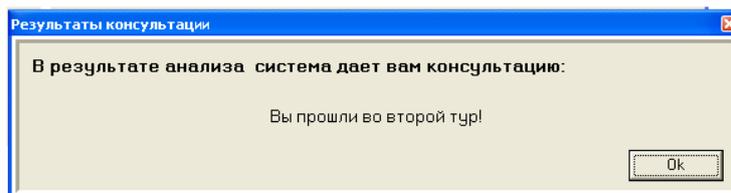


Рис. 5.18. Результат ЭС

## 5.5. Экспертные методы в задаче упорядочения (ранжирования)

### 5.5.1. Общие соображения

Проблема ухода от неопределенности в управлении строительством чаще всего решаются эвристически. Однако, опираясь на методологию системного анализа и концепцию использования математического моделирования, после разработки модели возникают задачи оценок параметров этой модели, их ранжирования и упорядочения. Как правило, эти оценки осуществляются экспертами в составе экспертного совета. Мнение экспертов в задачах ранжирования и расстановки приоритетов обрабатывается по статистике, учитывающей специфику задачи.

Экспертные методы в задаче упорядочения возникают при оценке различных элементов модели по таким сложным и плохо определенным факторам, как качество, важность, полезность, ценность, нуждаемость и т. п. Эти критерии, как и многие другие, не имеют четких определений, ограничивающих их интерпретацию. В этих случаях оценивание производится экспертами, что придает процедуре субъективный характер. Пусть составлена математическая модель строительного объекта в виде ориентированного графа. Упорядочение вершин граф-модели объекта диагностирования состояния строительного объекта необходимо для выявления наиболее эффективных диагностических параметров. Однако человек обычно не в состоянии упорядочить предметы по большому количеству факторов, и возникает задача разработки математической модели упорядочения (имеется в виду упорядочение, а не диагностирование), когда рассматривается множество критериев на граф-модели. За основу упорядочивающей закономерности удобно выбрать многочлен вида

$$P(y) = k_1 f_1(x_1) + k_2 f_2(x_2) + \dots + k_n f_n(x_n), \quad (5.4)$$

где  $y$  — результирующий признак;  $x_i$  — значение фактора относительно  $i$ -й вершины,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $n$  — число учитываемых факторов;  $k_i$  — коэф-

фициент значимости фактора:  $\sum_{i=1}^n k_i$ . Качественные критерии должны быть

квантифицированы, т. е. должны быть количественно оценены на всех уровнях градаций, а сами значения критериев следует нормировать. Значения  $x_i$  заменяются на  $f_i(x_i)$ , которые выражены в долях или баллах для всех  $i$ . Частные зависимости  $f_i(x_i)$  и коэффициенты значимости задаются экспертами. Отметим, что группа экспертов, неспособная упорядочить объекты по множеству факторов одновременно, вполне способна оценить и упорядочить объекты по каждому фактору в отдельности.

### 5.5.2. Метод экспертного оценивания

Этот метод заключается в том, что группе экспертов предлагается оценить количественно приоритетность признака какого-либо строительного объекта в ряду остальных. Каждому эксперту представляется шкала оценок качественного признака, и он выбирает соответствующую оценку (в заданных пределах) по своему усмотрению. Получаются два ряда: представленный ряд признаков и статистический ряд их оценок, данных экспертами. Если оба ряда количественные (частный случай), оценки экспертов могут быть рассмотрены как статистические данные, то могут быть применены методы линейного или нелинейного корреляционного и регрессионного анализа.

Если же один из признаков (критериев) качественный, то связь между обоими рядами может быть оценена коэффициентом конкордации для определения степени согласия нескольких экспертов. При расшифровке качественных оценок последние могут быть упорядочены с помощью коэффициента взаимной сопряженности Пирсона.

Результирующие значения важностей находятся как средние значения оценок экспертов, если результат проверки связи между полученными рядами положителен, или как средние значения оценок, скорректированных голосованием экспертов.

Рассмотрим из всего многообразия экспертных оценок только некоторые. Предположим, что группе экспертов предложено оценить ряд объектов по качественному критерию, например, оценить параметры граф-модели по доступности их к измерению. Изложим метод экспертных оценок в виде итерационного алгоритма.

Рассмотрим пошаговое решение задачи оценивания с участием нескольких экспертов. В разработанной модели, представляющей собой оргграф, требуется определить важности вершин, описывающих состояние строительного объекта.

1. Каждый эксперт осуществляет ранжирование строительных объектов по качественному критерию. Первый по важности объект получает ранг  $r_1$ , следующий — ранг  $r_2$  и т. д. Количество рангов совпадает с количеством оцениваемых объектов. Возможны также совпадающие ранги, например, два объекта признаны одинаковыми по данному критерию и делят ранги  $r_5, r_6$ , получая каждый ранг 5,5.

2. Каждому объекту в ранжированном ряду присваивается количественная оценка  $a_i$  (баллы, очки) из априори заданного интервала оценок, например, первому по важности объекту ставится в соответствие число 9, остальным — меньше 9 по усмотрению эксперта.

3. Каждый из  $m$  экспертов производит попарные сравнения объектов по их важности (всего  $C_n^2$  сравнений) и заполняет квадратную матрицу

размерности  $n \times n$ . В ячейку  $ij$  записывается цифра 2, а в ячейку  $ji$  — цифра 0, если  $i$ -й объект имеет предпочтение перед  $j$ -м объектом по данному критерию. Если оба объекта признаны равноценными, в обеих ячейках заносятся цифры 1. Получим обратно симметричную матрицу.

4. Все  $m$  матриц объединяются, цифры в ячейках суммируются, получая попарные показатели предпочтения сравниваемых объектов  $\gamma_{ij}$ . Результирующие показатели предпочтений объектов получаются суммированием значений  $\gamma_{ij}$  по каждой строке сводной матрицы:

$$b_i = \sum_{l=1}^{n-1} \gamma_{ij}.$$

5. Определяют коэффициент  $V$  согласия экспертов при ранжировании попарными сравнениями:

$$V = \frac{4 \left( \sum \gamma_{ij}^2 - m \sum \gamma_{ij} + C_m^2 C_n^2 \right)}{m(m-1)n(n-1)} = \frac{4Q}{Q_{\max}},$$

где  $C_m^2, C_n^2$  — количество сочетаний из  $m$  или  $n$  по 2;  $\gamma_{ij}$  — числа в ячейках сводной матрицы.

6. Проверить достоверность коэффициента  $V$  по критерию  $\chi_p^2 = \frac{4}{m-2} \left( Q - \frac{1}{2} C_n^2 C_m^2 \frac{m-3}{m-2} \right)$  и сравнить с  $\chi_T^2$  для  $\nu$  степеней свободы  $\nu = C_m^2 \frac{m(m-1)}{(m-2)^2}$  согласно стандартным методикам.

Как правило, доверительная вероятность принимается равной одному из трех значений:  $p_1 = 0,95$ ;  $p_2 = 0,99$ ;  $p_3 = 0,999$  (5, 1 и 0,1 % соответственно). При  $\chi_p^2 > \chi_T^2$  гипотеза о согласованности мнений экспертов принимается, оценки считают определенными с соответствующей доверительной вероятностью. Если  $\chi_p^2 < \chi_T^2$ , то выявляются причины разногласий, уточняются условия эксперимента и опрос экспертов повторяется. При несоответствии некоторых оценок следует их корректировка или эксперимент повторяется.

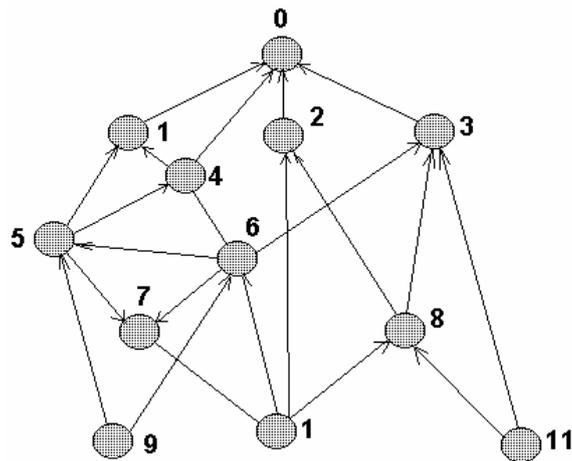
Рассмотренный алгоритм экспертного ранжирования применим для установления численных значений оценок любого  $i$ -го параметра по  $i$ -му критерию с последующим определением веса вершины графа. Приведенные случаи оценивания параметров граф-модели и коэффициентов значимости относятся к простым ситуациям экспертного оценивания. На практике могут встречаться и более сложные ситуации.

Несмотря на определенную трудоемкость экспертного эксперимента, укажем на его положительные стороны. Экспертные методы позволяют

оценить элементы модели строительного объекта в условиях минимума количественных данных и при наличии факторов, описываемых вербально (качественно). Метод позволяет обойтись без исчерпывающей статистики и наличия функциональных зависимостей между параметрами, используя опыт и знания специалистов строительной отрасли. Достоинством экспертных методов является их гибкость. Изменяя значения весовых коэффициентов учитываемых факторов, можно «подстраиваться» под условия конкретной задачи, например, диагностирования в специализированных диагностических центрах, ремонтном производстве, в полевых условиях.

### Вопросы и задания

1. Дайте определения формальных и неформальных процедур. Где и когда используются те и другие? Почему в системном анализе большое внимание уделяется неформальным решениям?
2. Что такое «эвристика» и где используются эвристические приемы?
3. Проведите ранжирование работ, представленных на графе. Измените структуру графа с учетом ранжирования и сделайте выводы.



4. Составьте полный граф вашей деятельности при подготовке к экзамену по системному анализу. Обработайте исходный вариант графа с помощью алгоритма Н. Н. Моисеева и примените его для рационального использования времени, отведенного для подготовки к экзамену.
5. Дайте определения экспертной системы и искусственного интеллекта. Что такое «продукционная система вывода»?
6. Перечислите типы экспертных систем. К какому типу вы отнесете экспертную систему, которая дает рекомендации по выбору рынка для реализации продукции?
7. Где в строительной экономике могут быть использованы экспертные системы по диагностике?
8. Приведите примеры промежуточных целей на разработанной вами модели функционирования малого предприятия в виде графа.
9. Используйте процедуру эвристической экономии и следующие данные, чтобы вычислить экономию, полученную соединением узлов: а) 2 с 3; б) 3 с 4; в) 2 с 5 (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Данные для задачи 9

От узла	До узла, км			
	2	3	4	5
1	10	14	12	16
2	—	5	—	18
3	5	—	6	—

10. Протяженность маршрута  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 1$  равна 23 км. Учитывая информацию о расстоянии и используя минимальную стоимость техники вставки, определите, куда вставить узел 2 (табл. 5.6).

Таблица 5.6

Данные для задачи 10

От узла	До узла	Расстояние
1	3	6
1	5	9
3	5	8
1	2	5
2	3	7
2	6	5
2	5	8

11. В задаче по составлению маршрута транспорта есть двадцать узлов и два транспортных средства. Сколько возможных маршрутов можно построить?

12. Учитывая матрицу расстояния для задачи поездки коммивояжера, показанной в табл. 5.7, и предположив, что узел 1 базовый, построить маршрут, используя алгоритм ближайшего соседа. А также предположив, что узел 4 базовый, построить маршрут, используя алгоритм ближайшего соседа.

Таблица 5.7

Данные для задачи 12

От узла	До узла, км							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	—	32	68	50	60	95	46	46
2		—	51	46	68	96	60	79
3			—	42	72	89	77	94
4				—	40	73	46	77
5					—	46	30	70
6						—	45	97
7							—	66
8								—

13. Используя эвристическую экономию, постройте маршрут по данным табл. 5.9, предположив, что узел 1 базовый.

14. Определить оптимальный маршрут двух транспортных средств в сети из десяти узлов. Узел 1 базовый; узлы от 2 до 5 предназначены транспортному средству 1, а узлы с 6 по 10 — транспортному средству 2. Матрица стоимости для сети дана в табл. 5.8.

Построить два маршрута, используя алгоритм ближайшего соседа, и определить общую стоимость маршрута.

Построить два маршрута с помощью эвристической экономии и определить общую стоимость маршрута.

Сравнить полученные результаты и оценить расхождение. На сколько метод эвристической экономии улучшил расчеты, полученные методом ближайшего соседа?

Таблица 5.8

Данные для задачи 14

От уз- ла	До узла, км									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	—	92	38	54	66	50	50	75	66	36
2		—	51	78	56	46	68	96	40	89
3			—	80	48	42	72	89	56	94
4				—	50	38	40	73	46	77
5					—	29	54	46	30	70
6						—	30	53	45	97
7							—	69	42	66
8								—	96	54
9									—	38
10										—

15. В задаче 14 предположить, что она посвящена перевозкам строительных материалов с базы на строительные объекты. Грузоподъемность ТС 1 составляет 35 т, а ТС 2 — 25 т. Количество груза, которое требуется доставить в каждый объект, приведено в табл. 5.9. Используя маршруты, построенные в задаче 14, снизить общую стоимость обоих маршрутов с помощью минимальной стоимости вставки.

Таблица 5.9

Данные для задачи 15

Узел	Вес груза, т
2	10
3	10
4	5
5	5
6	5
7	5
8	20
9	10
10	5

16. Преобразовать матрицу расстояний в табл. 5.7 в матрицу стоимости, используя следующую информацию. Стоимость маршрута от любого узла  $i$  до любого узла  $j$  равна 500 р. Это фиксированная стоимость включения звена в маршрут. Переменная стоимость использования звена (или дуги) составляет 5,5 р на км для первых 5 км и 4,2 р для остатка дуги. Подсчитав матрицу стоимости, решить задачу, используя эвристическую экономию.

## 5. Эвристические приемы системного анализа

17. Используя заданное в табл. 5.10 время начала и окончания заданий (ожидаемое время доставки материалов на строительные участки), определите количество требуемых транспортных средств и последовательность выполнения задания для каждого из них с помощью параллельного расписания. Время бесплатного проезда равно 30 мин.

Таблица 5.10

*Данные для задачи 17*

Задание	Начало	Окончание
1	8:00	8:30
2	8:15	9:15
3	9:00	9:30
4	9:40	10:20
5	10:10	11:00
6	10:45	11:30
7	12:15	12:40
8	13:30	13:50
9	12:00	14:40
10	14:15	15:30

## 6. МЕТОД АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

*Теоретические основы метода анализа иерархий. — Описание метода анализа иерархий. — Принятие решений с использованием МАИ. — Примеры использования МАИ. — Принятие решений в условиях неопределенности. — Перспективы развития МАИ.*

### 6.1. Теоретические основы метода анализа иерархий

В предыдущих главах на основе концептуальных положений теории систем и математического моделирования была изложена формальная методология системного анализа. При решении задач большой сложности исследователи обнаружили, что существующие в настоящее время положения общей теории систем не ограждают системного аналитика от проблем, которые нельзя решить формальным образом. Выход из этого положения может быть найден путем эвристического подхода к поставленной задаче. Т. Саати [2] пишет: «...системный подход должен заимствовать наши врожденные способности декомпозировать сложные события на составные компоненты, одновременно концептуализируя и идентифицируя отношения меняющейся интенсивности взаимодействия, характеризующий уровень взаимосвязи между элементами системы». Основная идея метода системного анализа состоит в декомпозиции и иерархическом размещении элементов сложной системы, с которой ЛПР имеет дело. Современная теория систем в основном носит описательный характер и не имеет жизнеспособной методологии, способной решать конкретные управленческие решения. Вместе с тем концепция теории систем является основой построения новой методологии, позволяющей описывать системные проблемы в терминах взаимосвязанной иерархии. На этих принципах строится методология системного анализа, предлагающая средства для установления приоритетов и их численной оценки при измерении интенсивности нелинейного взаимодействия между элементами системы. При этом учитываются роль человеческого фактора, субъективизм мнений и коллективные обобщения,

противоречивость ценностей разных слоев общества в социальных и организационных системах. Примером такой методологии является метод анализа иерархий (МАИ), разработанный и успешно применяющийся в последние годы Т. Саати при решении задач, связанных с принятием решений различной природы.

МАИ является процедурой, связанной с неопределенностью выбора вариантов из-за противоречивости критериев, участвующих в достижении цели. Этот метод позволяет лицу, принимающему решение, сделать правильный выбор с использованием формальных и неформальных приемов, и состоит он в декомпозиции проблемы на более простые части, обработке суждений ЛПР по специальному алгоритму.

Системный анализ является методологической основой данного метода. Решение проблемы сводится к установлению приоритетов внутри системы. На первом этапе выявляются наиболее важные элементы проблемы, на втором — наилучший способ ее решения и проверки решения. Использование МАИ весьма разнообразно: грамотное управление строительным маркетингом, анализ рынка недвижимости, выбор вариантов рекламы и оптимального ассортимента производимых строительных деталей и конструкций.

Практическое использование МАИ в управлении строительным маркетингом, например, заменяет утилитарные методы, основанные на чисто эвристических приемах, приемлемых для задач малой размерности. Если же какая-нибудь крупная строительная фирма, концерн или малое предприятие желают предохранить себя от ошибок экспертов, которые часто предлагают безвариантное решение, основываясь на своем личном опыте, что нередко приводит к необратимым негативным процессам, то они будут искать возможность применения более надежного и беспроигрышного приема. Надежность такого приема должна быть основана на повышении объективности выработки решений. Одним из них является метод анализа иерархий.

## **6.2. Описание метода анализа иерархий**

### **6.2.1. Описание метода на уровне пользователя**

Приведем изложение метода на уровне пользователя, т. е. без особого привлечения теоретических формальных положений. Так часто поступают, когда хотят, чтобы пользователь (в данном случае ЛПР) более осязательно и наглядно почувствовал привлекательность предлагаемого подхода и смог оценить его превосходство над другими методами прагматически.

Решение любой проблемы представляется здесь как процесс поэтапного установления приоритетов. При этом вначале выявляются наиболее важные элементы проблемы, а затем их функциональная связь между эле-

ментами, лежащими внутри уровня и на нижних уровнях иерархии. Применение структурной модели позволяет оценивать результаты принятия решений на основе матриц сравнений и их последствия. Переосмысление исходной ситуации в случае неудачи и повторное решение — схема поведения истинного исследователя или думающего руководителя. Процесс поиска оптимального решения в МАИ происходит по иерархическому принципу — результаты, полученные на основном уровне, используются в качестве входных для другого. Этот подход является основой метода анализа иерархий. Он делает поставленную проблему более прозрачной и логически систематизирует процесс решения многоступенчатой задачи.

Итак, пусть перед вами стоит проблема выбора, требующая незамедлительного решения. Будем решать эту задачу в общем виде безотносительно к характеру проблемы. На первом этапе четко формулируется цель, которая, собственно, и определяет проблему. Затем произведем ее декомпозицию — разбиение на более мелкие задачи, решаемые без особых затруднений. Например, вам необходимо выбрать, какой вид строительных деталей надо производить, чтобы получить максимальный выигрыш и иметь перспективу дальнейшего развития. Проблема может быть сформулирована так: «Какие строительные детали принесут строительной малой фирме максимальный доход и обеспечат перспективу на будущее?» (предположим, что уже существует некоторый ориентировочный список возможных деталей — альтернатив для производства).

Определим критерии, по которым можно было бы найти наилучший вариант в нашей задаче:

- 1) спрос на рынке сегодня;
- 2) наличие сырья для изготовления изделия;
- 3) перспектива сбыта;
- 4) конкурентоспособность;
- 5) наличие трудовых ресурсов для производства.

Ограничимся данным перечнем с целью сокращения изложения. Принципиально этим мы не уменьшаем общности подхода. На этом примере будут продемонстрированы основные принципы метода и показана технология его реализации.

Третий этап — генерирование альтернатив. Из предлагаемого списка следует отбросить заведомо проигрышные варианты строительных деталей. Множество альтернатив для выбора должно быть большим, так как наилучший вариант может находиться иногда за пределами неправильно выбранного множества исследуемых вариантов. Если список невелик, то его можно включить в рассмотрение полностью, без изменения. Пусть в списке пять видов строительной продукции ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ) для строительства коттеджей:  $A$  — фасадная панель,  $B$  — каркасные элементы кровли,  $C$  — фундаментные блоки,  $D$  — каркас для стен,  $E$  — стеновые блоки.

Таким образом, после такой декомпозиции проблема выбора разделилась на три иерархических уровня (рис. 6.1). В методе анализа иерархий декомпозиция означает «структурирование проблемы». Представление задачи в виде графа, отражающего поэтапное выполнение действий над иерархически расположенными элементами, предусматривает построение такой иерархии. Как правило, иерархия отображается в виде дерева целей, в корне которого с точки зрения управления располагается главная цель проблемы. Через промежуточные уровни иерархии в виде критериев (узлов), от которых зависят следующие уровни, ЛПР достигает самого низкого уровня, на котором обычно собраны варианты для выбора. Из всего многообразия иерархических структур выберем самую простую — доминантную, которая изображается в виде перевернутого дерева.

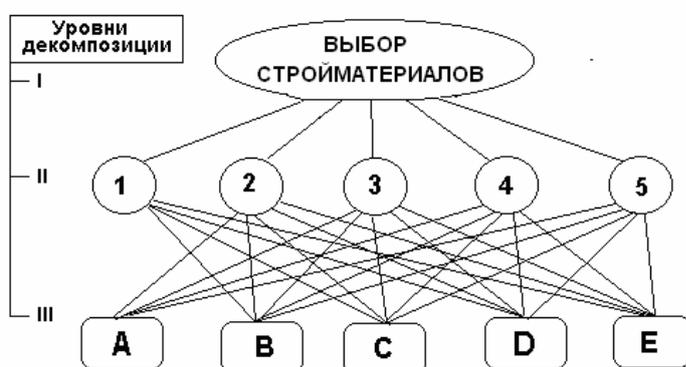


Рис. 6.1. Иерархическое разбиение проблемы на уровни поэтапного принятия решений. Практически все задачи решаются по приведенной схеме. Прохождение от первого уровня до цели (третий уровень) требует специальных приемов системного анализа

Иерархия считается полной, если каждый элемент заданного уровня связан со всеми элементами нижестоящего уровня. В противном случае иерархия будет неполной. В МАИ рассматривается схема связей с полной иерархией. Если иерархия неполная, ее дополняют с помощью привлечения экспертов или поиска нужной информации из других источников.

Распространение термина «структурный системный анализ» в управлении и системном анализе и CASE-технологии есть продолжение идеи Т. Саати о декомпозиции и иерархической структуризации сложных систем. Термин CASE (Computer Aided Software Engineering) используется в весьма широком смысле. Первоначальное значение термина CASE, ограниченное вопросами автоматизации разработки только лишь программного обеспечения, в настоящее время приобрело новый смысл, охватывающий процесс разработки сложных функциональных систем в целом. Теперь под термином «CASE-средства» понимаются программные средства, поддерживающие процессы создания и сопровождения информационных систем в строительстве, включая анализ и формулировку требований, проектирование приложений и баз данных, тестирование, документирование, обеспечение качества, конфигурационное управление и управление проектом. Пакеты программ американской фирмы Computer Associates (CA),

посвященные инструментальным методам моделирования бизнеса, ориентированы на реализацию идей системного анализа при управлении и принятии решений. Электронный адрес представительства СА компании «Интерфейс Ltd» в России: [www.interfase.ru](http://www.interfase.ru).

Семейство распространенных IDEF-технологий этой фирмы, включающее на сегодняшний день IDEF0, IDEF3, DFD и др., позволяет реализовать идеи метода анализа иерархий. С их помощью производится функциональное моделирование бизнес-процессов, документирование технологических строительных процессов с анализом потоков данных.

Программная поддержка функционального моделирования осуществляется пакетом BPWin, обеспечивающим интегрированность системного подхода к описанию и оценке строительного бизнеса в форме, позволяющей использовать функциональную модель в строительной практике менеджерами всех уровней.

Мы будем использовать возможности этих пакетов в МАИ для целей декомпозиции проблемы и иерархического упорядочения.

На рис. 6.2 представлена IDEF0-диаграмма проблемы, связанной с выбором для производства оптимального строительного изделия, представляющего собой элемент строительной конструкции. Это укрупненная блок-схема, геометрически описывающая постановку задачи.

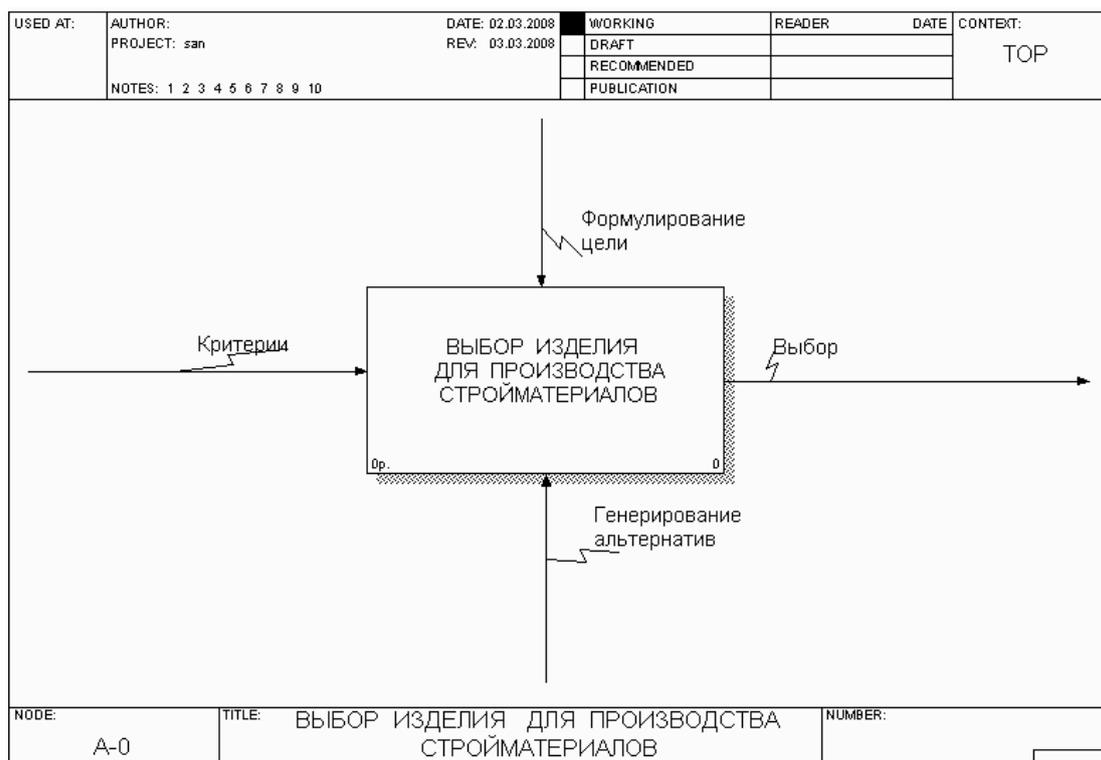


Рис. 6.2. IDEF0-диаграмма верхнего уровня декомпозиции многокритериальной задачи выбора строительного материала

На рис. 6.3 демонстрируется результат декомпозиции в виде трех уровней иерархии.



Рис. 6.3. Диаграмма в виде дерева узлов

### 6.2.2. Парные сравнения

После иерархического представления проблемы посредством структуризации в виде графа устанавливаются приоритеты критериев с последующей оценкой альтернатив по всем критериям. Выявив наиболее предпочтительную (в нашем случае — строительную деталь для изготовления), задача считается решенной как многокритериальная.

В методе анализа иерархий объекты сравниваются попарно в контексте их влияния на общую характеристику внутри отдельного уровня декомпозиции.

Сравнивая объекты проблемы друг с другом, получим квадратную матрицу вида

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (6.1)$$

Когда сравниваются критерии для определения их относительной важности, то каждый элемент строки этой матрицы — отношение одного какого-то критерия к другому в смысле их относительных приоритетов. Строки принадлежат своим критериям. В первой строке, например, сравнивается

первый критерий со всеми остальными. Если мнения эксперта определены количественно величинами  $a_{ij}$ , то нетрудно видеть, что первая строка матрицы характеризует 1-й критерий, 2-я — второй и т. д., по формуле

$$a_{ij} = w_i/w_j, \quad (6.2)$$

где  $w_i, w_j$  — относительные важности критериев.

Матрица сравнений примет вид

$$\begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_1}{w_3} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \frac{w_2}{w_3} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \frac{w_3}{w_3} & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \frac{w_n}{w_3} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix}. \quad (6.3)$$

Данная матрица обладает свойствами обратной симметричности. Действительно, диагональные элементы равны единице  $a_{ii} = \frac{w_i}{w_i} = 1$ , а остальные

элементы связаны между собой отношениями  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ , так как  $\frac{w_i}{w_j} = \frac{1}{w_j/w_i}$ .

Таким образом, имеем

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_1}{w_3} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{1}{\frac{w_1}{w_2}} & 1 & \frac{w_2}{w_3} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{1}{\frac{w_1}{w_3}} & \frac{1}{\frac{w_2}{w_3}} & 1 & \dots & \frac{w_3}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{\frac{w_1}{w_n}} & \frac{1}{\frac{w_2}{w_n}} & \frac{1}{\frac{w_3}{w_n}} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (6.4)$$

После построения матрицы сравнений для критериев составляют аналогичные матрицы для альтернатив. Матриц сравнения будет столько, сколько учтено критериев. Альтернативы, среди которых отыскивается наилучший вариант, оцениваются по каждому критерию.

В нашем примере на втором уровне иерархии составляется квадратная матрица размерности  $5 \times 5$ , описывающая относительные важности критериев,

на третьем уровне — пять матриц размерности  $5 \times 5$  для сравнения вариантов. Эти матрицы служат для оценки приоритетов вариантов изделий по каждому критерию.

Рассмотрим некоторые детали реализации метода анализа иерархий Т. Саати с решением приведенного уже примера о выборе стройдетали в строительном производстве как многокритериальной задачи.

### 6.2.3. Шкала относительной важности

При проведении парных сравнений требуется делать оценки, что хуже, что лучше и насколько. Как это сделать? Поскольку часто приходится сравнивать качественные характеристики, то для формализации мнений качеству присваивают количественную оценку. При этом сравнение объектов друг с другом также описывается числовым выражением. Рекомендуемая шкала относительной важности для оценки качества не менее относительна, чем ее предназначение, и она могла быть другой (табл. 6.1). Она девятибалльная и успешно используется многими авторами.

Таблица 6.1

#### *Шкала относительной важности*

Интенсивность важности	Определение
1	Равная важность
3	Умеренное превосходство
5	Существенное превосходство
7	Значительное превосходство
9	Очень сильное превосходство
2, 4, 6, 8	Промежуточное значение
Обратные величины	Если при сравнении одного критерия с другим получим, например, 3, то соотношение второго и первого даст обратную величину (1/3).

Табл. 6.1 является своего рода шпаргалкой для эксперта при заполнении матрицы сравнений. Отметим здесь, что процедура заполнения матриц является субъективным процессом и относится к той неформальной части МАИ, о которой мы говорили в описании методологии системного анализа.

### 6.2.4. Локальный вектор приоритетов

Составление матрицы сравнений является неформальной процедурой, связанной с рассуждениями ЛПР или профессионального эксперта. В любом случае эти рассуждения носят субъективный характер. После составления матрицы сравнения с использованием шкалы относительной важности для критериев можно осуществить их ранжирование. Процедура, приводящая к конечному результату, сводится к поиску собственных векторов матриц по определенному алгоритму. Одним из них является вычисление локального вектора приоритетов (ЛВП).

Как указывалось выше, матрица парных сравнений является исходной количественной информацией суждений, полученных неформально при ее заполнении экспертом. На следующем этапе, используя данные матриц, определяют значение приоритетов каждого критерия (варианта) среди остальных. ЛВП вычисляется из строк матрицы по следующему алгоритму.

Шаг 1. Вычислить произведение всех элементов строк матрицы и извлечь из результата корень  $n$ -й степени ( $n$  — размерность матрицы). Это означает вычисление среднего геометрического для каждой строки:

$$\begin{aligned} \sqrt[n]{a_{11}a_{12}a_{13}\dots a_{1n}} &= x_1, \\ \sqrt[n]{a_{21}a_{22}a_{23}\dots a_{2n}} &= x_2, \\ &\dots\dots\dots, \\ \sqrt[n]{a_{n1}a_{n2}a_{n3}\dots a_{nn}} &= x_n. \end{aligned} \tag{6.5}$$

Шаг 2. Просуммировать все  $x_i$ :  $S = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i + \dots + x_n$ .

Шаг 3. Вычислить нормированный вектор приоритетов с компонентами  $X_1 = x_1/S$ ,  $X_2 = x_2/S$ , ...,  $X_n = x_n/S$ . Полученные значения  $X_i$  являются количественными характеристиками элементов иерархии внутри уровня и называются компонентами локального вектора приоритетов. Они определяют относительные веса элементов структуры системы и являются количественной основой описания проблемы при движении к цели. Локальность заключается в том, что вектор отражает ситуацию на определенном уровне иерархии.

### 6.2.5. Индекс согласованности

Весьма полезным «побочным продуктом» теории сравнений является индекс согласованности, информирующий исследователя о степени нарушения численной согласованности его суждений. Для выполнения условий согласованности в матрицах парных сравнений используются обратные величины  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ . При точных количественных описаниях элементов матрица бинарных отношений, как правило, согласована и условие  $a_{ij} = 1/a_{ji}$  выполняется. Если же ЛПР заполняет матрицу, не имея численных характеристик, ориентируется только на свои суждения типа «во сколько раз этот элемент весомее другого элемента», то, несомненно, возникают ошибки. Степень согласованности матрицы отношений определяется индексом согласованности (ИС).

Индекс согласованности может быть получен приближенно по следующему алгоритму. Сначала суммируют каждый столбец матрицы  $K_j = \sum a_{ij}$ , затем сумму первого столбца умножают на величину первой компоненты вектора приоритетов  $K_1X_1$ , сумму второго столбца — на вторую компоненту  $K_2X_2$  и т. д. Затем все эти произведения суммируются:

$K_S = \sum K_i X_i$ . Таким образом получают характеристику матрицы суждений  $L_{\max}$ . Для полностью согласованной матрицы с учетом обратной симметричности задачи получим  $L_{\max} = n$ . Для индекса согласованности используют формулу

$$\text{ИС} = (L_{\max} - n)/(n - 1), \quad (6.6)$$

где  $n$  — число сравниваемых элементов.

Для обратно симметричной матрицы всегда  $L_{\max} \geq n$ . Сравним эту величину с той, которая получилась бы при случайном выборе количественных суждений, разбросанных в диапазоне 1/9...9 с обратно симметричной матрицей. Приводятся средние случайные согласованности (СС) для случайных матриц разного порядка.

Размер матрицы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
СС	0	0	1,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы одного и того же порядка, получим отношение согласованности (ОС). Величина ОС должна быть порядка 10 % ИС или меньше. Качество рассуждений, их логическая законченность оценивается по величине ИС,  $L_{\max}$  или ОС. Если нет противоречивых высказываний, то  $L_{\max} \approx n$ ,  $\text{ИС} \leq 0,3$ ,  $\text{ОС} \approx 10\% \text{ ИС}$ .

Таким образом, вместе с матрицей парных сравнений мы имеем меру оценки отклонения от согласованности. Когда такие отклонения превышают установленные пределы, следует перепроверить матрицу сравнений. Системный аналитик в работе с коллективом экспертов ориентирует их на использование суждений, основанных на профессионализме. При этом генерируется вербальная (описательная) информация. Приводятся примеры проведения парных сравнений, как выявляются приоритеты, несогласованность и возможный пересмотр.

Как и в мозговом штурме объекты группируются по важности в отдельные кластеры. Затем эти кластеры соотносятся с другими кластерами различных подцелей. Для достижения цели может оказаться полезным сначала провести различие между несравнимыми вещами, а затем — между сравнимыми. В процессе моделирования достижения цели необходимо выделить элементарные примитивы, в терминах которых будет описываться проблема.

Рассмотрим простой пример. Требуется составить матрицу сравнений весов трех предметов: стол, стул и портфель. Известно, что стол в шесть раз тяжелее портфеля, который в два раза легче стула. Из условия видно, что данных для полной матрицы сравнений не хватает. Однако эти данные можно пополнить логическими рассуждениями или просто интуитивно, эвристически. Составим матрицу сравнений, заполнив шаблон вида

	Стол	Стул	Портфель
Стол	1	$a_{12}$	$a_{13}$
Стул		1	$a_{23}$
Портфель			1

получим

	Стол	Стул	Портфель
Стол	1	?	6/1
Стул		1	3/1
Портфель			1

В последней матрице элементы получены из условия задачи. Численные значения оценок относительных весов предметов в данном случае совпадают с формальным смыслом задачи. Этот пример помогает понять смысл согласованных рассуждений при составлении матрицы сравнений. Вопросительный знак означает, что на данном этапе нам неизвестно. Если бы сравнивались качественные параметры этих предметов: цвет, спрос на рынке или качество изготовления, то таблица составлялась бы нами эвристически, а оценки важностей определялись на основе субъективных суждений. В нашем примере — это количественный параметр, и отношения между весами предметов можно определить формально абсолютно точно, а индекс согласованности будет равен нулю. Исходя из данных задачи, видно, что стул должен быть для полного согласования в два раза легче стола и окончательно получим

	Стол	Стул	Портфель
Стол	1	2/1	6/1
Стул		1	3/1
Портфель			1

Электронное пособие содержит программу, производящую все необходимые вычисления для многокритериального выбора. Пакет программ, объединенных одной панелью, позволяет производить формальные процедуры системного анализа, не выходя из среды пользователя. На главной панели пособия представлены основные разделы системного анализа (рис. 6.4), требующие математического моделирования и расчетов. Для решения приведенного демонстрационного примера выберем на панели «Метод анализа иерархий» и заполним матрицу суждений.

После выполнения процедуры вычисления ЛВП получим результаты в окне справа. Из рис. 6.5 видно, что индекс согласованности действительно равен нулю, а  $L_{\max} = 3$  ( $n = 3$ ). Вектор приоритетов распределил предметы, приписав им, соответственно, веса 0,6, 0,3 и 0,1, что и следовало ожидать.

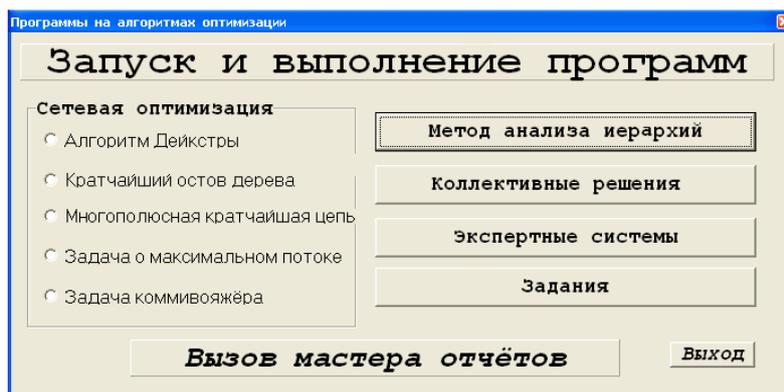


Рис. 6.4. Главная панель программ сопровождения



Рис. 6.5. Использование программы МАИ для расчетов сравнения весов предметов

Люди в жизненной практике редко сравнивают веса объектов, поднимая их рукой (у них есть весы). Поэтому здесь следует ожидать более широкого разброса результатов, чем, например, в эксперименте при определении относительной освещенности предметов в коридоре и зале заседаний университета в зависимости от источников света различной мощности. Человеческому глазу чаще приходится производить такого рода сравнения произвольно без всяких приборов. Отметим, что метод анализа иерархий плодотворно используется для оценки рецепторной реакции человека на различные внешние воздействия.

## 6.3. Принятие решений с использованием МАИ

### 6.3.1. Вычисление вектора приоритетов

Решение многокритериальных проблем, которым посвящается метод анализа иерархий Т. Саати, является хорошей демонстрацией возможностей данного метода при решении конкретных задач строительного бизнеса. В практике строителя часто встречаются случаи выбора наилучшего варианта, когда требуется удовлетворить интересы многих сторон, оптимизируя одну единственную целевую функцию. Такие задачи встречаются у конструкторов при выборе материалов, эксплуатации зданий — выбор системы учета расхода энергетических ресурсов, проектировании инфраструктуры в градостроительстве и др.

Продолжим решение задачи о выборе стройдетали для производства малой строительной фирмой. Цель фирмы, критерии и возможные варианты были определены ранее и теперь можно перейти к реализации парных сравнений и вычислению векторов локальных приоритетов. Для определения ЛВП нам потребуется матрица парных сравнений (6.4), которую ЛПР составляет исходя из собственных суждений. Составим такую матрицу для нашего примера. Пусть мнение о выбранных критериях на языке парных сравнений будет таким, как это отражено в матрице сравнений для критериев, которая выглядит так:

	Спрос	Сырье	Сбыт	Конкурент	Специалисты
Спрос	1	2/1	1/1	5/1	2/1
Сырье		1	1/2	5/2	1/1
Сбыт			1	5/1	1/1
Конкурент				1	2/5
Специалисты					1

После вычислений получим, что индекс согласованности равен 0,016, а локальный вектор приоритетов равен 0,318; 0,159; 0,277; 0,064; 0,183 (рис. 6.6). Откуда можно сделать вывод о том, что спрос имеет более приоритетное значение, чем остальные критерии.

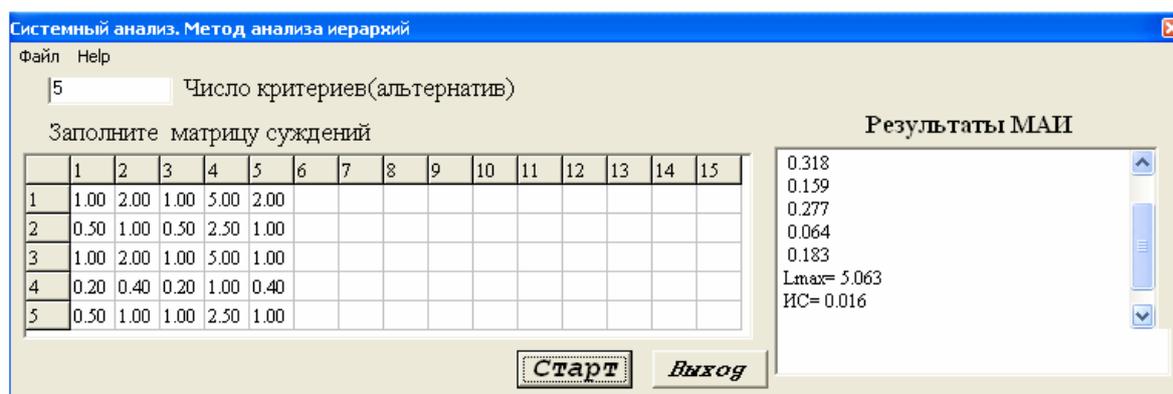


Рис. 6.6. Расчет вектора локальных приоритетов

В матрице сравнений  $a_{12} = 2$  означает, что для нас важнее спрос на рынке, чем наличие сырья для изготовления, и нам не страшна конкуренция ( $a_{14} = 5$ ), а перспективе сбыта мы уделяем такое же внимание ( $a_{13} = 1$ ). Каждый элемент матрицы — это мнение ЛПР, поэтому в правильности бинарных отношений, отражающих суждения, должна быть уверенность. Если же эксперт не уверен в этом, то используется компьютер, который поможет справиться и с этой задачей. Действительно, довольно легко допустить ошибки в суждениях при составлении матрицы. Такие ошибки называют плохим суждением. При большом количестве сравниваемых

объектов такие ошибки неизбежны. Информация о качестве суждения содержится в индексе согласованности, который не должен превышать 0,3. Таким образом, от парных оценок, произведенных пользователем, компьютер формально привел нас к общим оценкам весов критериев, которые будут необходимы при дальнейшей реализации формального алгоритма достижения цели в МАИ.

### 6.3.2. Вычисление приоритета альтернатив для каждого критерия

Приоритеты альтернатив (вариантов) вычисляются аналогично вычислению приоритетов для критериев. Необходимо помнить при этом, что альтернативы сравниваются для всех критериев поочередно. Таким образом, для каждого критерия составляют матрицу сравнений альтернатив. Напомним список строительных изделий: *A* — фасадная панель, *B* — каркасные элементы кровли, *C* — фундаментные блоки, *D* — каркас для стен, *E* — стеновые блоки.

#### 1. Спрос на рынке.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>A</i>	1	1/2	5/3	1/3	1/5
<i>B</i>		1	4/2	1/2	1/4
<i>C</i>			1	3/4	3/2
<i>D</i>				1	2/1
<i>E</i>					1

В первой строке матрицы сравнивается фасадная панель с каркасными элементами кровли, фундаментными блоками, каркасом для стен и стеновыми блоками по критерию «Спрос на рынке». Рассуждения были такими: сравнение фасадной панели с фундаментными блоками дает 5/3, т. е. фасадная панель *A* и фундаментные блоки *C* имеют различный, в пользу фасадной панели, спрос. Каркасные элементы кровли *B* при сравнении с фундаментными блоками *C* имеют некоторое превосходство над ним — элемент матрицы сравнения равен  $a_{23} = 4/2$ , но проигрывают стеновым блокам  $a_{25} = 1/4$ . Результат работы программы показан на рис. 6.7. Вектор приоритетов с компонентой, равной 0,321, отдает предпочтение каркасу для стен *D*. Матрицу можно считать согласованной, так как  $ИС = 0,195$  при  $L_{\max} = 5,779$ .

Аналогичные матрицы сравнений альтернатив составляются для других критериев. Таким образом, получим пять матриц, определяющих приоритеты альтернатив по каждому критерию. Ниже приводятся сами матрицы и результаты их обработки, представленные на рис. 6.8—6.11.

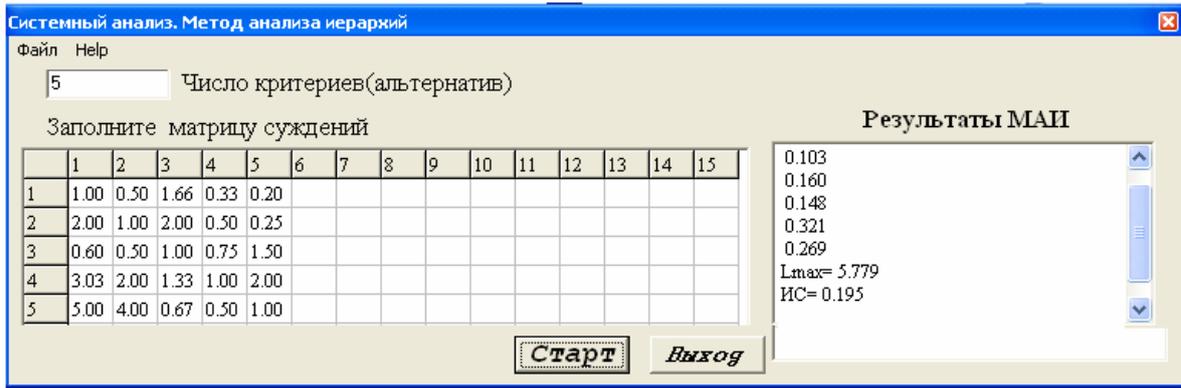


Рис. 6.7. Расчет вектора локальных приоритетов альтернатив для критерия «Спрос на рынке»

2. Наличие сырья для изготовления стройдетали.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>A</i>	1	1/7	2/7	1/5	1/9
<i>B</i>		1	1/3	2/1	1/3
<i>C</i>			1	3/1	3/5
<i>D</i>				1	1/5
<i>E</i>					1

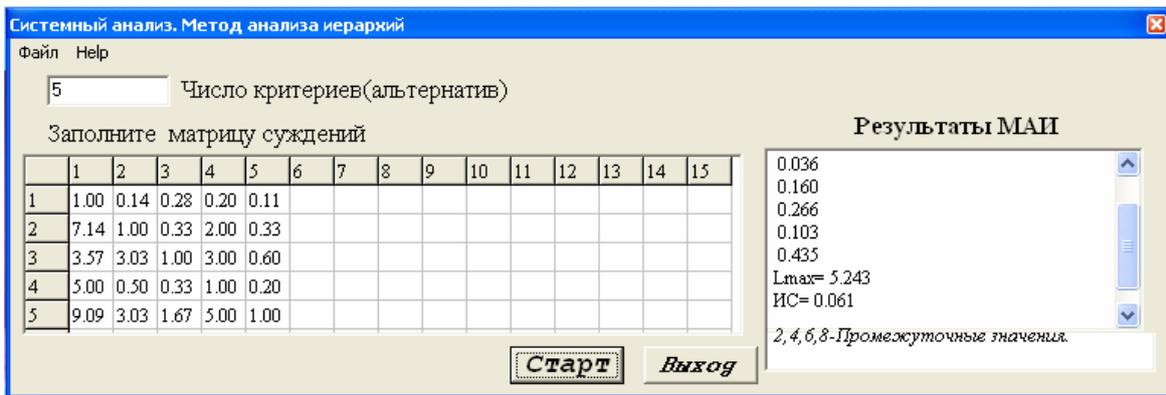


Рис. 6.8. Расчет вектора локальных приоритетов альтернатив для критерия «Наличие сырья для изготовления стройдетали»

3. Перспектива сбыта.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
<i>A</i>	1	5/2	3/1	3/2	3/1
<i>B</i>		1	5/1	2/1	3/1
<i>C</i>			1	3/4	3/1
<i>D</i>				1	2/1
<i>E</i>					1

## 6. Метод анализа иерархий

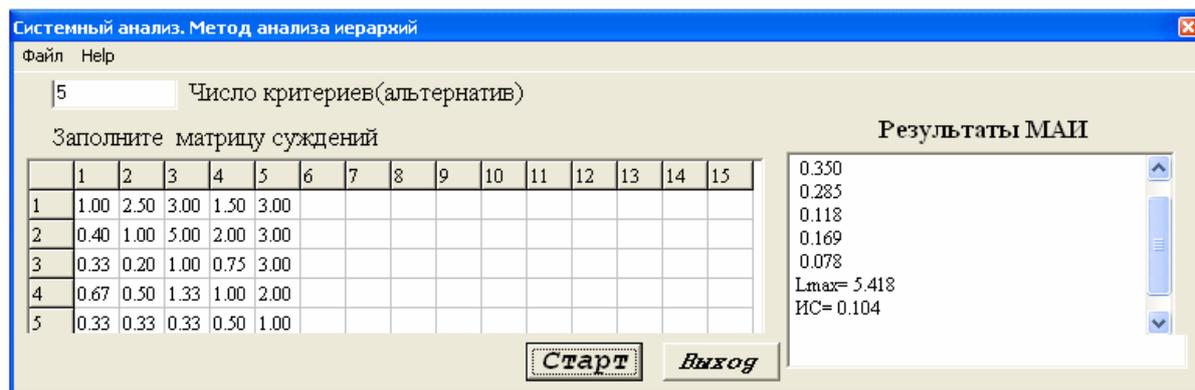


Рис. 6.9. Расчет вектора локальных приоритетов альтернатив для критерия «Перспектива сбыта»

### 4. Конкурентоспособность.

	A	B	C	D	E
A	1	9/2	7/2	7/2	9/2
B		1	3/1	5/2	7/1
C			1	3/1	5/1
D				1	4/1
E					1

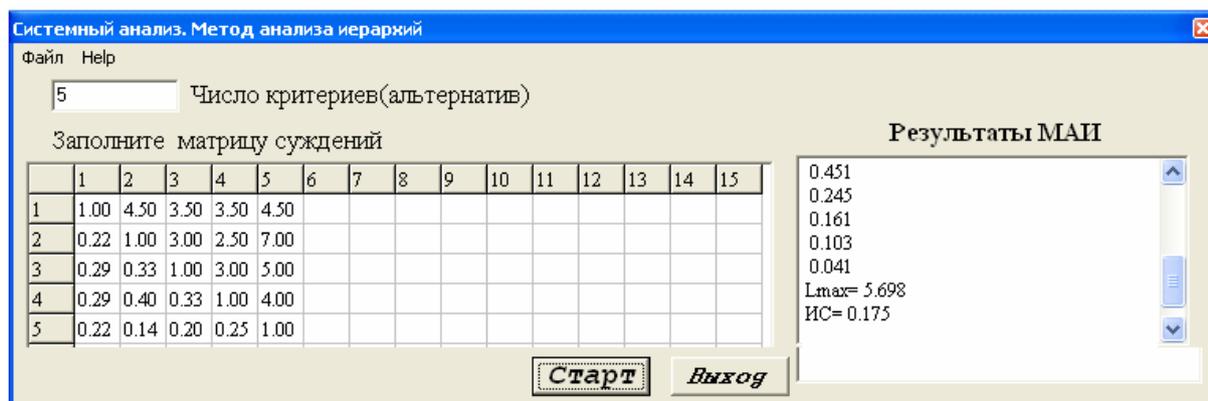


Рис. 6.10. Расчет вектора локальных приоритетов альтернатив для критерия «Конкурентоспособность»

### 5. Наличие трудовых ресурсов для производства.

	A	B	C	D	E
A	1	1/5	1/4	1/3	1/9
B		1	1/3	1/2	1/5
C			1	2/1	1/3
D				1	2/5
E					1

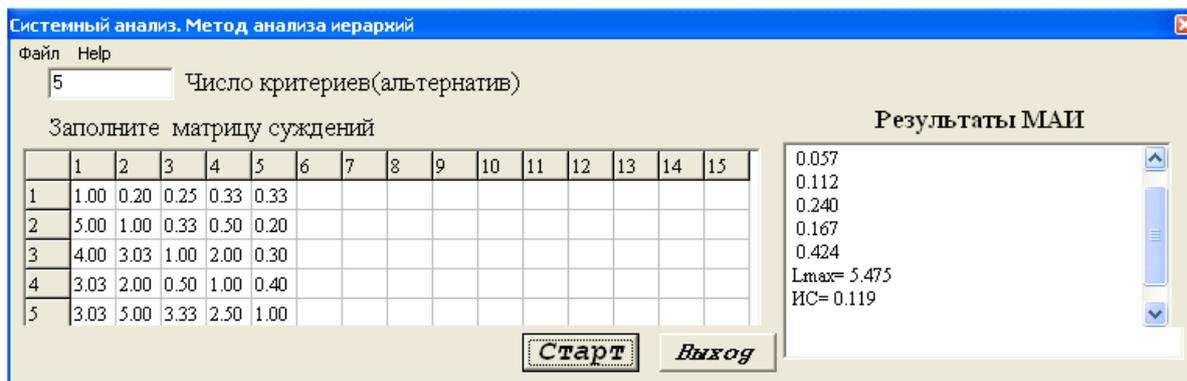


Рис. 6.11. Расчет вектора локальных приоритетов альтернатив для критерия «Наличие трудовых ресурсов для производства»

Локальные векторы приоритетов показывают, что важности вариантов перераспределяются при переходе от критерия к критерию. Действительно,

$$X^1 = (0,103; 0,160; 0,148; 0,321; 0,269);$$

$$X^2 = (0,036; 0,160; 0,266; 0,103; 0,435);$$

$$X^3 = (0,350; 0,285; 0,118; 0,169; 0,078);$$

$$X^4 = (0,451; 0,245; 0,161; 0,103; 0,041);$$

$$X^5 = (0,057; 0,112; 0,240; 0,167; 0,424).$$

Это вполне обычная ситуация при многовариантном выборе, когда каждый вариант занимает свою нишу в контексте поставленной задачи. Учет нескольких критериев одновременно в нашей задаче является определяющим при достижении цели в этой задаче. Здесь решается проблема неопределенности, часто возникающей в сложных многокритериальных проблемах. Итак, проделав значительную работу, связанную с составлением матриц и вычислением локальных векторов приоритетов, мы не пришли к окончательному решению.

«Примирение» противоречий, проявляющихся в различных оценках в зависимости от критерия, осуществимо с помощью объединения полученных результатов в глобальном векторе приоритетов, вычисления которого мы приведем ниже.

### 6.3.3. Вычисление глобального вектора приоритетов

Одновременный учет всех критериев при выборе вариантов осуществляется с помощью вычисления глобального вектора приоритетов. Процедура вычисления сводится к следующему:

1) каждый вектор приоритетов для вариантов умножается на соответствующую компоненту вектора для критериев;

2) составляется сумма из полученных произведений, которая определяет соответствующую компоненту глобального вектора:

$$\begin{pmatrix} x_1^1 \\ x_2^1 \\ \dots \\ \dots \\ x_n^1 \end{pmatrix} X_1 + \begin{pmatrix} x_1^2 \\ x_2^2 \\ \dots \\ \dots \\ x_n^2 \end{pmatrix} X_2 + \begin{pmatrix} x_1^3 \\ x_2^3 \\ \dots \\ \dots \\ x_n^3 \end{pmatrix} X_3 + \dots + \begin{pmatrix} x_1^n \\ x_2^n \\ \dots \\ \dots \\ x_n^n \end{pmatrix} X_n = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix}. \quad (6.7)$$

Значения  $Y_i$  — веса значимости отдельных альтернатив с учетом всех критериев — и определяют наиболее подходящий вариант для нашего выбора:

$$0,318 \begin{pmatrix} 0,103 \\ 0,160 \\ 0,148 \\ 0,321 \\ 0,269 \end{pmatrix} + 0,129 \begin{pmatrix} 0,036 \\ 0,160 \\ 0,266 \\ 0,103 \\ 0,435 \end{pmatrix} + 0,277 \begin{pmatrix} 0,350 \\ 0,285 \\ 0,118 \\ 0,169 \\ 0,078 \end{pmatrix} + 0,064 \begin{pmatrix} 0,451 \\ 0,245 \\ 0,161 \\ 0,103 \\ 0,041 \end{pmatrix} + 0,183 \begin{pmatrix} 0,057 \\ 0,112 \\ 0,240 \\ 0,167 \\ 0,424 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,174 \\ 0,187 \\ 0,168 \\ 0,199 \\ 0,243 \end{pmatrix}.$$

Глобальный вектор получился с компонентами, по своим значениям близкими друг к другу. Этого и следовало ожидать. Выбор, который мы осуществляли, являлся проблемой расстановки предпочтений для вариантов, претендующих на первенство среди равных. Тем не менее выбор осуществлен, и он однозначно определяет, что  $Y_4$  по своему значению выше остальных и фирме по производству стройматериалов выгоднее производить стеновые блоки.

## 6.4. Примеры использования МАИ

### 6.4.1. Измерение качества

Декомпозиция и анализ проблем всегда необходимы, если нужно быстро достичь желаемого результата и успешно прийти к цели. Приведем некоторые примеры применения метода анализа иерархий для решения задач экономики и управления в строительстве.

Качество в строительной практике как критерий определяется и измеряется с точки зрения целей производства. Несмотря на элементарность этого принципа, он зачастую не отражается в стандартных методах оценки бизнес-процессов. Это происходит из-за того, что эти методы включают задачи и функции без их назначения и целей. Например, проект нового промышленного района города формируется путем интенсивных дебатов и компромиссов между жителями, бизнесменами разного уровня, законодателями, и поэтому сформулированные цели могут быть смесью множества конкурирующих целей. Метод анализа иерархий упрощает процедуру

измерения качества, уточняя цели, позволяет контролировать, проверять их и оценивать последующее применение. МАИ можно использовать как инструмент для измерения качества, включив в иерархию критерии оценки, посредством которых сравнивается фактическое качество системы с желательным. Такого рода процедура была осуществлена для измерения отклонения зданий от архитектурных спецификаций, для оценки качества конструкции самолета по сравнению с желательными стандартами и для оценки альтернативных технологий в развивающихся странах.

### 6.4.2. Выбор типа клиентурного рынка

Строительной фирме необходимо в период глобального кризиса тщательно изучить своих клиентов. Она может, например, выступать на пяти типах клиентурных рынков: потребительском, рынке производителей, промежуточных дилеров, государственных учреждений, международном. Каждый рынок имеет свою специфику. После изучения этой специфики менеджер определяет критерии оценок всех типов рынков, а затем генерирует альтернативы. Данная проблема может привести к весьма важному с практической точки зрения результату. Итоги расчетов компонент глобального приоритета дают возможность руководителю определить долю участия в том или ином типе рынков и получить при этом наибольшую прибыль.

### 6.4.3. Применение МАИ при использовании объективных данных

Покажем, как строительной фирме использовать МАИ в обычной задаче принятия решений при приобретении транспортного средства для перевозки строительных конструкций к месту строительства объекта за минимальную сумму, состоящей из цены за покупку, расходов на эксплуатацию за три года и стоимости бензина за три года в городе (30 000 км) и в деревне (20 000 км) по цене 20 р. за литр. Предлагается выбор из трех видов транспортных средств (ТС), исходя из данных, приведенных в табл. 6.2.

Таблица 6.2

*Исходные данные для задачи о покупке ТС*

Транспортные средства	Стоимость ТС $s_i$ , тыс. р	Расходы на эксплуатацию за год ( $r_i$ ), р	Расход бензина, л за 100 км	
			город ( $g_i$ )	деревня ( $d_i$ )
А	6000	60 000	20	15
Б	8000	40 000	15	12
В	10 000	20 000	12	10

Расходы на покупку и содержание вычислим на основе этих данных. Предполагается, что владелец за три года намеревается проехать 30 000 км по городским дорогам и 20 000 км — по деревенским. Суммарные расходы

$S_i$  на приобретение и эксплуатацию автомобиля состоят из первоначальной стоимости автомобиля  $s_i$ , эксплуатационных расходов  $r_i$  в течение трех лет, а также из затрат на бензин в городе  $g_i$  и деревне  $d_i$  (индекс  $i$  означает тип транспортного средства). В результате получим расчетную формулу:  $S_i = s_i + r_i + g_i + d_i$ :

$$S_A = 6\,000\,000 + 3 \cdot 60\,000 + 30\,000 \cdot 20 \cdot 20 + 20\,000 \cdot 20 \cdot 15 = 24\,180\,000 \text{ р.}$$

$$S_B = 8\,000\,000 + 3 \cdot 40\,000 + 30\,000 \cdot 20 \cdot 15 + 20\,000 \cdot 20 \cdot 12 = 21\,920\,000 \text{ р.}$$

$$S_B = 10\,000\,000 + 3 \cdot 20\,000 + 30\,000 \cdot 20 \cdot 12 + 20\,000 \cdot 20 \cdot 10 = 21\,290\,000 \text{ р.}$$

Транспортному средству В соответствуют минимальные суммарные расходы. Используя идею МАИ, решим эту задачу через иерархическое построение проблемы. Составим граф, позволяющий представить поставленную задачу более наглядно в графической форме.

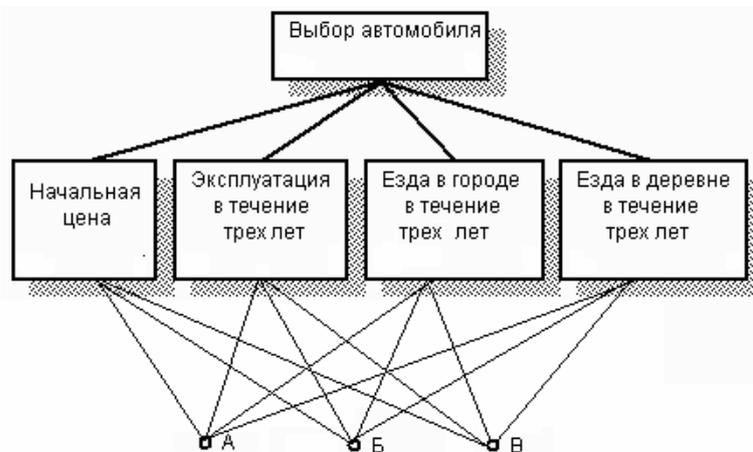


Рис. 6.12. BPWin-диаграмма принятия решений при выборе автомобиля

Иерархия принимает следующий вид. Предварительно произведем нормализацию исходных данных. Эта операция важна в контексте безразмерности при сравнении параметров автомобилей. Нормализация производится путем сложения параметров определенного вида для всех вариантов автомобилей, а затем каждый из них делится на эту сумму. Произведем нормализацию стоимости. Суммарная стоимость автомобилей всех вариантов равна  $S = 6\,000\,000 + 8\,000\,000 + 10\,000\,000 = 24\,000\,000$  р. Тогда относительная стоимость автомобиля А выразится отношением  $24\,000\,000 / (6\,000\,000 / 24\,000\,000) = 24\,000\,000 \cdot (6/24) = 6\,000\,000$ . Несмотря на то, что данные о стоимости не изменились, полученное значение теперь не имеет размерности. Для критериев, имеющих различную природу, это обстоятельство весьма значимо, так как предоставляется возможность осуществлять сравнения качественно различных факторов — цвет автомобиля и расход бензина. Запишем выражения для стоимостей, нормализуя по каждому фактору (табл. 6.3). Расходы на эксплуатацию в сумме составляют

$60\ 000 + 40\ 000 + 20\ 000 = 120\ 000$  р. Следовательно, нормированные значения расходов на содержание транспортных средств за один год будут следующие:  $120\ 000(6/12) = 60\ 000$ ;  $120\ 000(4/12) = 40\ 000$ ;  $120\ 000(2/12) = 20\ 000$ .

Расход денежных средств на бензин в городе определяется аналогично. Определим полную стоимость бензина с учетом условий задачи (20 р. за 1 л бензина):  $30\ 000 \cdot 20(0,2 + 0,15 + 0,12) = 282\ 000$  и умножим на соответствующий коэффициент расхода топлива для каждого ТС:  $g_1 = 282\ 000 \cdot 0,2 = 56\ 400$ ;  $g_2 = 282\ 000 \cdot 0,15 = 42\ 300$ ;  $g_3 = 282\ 000 \cdot 0,12 = 33\ 800$ . Общий расход средств на бензин в деревне составит:  $20\ 000 \cdot 20(0,15 + 0,12 + 0,10) = 400\ 000 \cdot 0,37 = 148\ 000$ . Для каждого ТС:  $g_1 = 148\ 000 \cdot 0,15 = 22\ 200$ ;  $g_2 = 148\ 000 \cdot 0,12 = 17\ 800$ ;  $g_3 = 148\ 000 \cdot 0,10 = 14\ 800$ .

Таблица 6.3

*Нормированные значения для составления парных сравнений*

Стоимость	Обслуживание	Расходы на бензин	
		Город	Деревня
600 000	180 000	56 400	22 200
800 000	120 000	42 300	17 800
1 000 000	600 000	33 800	14 800
Суммарные затраты			
2 400 000	260 000	132 540	54 760

Суммарная стоимость эксплуатации за три года составляет 260 000. Вес критерия, связанного с расходом бензина и соответствующий езде в городе, равен 132 540, а вес критерия, соответствующего езде в сельской местности, будет 54 760.

Матрица парных сравнений критериев включает отношения только что обсужденных весов, которые составляют собственный вектор матрицы сравнений для них, представленной в нормализованном виде (рис. 6.13): 0,843; 0,091; 0,047; 0,019.



Рис. 6.13. Расчет вектора локальных приоритетов критериев при выборе транспортного средства

Таким образом, из числовых исходных данных задачи следует значительное превосходство критерия «Стоимость ТС».

В случае отсутствия точных данных можно аппроксимировать отношения значимостей критериев по 9-балльной шкале, например, следующим образом:

Пункты	Стоимость	Обслуживание	Город	Деревня
Стоимость	1	7	8	9
Обслуживание	1/7	1	1/2	1/3
Город	1/8	2	1	3
Деревня	1/9	3/1	1/3	1

Что дает (рис. 6.14):

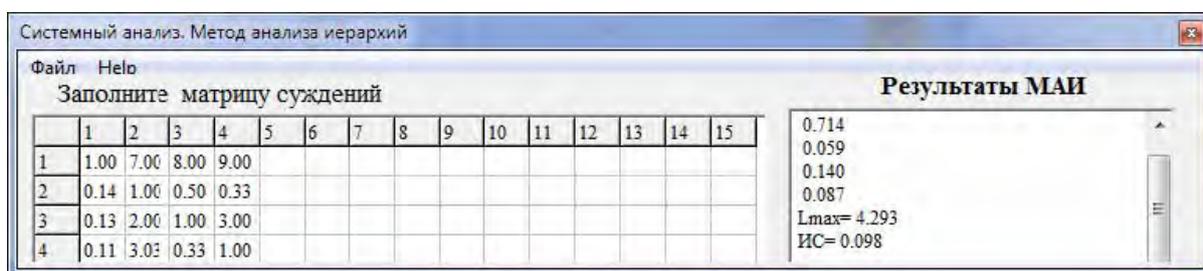


Рис. 6.14. Вектор локальных приоритетов критериев ТС в случае неопределенности

Локальный вектор приоритетов для критериев мало отличается от точного значения, полученного выше. Можно продолжить идею МАИ в этой задаче в контексте отсутствия данных о расходе средств на обслуживание и о расходе на бензин (см. вопросы и задания) и получить ответ на вопрос: «Какое транспортное средство лучше подходит для нужд строительной фирмы?».

Одним из преимуществ подхода МАИ является то, что он безразмерен, так что не возникает проблемы приведения весов к одним единицам измерения. Если применить другой метод, то веса, действительно, должны быть увязаны с единицами, использованными при измерениях, так же как относительные стоимости. Описанный выше процесс показывает на согласованность оценки критериев по шкале значимости в соответствии с необходимым количеством денег, а не с разницей в этих деньгах.

#### 6.4.4. Принятие решения о покупке мебели

После получения лицензии на открытие строительной фирмы по производству одноэтажных коттеджей перед менеджером фирмы стоит задача приобретения мебели для офиса. Различные комплекты мебели уже находятся на рынке, и его интересует вопрос о наиболее подходящем комплекте с точки зрения следующих критериев: стоимость, дизайн, удобство в эксплуатации, долговечность, экономичность, экологичность.

В данном случае на первом этапе, при сравнении критериев и выявлении их приоритетов, менеджер должен произвести коллективную сравнительную оценку критериев между собой для получения более объективного вектора приоритетов. Такие процедуры можно осуществлять различными методами экспертных оценок (см. гл. 5). Одним из которых является метод Дельфи.

#### **6.4.5. Ценообразование**

Цена — сложнейшая экономическая категория. В ней сходятся экономические, социальные и политические факторы, определяющие развитие строительного сектора экономики. Все стороны деятельности строительных фирм так или иначе связаны с использованием цен. С помощью цен экономическое воздействие может быть доведено до каждого отдельного вида стройиндустрии как в сфере производства, так в сфере потребления.

**Ценообразование** — процесс выбора окончательной цены в зависимости от себестоимости продукции, цен конкурентов, соотношения спроса и предложения и других факторов. Основные критерии для установления цены: закрытые торги, предлагающие ожидаемые ценовые пороги конкурентов; ощущаемая ценность; покупательское восприятие значимости товара; уровень текущих цен на рынке; цены конкурентов.

Стратегия ценообразования определяется, кроме того, целями. Чем яснее представления о них, тем легче установить цену. Примерами таких часто встречающихся в практике целей могут быть: обеспечение выживаемости, максимизация текущей прибыли, обеспечение лидерства по показателям качества товара.

С помощью матрицы суждений можно получить приоритетные направления в ценообразовании.

#### **6.4.6. Выбор вида транспорта**

Выбирая средство доставки строительных конструкций, менеджеры принимают в расчет до шести критериев: скорость, частота отправок, надежность, перевозочная способность, доступность, стоимость. С помощью МАИ эта задача решается на двух уровнях иерархии. Формализуя проблему в нотации метода анализа иерархий, можно быстро решить задачу о выборе вида транспорта с помощью ЭВМ.

#### **6.4.7. Маркетинг идей**

Идея как вид деятельности маркетинга — понятие относительно новое, но сама идея маркетинга идей — неплохая идея(!). МАИ достаточно гибок для реализации практически любой идеи. Все зависит от обладателя этого метода. Маркетинг идей в сфере строительных услуг имеет большое

значение, так как, кроме просто услуги, он предлагает развитие деятельности фирмы. Особенно это важно в период перехода на новые современные технологии в строительстве. С другой стороны, для некоторых руководителей маркетинг кажется занятием дорогим и нецелесообразным. По мере обострения рыночной конкуренции (в отсутствие монополии), роста издержек, падения производительности и ухудшения качества услуг все большее число предприятий обслуживания будет проявлять внимание к маркетингу идей. Синтез идеи и услуги, несомненно, имеет будущее. Просто услуга не выдержит конкуренции с альянсом услуги и идеи. МАИ — прообраз этого альянса. Идеи генерируются по мере того, как обладатель начинает применять метод анализа иерархий в какой-то конкретной проблеме.

#### **6.4.8. Применение МАИ для согласования мнений экспертов при оценке стоимости недвижимости**

В международных и региональных нормативах об оценке имущества определено требование в установлении стоимости тремя методами: доходным, затратным и сравнительным. Эксперт должен соблюдать требования согласования результатов оценок, полученных различными методами. Однако на практике этого не делают. В большинстве случаев специалисты по оценке игнорируют процедуру согласования, ограничиваясь применением одного метода, который, как им кажется, дает наиболее достоверный результат.

Проблема согласования трех методов до сих пор остается без формального математического сопровождения, что является причиной ее игнорирования. Каждый из трех подходов содержит как достоверную, так и ошибочную составляющие, соотношение между которыми определяется видами недвижимости, а также субъективизмом и квалификацией эксперта.

Согласование оценок стоимости строительных объектов состоит в объединении различных методов в единую интегрированную процедуру. При этом вероятность получения более точного и объективного значения стоимости объекта значительно возрастает. На рис. 6.15 показаны иерархические уровни МАИ для оценки рыночной стоимости объекта недвижимости с учетом альтернативных оценок тремя общепризнанными методами: затратным, сравнительным и доходным. Критерии исследуются на двух уровнях. На первом уровне расположены основные, определяющие достоверность оценки: исходная информация и методика расчета. На втором — критерии, характеризующие качество исходных данных и метода оценки.

Исходные данные ранжируются по полноте, достоверности и соответствию требованиям рынка. Основными критериями для методов оценки являются: эффективность использования, обоснованность метода, субъек-

тивность мнений. После этого ставится задача определения приоритета метода оценки по шести критериям. Исследуются три альтернативы (затратный, сравнительный и доходный подходы) по шести матрицам парных сравнений.

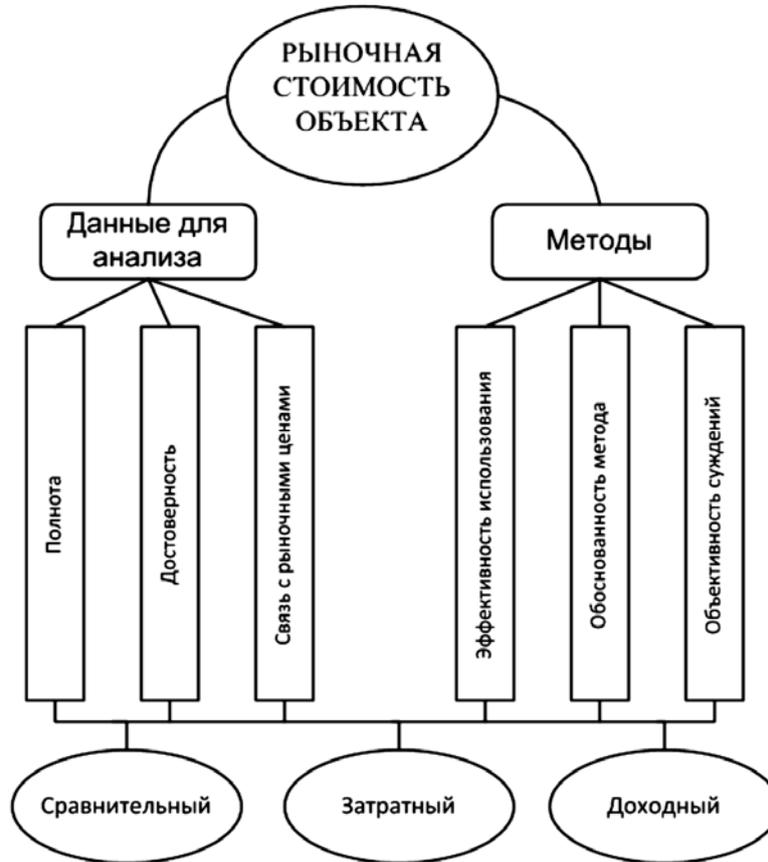


Рис. 6.15. Иерархическая структура задачи оценки недвижимости в нотации МАИ

**Пример 6.1.** Требуется определить рыночную стоимость помещения магазина, расположенного на первом этаже жилого девятиэтажного дома в центре города. В процессе оценки системщик использовал все три подхода и получил следующие результаты: затратный подход (метод замещения) — 14 584 000 р; сравнительный подход (метод регрессии) — 15 768 000 р; доходный подход (метод капитализации) — 17 164 000 р. Эти числа были получены экспертным путем с использованием дополнительной информации из нормативных документов и статистических данных. Проведем согласование полученных результатов, используя алгоритм МАИ. Реализуем декомпозицию проблемы в соответствии с этим алгоритмом. Для каждого уровня иерархий составляем матрицы парных сравнений и рассчитываем локальные векторы приоритетов (рис. 6.16—6.24).

## 1. Сравнение критериев.

Критерии	Данные для анализа	Метод оценки
Исходные данные	1	5
Метод оценки	0,2	1

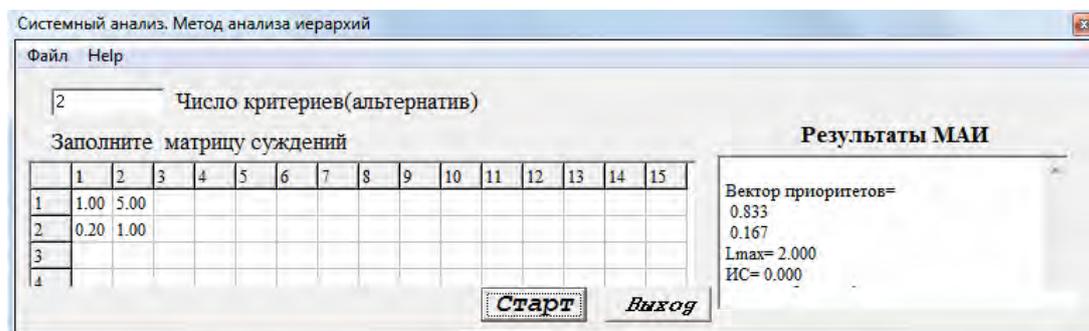


Рис. 6.16. Расчет вектора приоритетов для первого уровня иерархии

## 2. Сравнение критериев для исходных данных.

Критерии	Полнота	Достоверность	Соответствие рынку
Полнота	1	0,20	4
Достоверность	5	1	5
Соответствие рынку	0,25	0,2	1

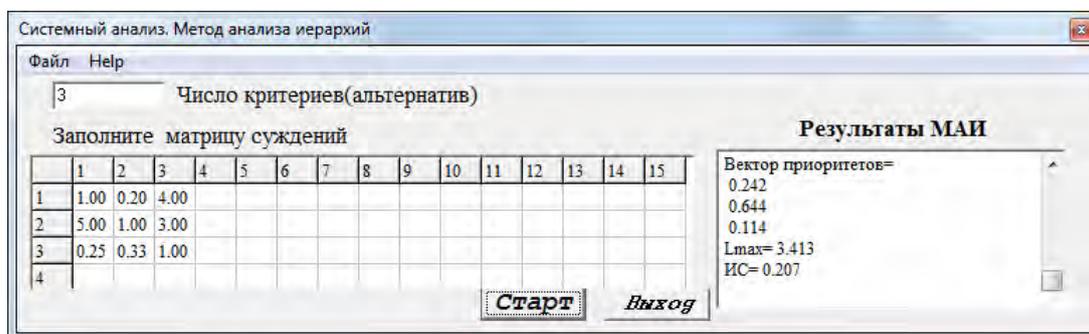


Рис. 6.17. Расчет вектора приоритетов для критериев исходных данных

## 3. Сравнение критериев для методов оценки.

Критерии	Эффективность	Обоснованность	Субъективность
Эффективность	1	5	0,25
Обоснованность	0,2	1	0,2
Субъективность	4	5	1

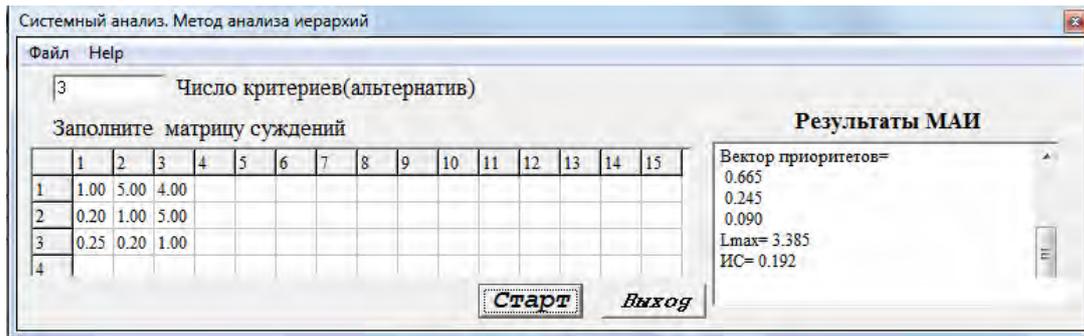


Рис. 6.18. Расчет вектора приоритетов для критериев методов оценки

## 4. Сравнение вариантов по критерию «Полнота информации».

Варианты	Метод		
	затратный	сравнительный	доходный
Затратный	1	4	5
Сравнительный	0,25	1	2
Доходный	0,2	0,5	1

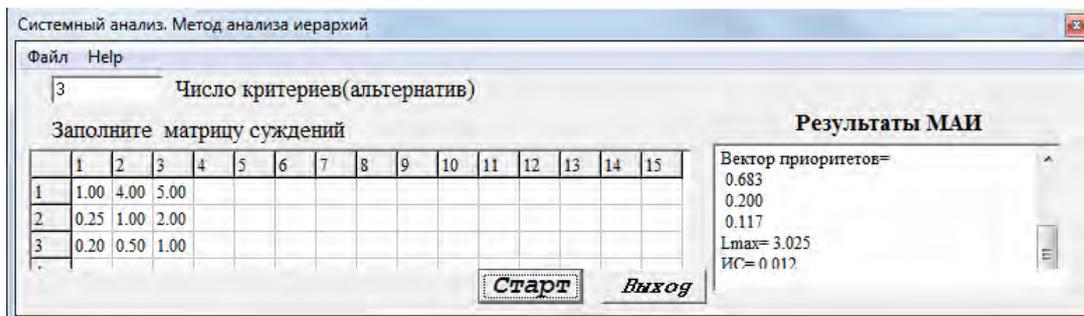


Рис. 6.19. Расчет вектора приоритетов для вариантов по полноте информации

## 5. Сравнение альтернатив по критерию «Достоверность информации».

Альтернативы	Метод		
	затратный	сравнительный	доходный
Затратный	1	0,25	0,33
Сравнительный	4	1	4
Доходный	3	0,25	1

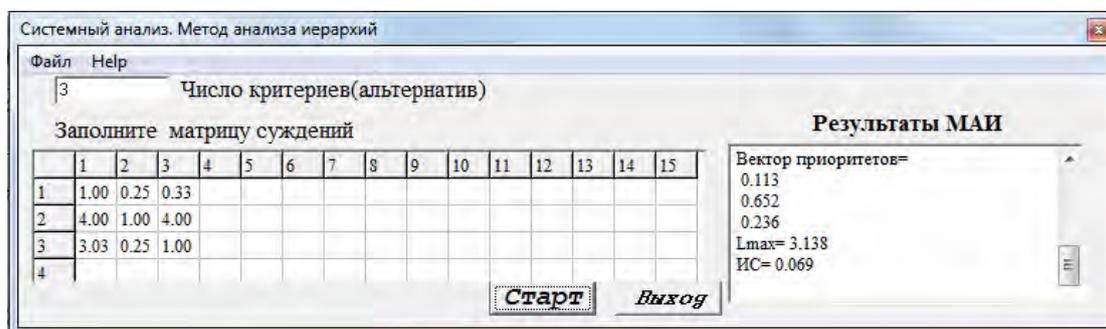


Рис. 6.20. Расчет вектора приоритетов для вариантов по достоверности информации

## 6. Метод анализа иерархий

### 6. Сравнение альтернатив по критерию «Соответствие оценки».

Альтернативы	Метод		
	затратный	сравнительный	доходный
Затратный	1	0,20	0,17
Сравнительный	5	1	0,33
Доходный	6	3	1

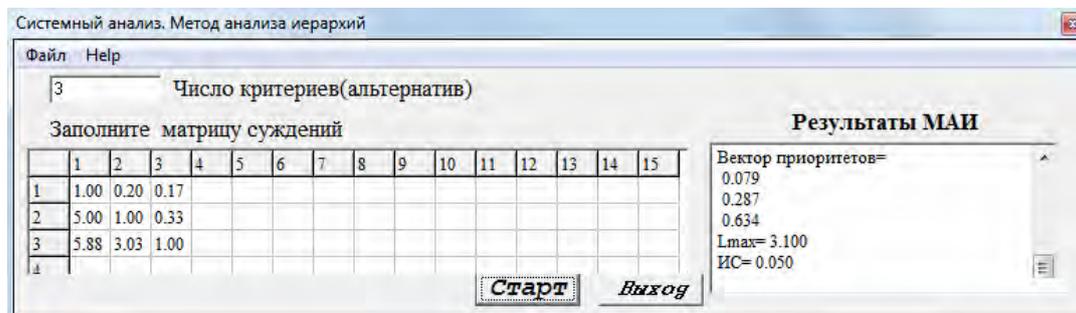


Рис. 6.21. Расчет вектора приоритетов для вариантов по критерию соответствия оценки

### 7. Сравнение альтернатив по критерию «Принцип эффективности использования».

Альтернативы	Метод		
	затратный	сравнительный	доходный
Затратный	1	0,5	0,2
Сравнительный	2	1	0,2
Доходный	5	5	1

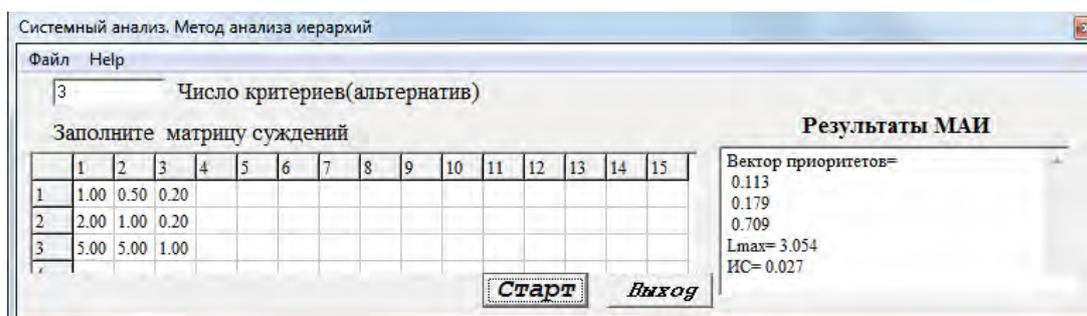


Рис. 6.22. Расчет вектора приоритетов для вариантов по принципу эффективности использования критерия соответствия оценки

### 8. Сравнение альтернатив по критерию «Обоснованность метода».

Альтернативы	Метод		
	затратный	сравнительный	доходный
Затратный	1	0,17	0,33
Сравнительный	6	1	4
Доходный	3	0,25	1

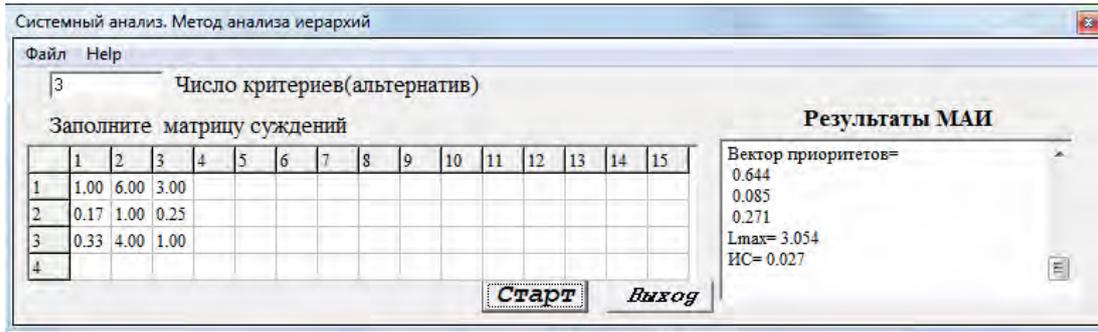


Рис. 6.23. Расчет вектора приоритетов для вариантов по критерию соответствия оценки

9. Сравнение альтернатив по критерию «Субъективность мнений».

Альтернативы	Затратный	Сравнительный	Доходный
Затратный	1	0,2	0,5
Сравнительный	5	1	3
Доходный	2	0,33	1

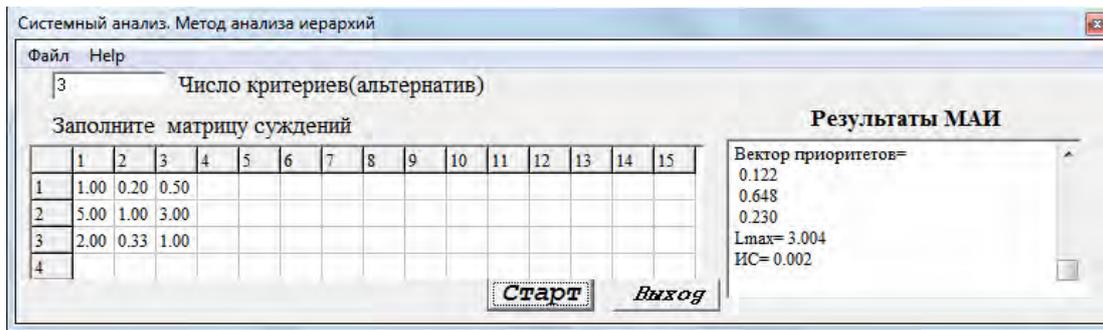


Рис. 6.24. Расчет вектора приоритетов для вариантов по критерию субъективности мнений

Во всех матрицах отмечается удовлетворительное значение индекса согласованности. Приведем данные расчетов в виде вектор-столбцов. Для первого уровня выяснялись приоритеты между данными, и методами оценки был получен вектор приоритетов:  $V = \begin{pmatrix} 0,833 \\ 0,167 \end{pmatrix}$ , указывающий на значительное превосходство исходных данных для анализа.

На втором уровне определялись критерии. Для каждого компонента первого уровня получены векторы:

$$V2^1 = \begin{pmatrix} 0,242 \\ 0,664 \\ 0,114 \end{pmatrix}, \quad V2^2 = \begin{pmatrix} 0,665 \\ 0,245 \\ 0,090 \end{pmatrix}.$$

Верхний индекс означает принадлежность вектора приоритетов к верхнему уровню, а именно: 1 — «данные», 2 — «методы».

Третий уровень иерархии посвящен вычислению приоритетов среди вариантов по шести критериям второго уровня. Для более четкого разделения введем дополнительные индексы для этих векторов приоритетов. Получим

$$\mathbf{V3}_1^1 = \begin{pmatrix} 0,683 \\ 0,200 \\ 0,117 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V3}_2^1 = \begin{pmatrix} 0,113 \\ 0,652 \\ 0,236 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V3}_3^1 = \begin{pmatrix} 0,079 \\ 0,287 \\ 0,634 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{V3}_1^2 = \begin{pmatrix} 0,113 \\ 0,179 \\ 0,709 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V3}_2^2 = \begin{pmatrix} 0,644 \\ 0,085 \\ 0,271 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{V3}_3^2 = \begin{pmatrix} 0,122 \\ 0,648 \\ 0,230 \end{pmatrix}.$$

Верхний индекс означает принадлежность вектора приоритетов относительно первого уровня иерархий, а нижний принадлежит критерию второго уровня иерархии, например,  $\mathbf{V3}_2^1$  — это вектор сравнений альтернатив для первого критерия первого уровня иерархии и второго критерия из второго уровня (нижний индекс нумерует критерии второго уровня с учетом их разбиения первым).

Полученные от экспертов разрозненные оценки необходимо соединить в одну оценку вариантов по всем критериям одновременно. Для этого вычисляется глобальный вектор приоритетов.

Вычислим глобальный вектор за два шага. На первом шаге определим влияние критериев второго уровня. Сначала по критерию «Исходные данные» первого уровня, а затем для «Метода оценки». Для приоритетов альтернатив по критерию «Метод оценки» он вычисляется путем перемножения матрицы, сформированной из значений соответствующих локальных векторов приоритетов на локальный вектор, определяющий вес критерия «Метод оценки»:

$$\mathbf{GV1} := \begin{pmatrix} 0,683 \\ 0,200 \\ 0,117 \end{pmatrix} 0,242 + \begin{pmatrix} 0,113 \\ 0,652 \\ 0,236 \end{pmatrix} 0,664 + \begin{pmatrix} 0,079 \\ 0,287 \\ 0,634 \end{pmatrix} 0,114 \quad \mathbf{GV1} = \begin{pmatrix} 0,249 \\ 0,514 \\ 0,257 \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{GV2} := \begin{pmatrix} 0,113 \\ 0,179 \\ 0,709 \end{pmatrix} 0,665 + \begin{pmatrix} 0,644 \\ 0,085 \\ 0,271 \end{pmatrix} 0,245 + \begin{pmatrix} 0,122 \\ 0,648 \\ 0,230 \end{pmatrix} 0,09 \quad \mathbf{GV2} = \begin{pmatrix} 0,249 \\ 0,198 \\ 0,559 \end{pmatrix}.$$

И, наконец, глобальный вектор, учитывающий все критерии, приводит к выбору нужного подхода для проведения оценок стоимости недвижимости:

$$\mathbf{GV} := \mathbf{GV1} \cdot 0,833 + \mathbf{GV2} \cdot 0,167, \quad \mathbf{GV} = \begin{pmatrix} 0,249 \\ 0,461 \\ 0,308 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, веса достоверности результатов определения стоимости затратным, сравнительным и доходным методами равны, соответственно, 0,249, 0,461 и 0,308. Вес сравнительного метода выше остальных. Значение рыночной стоимости объекта нашего примера (магазина) определяется как средневзвешенное:

$$\mathbf{G}_{\text{МАГ}} := 0,249 \cdot 14\,584 + 0,461 \cdot 15\,786 + 0,308 \cdot 17\,164.$$

$$\mathbf{G}_{\text{МАГ}} = 1,62 \cdot 10^4 \text{ (тыс. р.)}.$$

Следует указать на неравнозначность методов, что должно повлиять на окончательный результат. Таким образом, для избежания субъективизма при согласовании экспертных оценок можно успешно применять метод анализа иерархий, как это было показано в приведенном примере.

## 6.5. Принятие решений в условиях неопределенности

Неопределенность, связанная с «размытыми» исходными данными, относится к разделу теории множеств. Существует несколько методов принятия решений в условиях неопределенности. Выбор метода зависит от таких факторов, как объем и точность информации, наличие опыта решения аналогичных задач, возможность формализации задачи (т. е. построения ее математической модели) и т. д. Как правило, задачи с неопределенностями решаются различными методами:

- экспертным — используются экспертные оценки;
- игровым — на основе теории игр;
- статистическим — анализ временных рядов;
- аналитическим — расчеты с использованием методов исследования операций;
- дерево решений — анализ возможных результатов принимаемых решений;
- имитация — используются результаты моделирования на ЭВМ.

Рассмотрим из-за недостатка места лишь некоторые из них, так как экспертные оценки, метод Дельфи, имитация и машинный эксперимент, аналитические и некоторые другие были уже рассмотрены в соответствующих разделах.

### **6.5.1. Методы оценки и выбора решений на основе зон неопределенности (зоны риска)**

Эти методы основаны на разбиении диапазона возможных потерь на зоны по степени их допустимости. Такие зоны называются зонами неопределенности или зонами риска. Каждая зона риска определяет вероятность соответствующих потерь. Для оценки этих вероятностей используются экспертные, статистические, аналитические или имитационные методы. На основе анализа зон неопределенности и вероятностей попадания величины потерь в эти зоны выполняется оценка допустимости решения. Способы выделения зон риска зависят от конкретной задачи. Выделяются три зоны неопределенности: допустимая, критическая и катастрофическая. При оценивании неопределенности, связанной с мероприятиями, требующими затрат и приносящими прибыль, зоны неопределенности выделяются по следующим правилам:

1) зона допустимой неопределенности: получение прибыли ниже ожидаемой;

2) зона критической неопределенности: получение выручки, недостаточной для покрытия затрат;

3) зона катастрофической неопределенности: полное отсутствие выручки и дополнительные потери.

Любой проект признается допустимым по уровню неопределенности, если вероятность допустимой неопределенности не превышает одной десятой, вероятность критической неопределенности — не более одной сотой, вероятность катастрофической неопределенности — не более одной тысячной.

**Пример 6.2.** Строительная фирма реализует некоторый коммерческий проект, затраты на который составляют 8 млн р. Фирма ожидает получить выручку в размере 14 млн р. с прибылью 6 млн р. Таким образом, зона допустимого риска соответствует прибыли в размере от 0 до 6 млн р. (получение выручки от 8 до 14 млн р.). Зона критического риска — выручка в размере от 0 до 8 млн р. Зона катастрофического — отсутствие выручки и появление дополнительных расходов.

Имеются экспертные оценки, по которым вероятность получения выручки в размере от 8 до 14 млн р. составляет 8 %. Вероятность получения выручки менее 8 млн р. — 3 %. Вероятность отсутствия выручки — 1 %. При таких экспертных оценках предприятию следует отказаться от реализации проекта, так как вероятности критического и катастрофического рисков превышают допустимые величины. При использовании зон неопределенности наиболее сложной задачей является получение вероятностей потерь, соответствующих различным зонам.

### 6.5.2. Принятие решений в условиях неопределенности со многими критериями

Многокритериальные управленческие задачи в строительном бизнесе имеют также зоны риска, когда решения зависят от неконтролируемых внешних факторов, которые могут влиять на некоторые критерии оценок. Выбор вариантов по нескольким критериям с учетом неопределенности реализуется следующим образом:

1) для каждого критерия, связанного с внешними условиями, находятся оценки вариантов с применением метода анализа иерархий;

2) полученные оценки сводятся в матрицу выигрышей и выбор варианта выполняется на основе игровых методов.

**Пример 6.3.** Рассмотрим три проекта предприятия строительного бизнеса: проект А, Б и В. Спрос на строительную продукцию, которую будет выпускать предприятие, не известен. Эксперты утверждают, что в ближайшие годы вероятность низкого спроса на продукцию этого предприятия составит 10 %, среднего — 60 %, высокого — 30 %. При выборе проекта учтем следующие критерии:

- 1) прибыль от работы предприятия;
- 2) количество рабочих мест, создаваемых предприятием;
- 3) загрязнение окружающей среды;
- 4) затраты на строительство.

Оценки проектов по критериям 1—3 в условиях различных уровней спроса приведены в табл. 6.4.

Затраты на строительство по проекту А составят 60 млн р., по проекту Б — 80, а по проекту В — 90 млн р.

Таблица 6.4

#### Характеристики проектов

Спрос	Низкий			Средний			Высокий		
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
Проекты									
Прибыль, млн р./год	40	30	30	45	60	65	45	60	80
Количество рабочих мест, тыс.	8	11	12	8,5	11	12,5	8,5	11	12,5
Загрязнение окружающей среды, м <sup>3</sup> /год	30	70	60	30	80	70	30	80	80

В задаче требуется учесть четыре критерия. Три из них (прибыль, количество рабочих мест и загрязнение окружающей среды) зависят не только от принятого решения, но и от внешних условий — спроса на продукцию. Следовательно, решение принимается в условиях неопределенности. Один из критериев — затраты на строительство — не зависит от будущего спроса на продукцию. Для решения задачи воспользуемся методом анализа иерархий. Вычислим сначала ЛВП для некоторых критериев.

Ниже дана матрица сравнений для критериев.

Критерии	Прибыль	Кол-во мест	Загрязнение	Затраты
Прибыль	1	7/1	2/1	5/1
Кол-во мест	1/7	1	1/6	1/3
Загрязнение	1/2	6/1	1	4/1
Затраты	1/5	3/1	1/4	1

Расчет локального вектора приоритетов для критериев приведен на рис. 6.25.

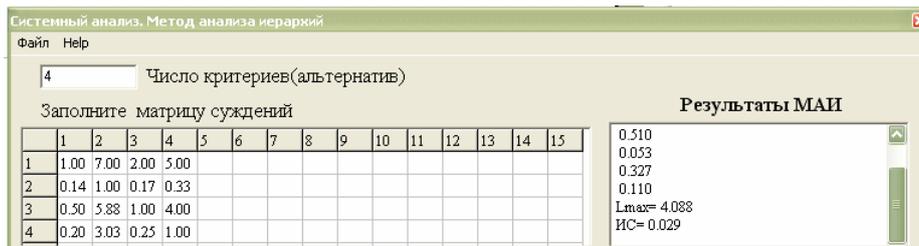


Рис. 6.25. Расчет локального вектора приоритетов для критериев

Видно, что индекс согласованности и  $L_{\max}$  вполне удовлетворяют требованиям МАИ и результаты расчетов можно считать адекватными для дальнейших расчетов. Определим локальные векторы приоритетов для проектов по каждому критерию, выполнив попарное сравнение.

1. Сравнение по критерию «Прибыль» (рис. 6.26).

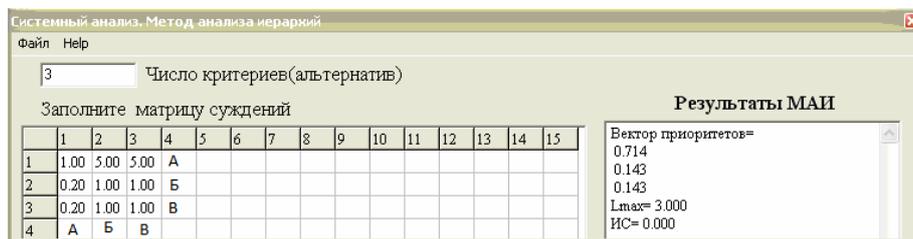


Рис. 6.26. Расчет локального вектора приоритетов вариантов проектов (критерий «Прибыль»)

Здесь оценка  $w_{12} = 5$  (см. матрицу суждений) означает, что в условиях низкого спроса проект А лучше, чем проект Б, по этому критерию.

2. Сравнение по критерию «Количество рабочих мест» (рис. 6.27).

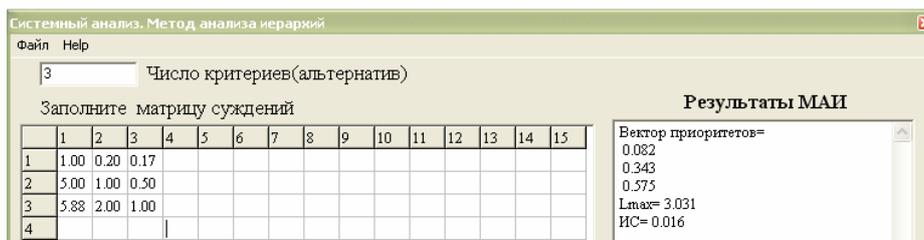


Рис. 6.27. Расчет локального вектора приоритетов вариантов проектов (критерий «Количество рабочих мест»)

## 3. Сравнение по критерию «Загрязнение окружающей среды» (рис. 6.28).

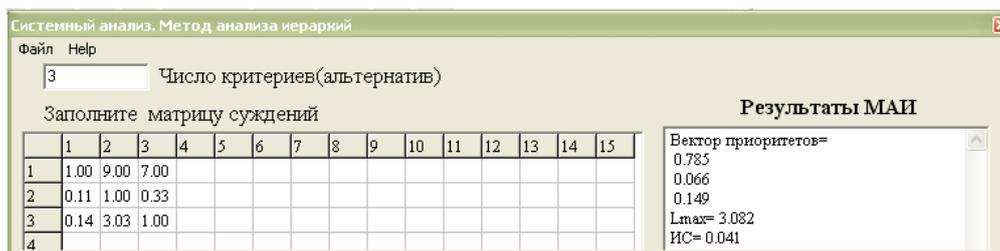


Рис. 6.28. Расчет локального вектора приоритетов вариантов проектов (критерий «Загрязнение окружающей среды»)

## 4. Сравнение по критерию «Затраты на строительство» (рис. 6.29).

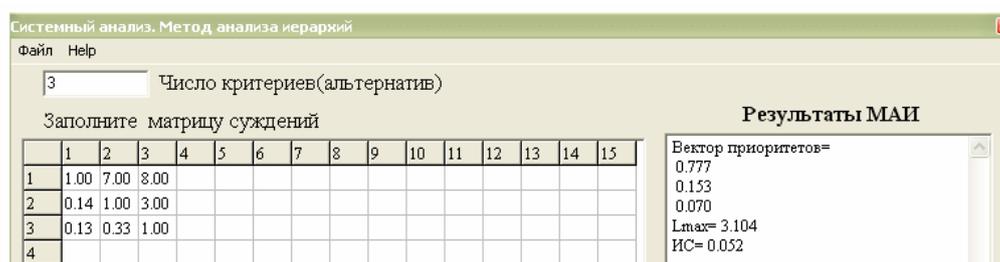


Рис. 6.29. Расчет локального вектора приоритетов вариантов проектов (критерий «Затраты на строительство»)

Вычисления глобального вектора приоритетов для первого случая неопределенностей от внешних условий (низкий спрос) приведены в табл. 6.5.

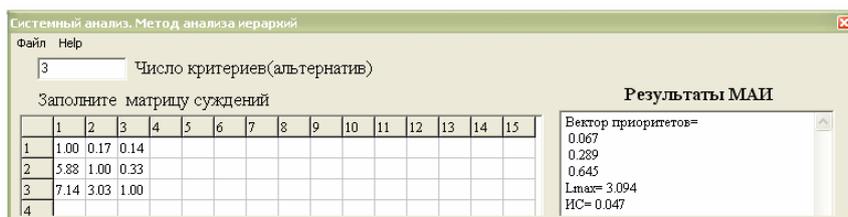
Из табл. 6.5 видно, что для низкого спроса «побеждает» проект А. Вычислим глобальный вектор приоритетов для среднего спроса. Так как важность критериев не зависит от внешних условий, то ЛВП для критериев будут такими же. Определим ЛВП вариантов по каждому из критериев (рис. 6.30).

Таблица 6.5

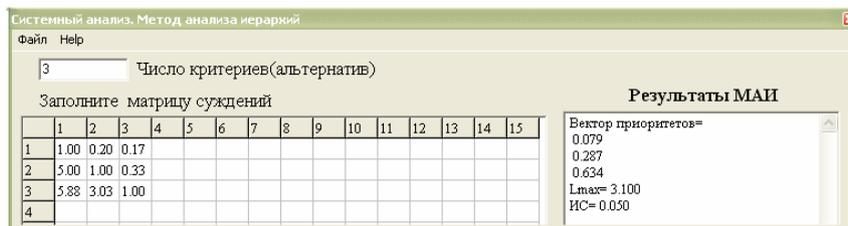
*Вычисление глобального вектора для низкого спроса*

ЛВП критериев	Сравнения проектов по критериям				Предварительные вычисления				Глобальный вектор приоритетов
	1-й крит.	2-й крит.	3-й крит.	4-й крит.	$x_1$ ЛВП1	$x_2$ ЛВП2	$x_3$ ЛВП3	$x_4$ ЛВП4	
0,51	0,714	0,082	0,785	0,777	0,364	0,004	0,257	0,085	0,711
0,053	0,143	0,343	0,066	0,153	0,073	0,018	0,022	0,017	0,130
0,327	0,143	0,575	0,149	0,07	0,073	0,030	0,049	0,008	0,160
0,11									

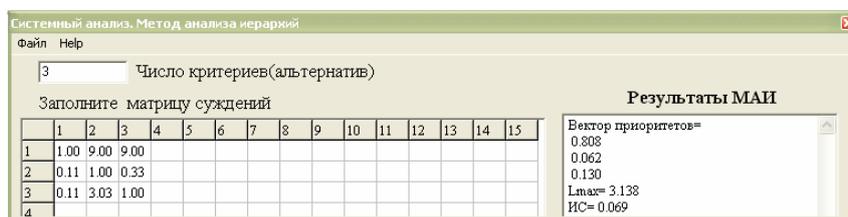
## 6. Метод анализа иерархий



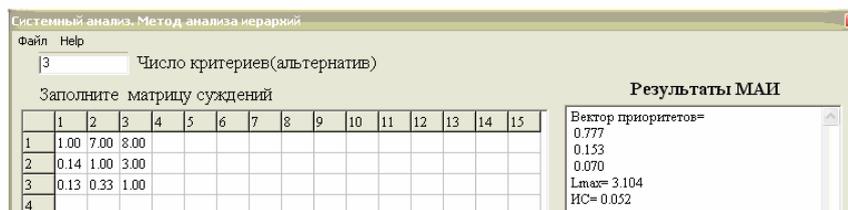
а



б



в



г

Рис. 6.30. Расчеты ЛВП проектов для разных критериев. Сравнение по критериям: а — «Прибыль»; б — «Количество рабочих мест»; в — «Загрязнение окружающей среды»; г — «Затраты на строительство»

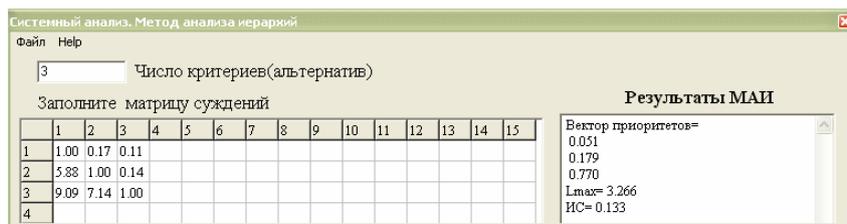
Вычислим глобальные приоритеты для проектов (табл. 6.6).

Таблица 6.6

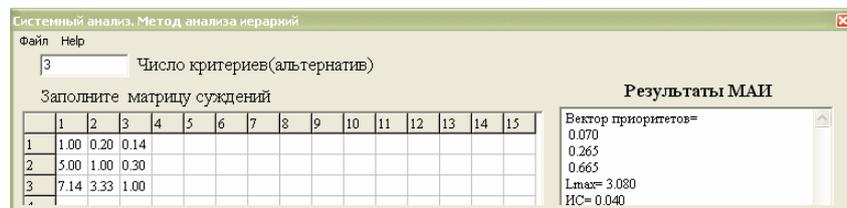
*Вычисление глобального вектора для среднего спроса*

ЛВП критериев	Сравнения проектов по критериям				Предварительные вычисления				Глобальный вектор приоритетов
	1-й крит.	2-й крит.	3-й крит.	4-й крит.	$x_1^i$ ЛВП1	$x_2^i$ ЛВП2	$x_3$ ЛВП3	$x_4^i$ ЛВП4	
0,51	0,067	0,079	0,808	0,777	0,034	0,004	0,264	0,085	0,388
0,053	0,289	0,287	0,062	0,153	0,147	0,015	0,020	0,017	0,200
0,327	0,645	0,634	0,13	0,07	0,329	0,034	0,043	0,008	0,413

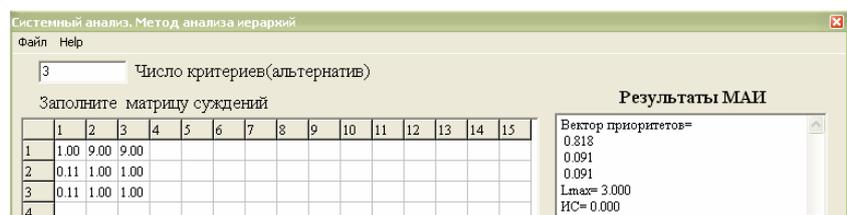
Найдем глобальный вектор альтернатив для третьего варианта внешних условий, т. е. для высокого спроса.



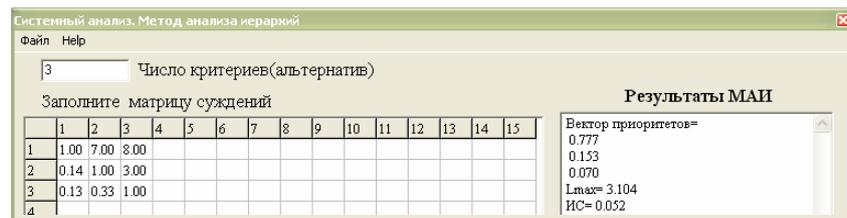
a



b



в



г

Рис. 6.31. Расчеты ЛВП проектов для разных критериев третьего уровня иерархии. Сравнение по критериям: a — «Прибыль»; б — «Количество рабочих мест»; в — «Загрязнение окружающей среды»; г — «Затраты на строительство»

3. Найдем глобальные приоритеты проектов:  $G_A = 0,383$ ;  $G_B = 0,152$ ;  $G_B = 0,465$  (табл. 6.7).

Таблица 6.7

Вычисление глобального вектора для высокого спроса

ЛВП критериев	Сравнения вариантов по критериям				Предварительные вычисления локальных векторов приоритетов				Глобальный вектор приоритетов
	1-й крит.	2-й крит.	3-й крит.	4-й крит.	$x_1$ ЛВП1	$x_2$ ЛВП2	$x_3$ ЛВП3	$x_4$ ЛВП4	
0,51	0,051	0,07	0,818	0,777	0,026	0,004	0,267	0,085	0,383
0,053	0,179	0,265	0,091	0,153	0,091	0,014	0,030	0,017	0,152
0,327	0,77	0,665	0,091	0,07	0,393	0,035	0,030	0,008	0,465

Глобальные векторы проектов, полученные для разных внешних условий, запишем в матрицу выигрышей.

Проекты	Спрос		
	низкий	средний	высокий
А	0,711	0,388	0,383
Б	0,130	0,200	0,152
В	0,160	0,413	0,465

С помощью этой матрицы выбирается лучший проект. Выбор производится в зависимости от постановки задачи, прежде всего — в зависимости от информации о внешних условиях. В данном случае известны экспертные оценки вероятностей для различных уровней спроса. Поэтому для выбора альтернативы используется критерий максимума среднего выигрыша. Для каждой альтернативы находится обобщенная оценка с учетом всех вариантов внешних условий:

$$E_A = 0,71 \cdot 0,1 + 0,39 \cdot 0,6 + 0,38 \cdot 0,3 = 0,42;$$

$$E_B = 0,13 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,6 + 0,16 \cdot 0,3 = 0,18;$$

$$E_V = 0,16 \cdot 0,1 + 0,41 \cdot 0,6 + 0,46 \cdot 0,3 = 0,4.$$

Таким образом, в качестве рационального решения следует выбрать строительство предприятия по проекту А. Из примера видно, что МАИ вполне справился с неопределенностью в прогнозировании спроса. Увеличился объем вычислений, но это стоит того, как и все то, что касается вопроса грамотного управления строительным бизнесом.

## 6.6. Перспективы развития МАИ

После достаточно подробного описания метода анализа иерархий и разбора конкретных примеров подведем итоги и пролонгируем идею МАИ на будущее.

Метод анализа иерархий — это, прежде всего, методологическая основа для решения задач выбора посредством многокритериального оценивания вариантов. Метод вырос в обширный междисциплинарный раздел науки, имеющий строгие математические и психологические обоснования и многочисленные приложения.

Основное применение метода — поддержка принятия решений посредством иерархической композиции при выборе альтернативных решений. Как мы увидели, в соответствии с результатами иерархической декомпозиции, модельная ситуация принятия решения имеет древовидную структуру. Разработанная в методе анализа иерархий процедура парных сравнений позволяет определять приоритеты объектов, входящих в каждый уровень дерева. После того, как проведен анализ проблемы и собраны данные по всем ветвям дерева, рассчитывается глобальный вектор.

Мнения экспертов, возникающие при обсуждении проблемы, сами могут в данной ситуации рассматриваться в качестве возможных решений. Поэтому метод анализа иерархии можно применить для определения важности учета мнения каждого участника обсуждения. В соответствии с формулировкой задачи принятия решения величина приоритета напрямую связана с оптимальностью решения, а решения с низкими весами отвергаются как несущественные. Если при исключении какого-либо критерия приоритеты изменяются незначительно, то такой критерий можно считать несущественным. Таким образом, метод позволяет оценить устойчивость принимаемого решения. Принятое решение можно считать обоснованным лишь при условии, что неточность данных или неточность структуры модели ситуации принятия решения существенно не влияют на альтернативные решения.

Обобщая опыт принятия решений в строительной экономике, можно высказать ряд интуитивных пожеланий к свойствам метода. Постановка проблемы и ее решение должны соответствовать естественному ходу человеческого мышления. Следует иметь в виду, что математика, положенная в основу метода, не должна заменять человеческий опыт в интерпретации создавшейся ситуации.

Метод должен служить универсальной систематической основой принятия решения, позволяющей ставить процесс принятия решений на поток. Одновременно он должен учитывать тот факт, что имеется множество мнений и подходов к принятию решений. В процессе выработки единого решения возможны конфликты. Поэтому нужны механизмы достижения согласия. В МАИ должен учитываться тот факт, что для масштабных задач решение связано с неопределенностью, сказывающейся на качестве окончательного решения. Кроме всего, для выбора лучшего решения далеко не всегда удастся построить логическую цепочку рассуждений, когда из двух вариантов можно выбрать только один и компромиссы не допустимы. Поэтому для обеспечения ясности необходим механизм количественной оценки приоритетов для возможных вариантов решений. Иначе процесс принятия решений может носить неопределенный характер, а потенциальные возможности могут оказаться нереализованными.

В концепции МАИ нет общих правил для формирования структуры модели принятия решения. Он является отражением реальной ситуации управления, поскольку всегда для одной и той же проблемы имеется целый спектр мнений. Метод позволяет учесть это обстоятельство с помощью построения дополнительной модели для согласования различных мнений, посредством определения их приоритетов. Таким образом, учитывается человеческий фактор. Это одно из его важных достоинств перед другими методами принятия решений.

Формирование дерева решения — достаточно трудоемкий процесс. Однако в итоге удается получить детальное представление о том, как именно взаимодействуют критерии, влияющие на приоритеты альтернатив. Процедуры расчетов локальных векторов приоритетов достаточно просты, что выгодно отличает данный метод от других.

Сбор данных для поддержки решений осуществляется с помощью процедуры парных сравнений. Результаты парных сравнений могут быть и противоречивыми, что вызывает иногда необходимость пересмотра данных для минимизации противоречий.

В рамках МАИ нет средств для проверки достоверности данных. Это существенный недостаток, ограничивающий отчасти возможности применения. Однако он применяется в тех случаях, когда в принципе не может быть объективных данных, а ведущими мотивами для принятия решения являются предпочтения людей. При этом процедура парных сравнений практически не имеет достойных альтернатив. Если сбор данных проведен с помощью опытных экспертов и в данных нет существенных противоречий, то качество таких исходных данных признается удовлетворительным.

Схема применения метода совершенно не зависит от сферы деятельности, в которой принимается решение. Поэтому метод является универсальным для разработки систем поддержки решений. Работа по подготовке принятия решений может оказаться слишком трудоемкой для одного человека. Благодаря тому, что метод позволяет разбить большую задачу на ряд малых самостоятельных задач, то для подготовки оптимального решения можно привлечь экспертов, работающих независимо друг от друга над локальными задачами. Эксперты могут не знать ничего о характере принимаемого решения, что отчасти способствует сохранению тайны о подготовке решения. Данный метод может служить надстройкой для других методов при решении плохо формализованных задач, где более подходят человеческие опыт и интуиция, нежели сложные математические расчеты. МАИ отражает естественный ход человеческого мышления и дает более общий подход при выявлении наиболее предпочтительного решения и позволяет количественно выразить степень предпочтительности. Оценка меры противоречивости использованных данных позволяет установить степень доверия к полученному результату.

Обсудим ряд типичных проблем. Набор возможных альтернатив не известен. Критерии, влияющие на выбор альтернатив, также не определены. Подобная постановка проблемы особенно актуальна для принятия стратегических и долгосрочных решений. Действительно, с течением времени малозначительные на данный момент факторы и альтернативы могут стать важными, и наоборот, то, что важно сейчас, может оказаться незначительным впоследствии. В реальных задачах часто имеют место так называемые

обратные связи, когда принимается решение, требующее значительного времени на реализацию. В таком случае оказывается, что критерии, определяющие значимость решения, сами зависят от принятого решения. Например, решение, принятое с учетом имеющихся на данный момент ее ресурсов, впоследствии повлияет на величины ресурсов, а это может привести к пересмотру решения (строительный объект может оказаться невостребованным). Во многих случаях выбор решения существенно зависит от желаний лица, принимающего решения: то, что хорошо для одного человека, может быть совершенно неприемлемо для другого. При принятии решения должны учитывать человеческий фактор. В таких случаях существенны методы обработки качественной информации, что является практически непреодолимым препятствием для традиционных средств принятия решений.

Противоречия нельзя снять совсем, но от них надо уходить, так как противоречивые данные не могут быть достоверной основой для принятия решения. При решении задачи возникает множество мнений и нет консенсуса. МАИ, позволяющий оценивать приоритеты возможных решений, может быть использован для достижения согласия путем «взвешивания» мнений. Одним из требований, обеспечивающих обоснованность метода, является компетентность экспертов, принимающих участие в создании модели принятия решения, подготовке данных и интерпретации результатов.

Значительным превосходством представленного подхода перед большинством существующих для оценивания альтернатив является детальный анализ проблемы и отчетливое выражение суждений с помощью парных матриц сравнений. При построении декомпозиции специалист по строительному менеджменту должен вникнуть в изучаемую проблему на уровне, необходимом для реализации метода анализа иерархии. Рядовой специалист может не знать, как делается декомпозиция и как строятся иерархии проблем высших уровней; однако если он справился с простейшим видом декомпозиции, представленным в рассмотренном нами примере с выбором производимого изделия, он приобретет опыт практического применения МАИ.

Сама идея анализа иерархии развивается и совершенствуется. Разрабатываются новые программы с дружественным интерфейсом для пользователя, нарабатывается пакет программ для решения задач аналитического планирования и выбора альтернатив для различных сфер деятельности человека, поддержки решений и т. д. Одним из простых примеров реализации МАИ на ЭВМ служит прилагаемый электронный учебник.

Метод анализа иерархий успешно применялся во многих областях: при распределении энергии в промышленности или проектировании транспортной системы целых государств; в прогнозировании и планировании

будущей деятельности концерна и влиянии факторов окружающей среды на его развитие; при выдвижении кандидатов на выборах; при определении приоритетов научных тематик научно-исследовательского института; в задаче перемещения по службе сотрудников фирмы и аттестации преподавателей; для прогнозирования цен на нефть. Формирование иерархии и структурирование проблемы любым другим методом требует существенных знаний об исследуемой системе. К сильным сторонам МАИ можно отнести то, что при определении уровней иерархии важную роль также играют знания лиц, производящих суждения для парных сравнений.

Применение метода анализа иерархий стимулировало повышение уровня знаний о некоторых специфических проблемах планирования даже среди людей, имеющих достаточно обширные познания и опыт в данной конкретной предметной ситуации. МАИ служит иногда своеобразным методом познания в случаях с неполной информацией. При его использовании проблема еще больше раскрывается и накапливаются дополнительные знания. Если МАИ применяется итеративным образом, т. е. когда процесс повторяется с целью уточнения суждений, то это позволяет за счет введения новой информации экспериментировать над системой, чтобы выявить воздействия на ситуацию возможных предположений о сценариях развития исследуемой системы. Экспертные суждения здесь же могут быть отслежены формальными алгоритмами МАИ для оценки результатов на выходе. Диалог, структурированные дебаты и продолжительное взаимодействие участников в таком процессе представляются благоприятствующими факторами для обучения. Сама процедура системного анализа концептуально базируется на методологии иерархического структурирования и в большей части поддерживается МАИ.

Т. Саати [2] было показано приложение МАИ для аналитического планирования и продемонстрированы потенциальные ценности метода для решения проблем, где делаются попытки получить связь между наиболее вероятным и желаемым будущим. Измерения с помощью МАИ допускают определенную степень несогласованности среди группы экспертов и позволяют принять решение при допустимой несогласованности для каждого из членов группы. При этом участники не будут чувствовать, что их предпочтения были в значительной степени нарушены.

В классической теории принятия решений МАИ может быть использован для определения парето-оптимального состояния системы, т. е. точки, в которой некоторые участники не могут улучшить своего состояния, не причинив вреда кому-либо другому. Отметим, что метод анализа иерархий основан на следующих аксиомах: парных сравнений, обоснованной шкалы для перевода суждений в число и обратно симметричных отношений, иерархической декомпозиции, а также на аксиоме прогноза, отражающей со-

ответствие заложенных в модель элементов и ожидаемых результатов. Из этих аксиом Т. Саати получил несколько теорем, которые превращают МАИ в математически обоснованную методологию решения сложных многокритериальных проблем.

### Вопросы и задания

1. В чем состоит метод анализа иерархий?
2. Какая иерархия считается полной? Приведите примеры полной и неполной иерархии.
3. Как вычисляется локальный вектор приоритетов?
4. Что является локальным и глобальным приоритетами? Как они связаны между собой?
5. Рассмотрите МАИ для решения экономической проблемы при строительстве Волго-Донского канала.
6. Сформулируйте проблему и постройте структурную схему иерархии в виде графа для задачи «Выбор места строительства торгового центра в городе  $N$ ».
7. Составьте матрицу бинарных отношений для сравнения весов критериев: стоимость, время монтажа и долговечность при решении задачи выбора загородного дома. Какие проблемы возникли у вас при этом и как вы их обошли?
8. Что такое неопределенность цели?
9. Для сравнения транспортных средств относительно каждого из четырех критериев (см. 6.4.3) можно использовать отношения величин, находящихся в скобках в выражении для стоимостей, которые представляют собой просто относительные величины. Например, когда транспортное средство А сравнивается с транспортным средством Б, то можно написать  $(6/24): (8/24) = 6/8$  и т. д. Покажите, что иерархический анализ приводит к такому же выбору. При этом можно использовать уже полученные данные о важности критериев.
10. Имеется возможность реализовать один из двух коммерческих проектов. При реализации первого проекта существует риск убытков в размере 1 млн ден. ед.; вероятность таких убытков — 10 %. При реализации второго проекта возможны убытки в размере 3 млн ден. ед.; вероятность таких убытков — 5 %. Для оценки риска в случаях, когда известна величина возможных потерь и их вероятность, может применяться следующая формула:  $R = 3,12P_n + \lg U$ , где  $P_n$  — вероятность потерь;  $U$  — величина потерь. Какой проект менее рискован?
11. Для обеспечения нормальной работы строительного предприятия требуется выполнить очистку 200 т сырья в сутки. Производительность очистного оборудования зависит от качества сырья и может составлять 180...250 т в сутки. На предприятие может поступать сырье разного качества, поэтому заранее точно не известно, сколько времени потребуется на его очистку. В качестве меры риска следует использовать вероятность несвоевременной очистки сырья (т. е. вероятность того, что за сутки будет очищено менее 200 т сырья). В данной задаче количество сырья, очищаемого в течение суток, представляет собой случайную величину, распределенную по равномерному закону в диапазоне 180...250 т в сутки. Такая случайная величина описывается следующей

$$\text{плотностью распределения: } f(x) = \begin{cases} 0, & x < 180 \\ \frac{1}{250-180} = \frac{1}{70}, & 180 \leq x \leq 250. \\ 0, & x > 250 \end{cases}$$

Известно, что вероятность попадания случайной величины в некоторый диапазон равна интегралу от плотности распределения по этому диапазону. Найдем вероятность того, что будет очищено менее 200 т сырья, т. е. от 180 до 200 т:  $P = \int_{180}^{200} \frac{1}{70} dx = 0,29$ .

Произвести оценку риска (вероятность несвоевременной очистки сырья).

12. Предприятие предполагает выпускать один из шести видов некоторых изделий (A, B, C, D, E, F). Спрос на изделия заранее точно не известен; поэтому невозможно заранее указать, какое изделие окажется более выгодным. Одновременный выпуск нескольких видов изделий невозможен. Требуется выбрать изделие, выпуск которого обеспечит получение средней прибыли не менее 4,5 млн ден. ед. в год при минимальном риске.

В задаче эффективность принятого решения (прибыль от производства изделия) зависит не только от самого решения (вид изделия), но и от внешних условий, т. е. от спроса на изделие. Отсутствуют сведения, на основе которых можно было бы спрогнозировать уровень спроса на изделия (такими сведениями могли бы быть, например, данные о спросе на аналогичные изделия в прошлом). Поэтому используется экспертный метод.

Задача решается следующим образом. Для каждого изделия находятся оценки эффективности и риска на основе экспертных оценок. Пусть эксперт указал две оценки возможной прибыли от каждого вида изделий (в млн ден. ед.): пессимистическую ( $E_{п}$ ) и оптимистическую ( $E_{о}$ ):  $E_{пA} = 2$ ,  $E_{пB} = 4$ ,  $E_{пC} = 3$ ,  $E_{пD} = 2$ ,  $E_{пE} = 2$ ,  $E_{пF} = 3$ ;  $E_{оA} = 8$ ,  $E_{оB} = 6$ ,  $E_{оC} = 8$ ,  $E_{оD} = 7$ ,  $E_{оE} = 9$ ,  $E_{оF} = 7$ . Здесь, например, эксперт считает, что производство изделия A в худшем случае (например, при низком спросе на это изделие) обеспечит прибыль около 2 млн ден. ед. В самом лучшем случае (при высоком спросе на изделие A) прибыль может составить 8 млн ден. ед. Так как эксперт указал для каждого решения две оценки, для определения ожидаемой эффективности используется формула  $E_{ож} = (3E_{п} + 2E_{о})/5$ . Например, для первого изделия ожидаемая эффективность находится следующим образом:  $E_{ожA} = (3 \cdot 2 + 2 \cdot 8)/5 = 4,4$  млн ден. ед. Для остальных изделий:  $E_{ожB} = 4,8$ ;  $E_{ожC} = 5$ ;  $E_{ожD} = 4$ ;  $E_{ожE} = 4,8$ ;  $E_{ожF} = 4,6$  млн ден. ед. На основе экспертных оценок находится оценка риска для каждого варианта решения. В качестве оценки риска будем использовать коэффициент вариации. Для этого сначала определим величины среднеквадратического отклонения по формуле  $\sigma = (E_{о} - E_{п})/5$ . Для данного примера  $\sigma_1 = (8 - 2)/5 = 1,2$  млн ден. ед.;  $\sigma_2 = 0,4$ ;  $\sigma_3 = 1$ ;  $\sigma_4 = 1$ ;  $\sigma_5 = 1,4$ ;  $\sigma_6 = 0,8$ . Используя величины среднеквадратического отклонения и ожидаемой эффективности, найдем коэффициенты вариации по формуле  $\varepsilon = \sigma/E_{ож}$ :  $\varepsilon_1 = 1,2/4,4 = 0,27$ ;  $\varepsilon_2 = 0,08$ ;  $\varepsilon_3 = 0,2$ ;  $\varepsilon_4 = 0,25$ ;  $\varepsilon_5 = 0,29$ ;  $\varepsilon_6 = 0,17$ . На основе полученных оценок эффективности и риска принимается решение. Какое оно?

13. Рассмотрите наличие «рискового» капитала, являющегося важным фактором в «здоровой» экономике, а также наличие современных источников энергии. Наличие денег для разведки и разработки альтернативных источников энергии зависит от экономической политики (понижение налогов на прибыль в случае успеха, низкие тарифные ставки на ссуду и др.). Такие меры могут привлечь дополнительный капитал для помещения в разработки нового вида энергии. В конечном счете интенсифицируется конкуренция на энергетическом рынке и снижаются цены на нефть. В свою очередь, низкие цены на нефть помогают снизить уровень инфляции, что способствует оздоровлению экономики. Сформулируйте задачу об использовании капитала на языке метода анализа иерархий в данной ситуации. Постройте дерево целей и определите критерии эффективности использования финансов.

14. В планировании деятельности строительной организации возможны два подхода. Первый исходит из общей целевой ориентации и характеризуется последовательностью: «Анализ состояния системы», «Оценка возможностей», «Определение цели». Второй подход имеет место при наличии конкретной цели с последовательностью процесса: «Определение цели», «Оценка возможностей», «Определение действий». Каким подходом следует пользоваться при стратегическом и тактическом планировании строительного бизнеса? Какую последовательность действий вы взяли бы при реконструкции технологического оборудования завода железобетонных изделий?

15. Производственные системы, в том числе и строительные, часто образуют специальный класс систем, характеризующихся определенными целями функционирования. Эти системы обладают способностью перестраиваться таким образом, чтобы сохранять свои функции. При этом среда изменяется сама и может помешать системе достигнуть ранее намеченных целей. Подобные системы называются гомеостатическими (имеется в виду независимость от изменений в окружающей среде). Управляющий параметр в них поддерживается в заданных пределах с помощью саморегулирования. Современные системы строительного бизнеса должны рассматриваться как сложные гомеостатические вероятностные системы. Возможные возмущения классифицируются следующим образом: непредвиденные изменения в окружающей производственной среде; изменения свойств компонентов производственной системы и характера взаимосвязей между ними; систематические возмущения от явлений, происходящих в окружающей среде; систематические ошибки в производственной системе; разовые воздействия в производственной среде, способные вызвать нарушения целостности системы; разовые возмущения в системе, приводящие к ее гибели. Для компенсации каждого из названных видов возмущений гомеостатические системы должны иметь специальные органы. Например, для компенсации случайных возмущений от производственной среды они должны использовать различные обратные связи. Для своевременного и адекватного восполнения или учета выявляющихся положительных или отрицательных отклонений наличия материальных и технических ресурсов от требуемого уровня надо располагать накопителями (складами) и резервными мощностями. Поскольку случайные отклонения, возникающие и во внешней среде и внутри системы, зачастую предопределены историей своего возникновения и развития, в гомеостатических системах имеются органы прогнозирования как внешней среды, так и системных параметров на основе ретроспективного анализа. Для компенсации случайных временных отклонений, возникающих в структурных компонентах, их параметрах и взаимосвязях, гомеостатические системы имеют органы, выполняющие действия по самовосстановлению системы. Эффективность этих действий также обеспечивается наличием в составе таких органов компонентов, которые осуществляют прогнозирование указанных тенденций. В случае отклонений, накапливающихся в результате длительных процессов нарастания или убывания нарушений, должны быть произведены глубокие изменения в организации и структуре системы, которые позволили бы ей адаптироваться и эффективно функционировать в изменившихся условиях. Такая необходимость усовершенствования системы обуславливает и необходимость блока адаптации, который должен обладать способностью к долгосрочному прогнозированию, что позволит предупреждать возникновение значительных фактических отклонений.

Разработайте функциональную модель строительной организации с применением CASE-технологий. Модель должна отражать цели и структуру с обратными связями, обеспечивающими устойчивое функционирование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После прочтения этой книги у читателя может сложиться впечатление некоторой ее незаконченности, возникнуть ощущение необходимости ее продолжения. Это действительно так. Как и сам процесс познания, так и методология системного анализа с ее многогранными связями с другими науками также развиваются во времени, как и наука в целом.

Системный анализ — это прежде всего научное исследование проблемы принятия решений с использованием формальной и неформальной логики. Важно заметить, что системные представления и методы принятия решений на основе системного подхода позволяют выявить лицу, принимающему решения, «слабость» системы в целом или отдельных ее сторон. Это, несомненно, является прогрессивным элементом. Системный аналитик помогает ЛПР разобраться в существующей проблеме, выявляя причины ее возникновения. При этом определяются, какая из сторон системы должна быть модифицирована, какие действия руководителя были неверными, что надо делать, чтобы не повторить ошибки, приведшей к проблеме.

Проблемы, являются ли они производственными или экономическими, не существуют изолированно. Они не могут быть выделены из целого, объяснены по отдельности, а затем интегрированы для объяснения целого, а среда, в которой возникают проблемы, также не является постоянной. Она меняется вместе со своими проблемами и их решениями. В результате совершенствования технологического процесса строительства изменяются отношения между элементами, поскольку на них заметно влияют события окружения.

Системный анализ возник из-за сложности проблем, решаемых в системах различной природы. Сложность, как совокупность большого числа различных объектов, действующих вместе, является основой концепции общей теории систем и системного анализа. Необходимы рациональные пути разрешения сложных проблем. Подход, предлагаемый методологией системного анализа, способствует творчеству и опыту при структурировании сложных проблем и воплощению решений в доступной и систематической форме.

Сложность — это взаимодействие и взаимозависимость, когда поведение одного или нескольких элементов воздействует на поведение других. Например, строительная экономика зависит от энергетики и строительных ресурсов, наличие энергоресурсов зависит от политики правительства, политика зависит от экономической стабильности. Эти взаимозависимости симметричны: политика зависит от экономики, однако экономика также зависит от политики. Поэтому модель, с помощью которой исследуется сложность системы, зависит от новых свойств, полученных в результате синергии взаимодействия взаимозависимых частей, когда эти свойства априорно не характерны для отдельных частей системы и характеризуют вновь образованные элементы.

Люди, которые решают, какие действия предпринимать для решения сложных проблем, и те лица, на которых воздействуют эти решения, обычно имеют различные интересы. В рамках этих двух групп или между ними может не быть консенсуса.

Строительная экономика представляет еще один пример сложности. Частые неудачи в прогнозировании флуктуации в экономике подтверждают, что сложность, свойственная социально-экономическому поведению, может превышать пределы наших интеллектуальных возможностей. Даже при использовании сложных экономических теорий и моделей мы обнаруживаем, что не можем справиться со сложной сетью взаимозависимостей. Мы сталкиваемся с трудностью предсказания краткосрочных, ежегодных или даже месячных состояний экономики. Долгосрочные прогнозы всего на несколько лет выливаются не более чем в обоснованные догадки. То, что в одном секторе экономики проявляется как симптом, в другом секторе проявляется как результат событий. Например, производительность в строительном бизнесе зависит от капиталовложений, которые, в свою очередь, зависят от процентных ставок, наличия кредита и налоговых обложений. Состояние экономики также зависит от мобильности трудовых ресурсов, которые, в свою очередь, зависят от множества местных и региональных вопросов, таких как возможности найма на работу, стоимость жизни и общие жизненные условия. Циркулярный характер экономики и ее субъективные, неосознанные элементы затрудняют определение точек вмешательства, которые предоставляет ее потенциал для получения желаемых эффектов. Мы пришли к пониманию того, что действия, предпринимаемые сейчас, по видимому, не приведут к немедленным результатам; полученные в конечном счете итоги могут быть результатом вмешательства множества сил, которые нелегко изолируемы или неясно понимаемы сегодня.

Обращение к этим проблемам требует подхода, который позволил бы нам использовать релевантную информацию различного вида, включая точные данные, количественную информацию и неточные, полученные

интуитивно, из опыта, с учетом ценностей суждений и образных догадок. Следовательно, мы могли бы распространить наш анализ, включая в него все возможные исходы, которые в другом случае могли бы быть незамеченными.

Обращаясь к методу анализа иерархий, отметим, что научные методы не всегда хорошо приспособляются к человеческим делам. В исследовании операций и науке об управлении разработано много моделей и методов, механически применяемых для решения проблемы сложности. Самые большие неудачи этих наук — в человеческой сфере обучения и адаптации, политике и разрешении конфликтов. Классическое решение проблемы означает, что решение проблемы существует заранее или — еще лучше — оно четко очерчено. В результате генерируются исходные данные для использования в модели прежде, чем реально возникнет сама проблема. Однако ни одна проблема не встречается точно в таком виде, как люди пытаются ее предвидеть и осознать. Это особенно ощущается при изучении конфликтов. Можно пытаться предотвратить конфликты, но когда они случаются, нужна другая процедура для их нейтрализации или остановки. В реальной ситуации проблемы решаются (если они вообще могут быть решены), когда они случаются, и чем дольше развивается процесс, тем настоятельнее требуются корректирующие воздействия. В этом случае полученная информация о реакции системы имеет большую ценность, и может потребоваться повторение воздействия с лучшим пониманием новой информации.

Всегда имеются сложные проблемы, решение которых слишком дорого или практически невозможно. Для таких проблем дешевле и проще перестроить систему, в которой они появляются. Для этого требуются, конечно, значительные вложения интеллектуальных и материальных ресурсов, а также политическая способность убедить людей принять сделанные изменения.

Системный подход был бы несколько лучше приспособлен для решения проблем, будь он лучше развит для совместного применения дедуктивного и индуктивного методов: первого — для понимания того, что вероятнее всего будет иметь место, а второго — для управления ситуациями таким образом, чтобы наиболее вероятный исход мог быть направлен в желаемую сторону.

Математическое моделирование как основа методологии системного анализа опирается на исследование операций — уже сложившуюся формальную науку — внедряется в процесс управления через неформальные процедуры, определяющие цели и критерии их достижения. Здесь, несомненно, играет большую роль эвристический момент. Экспертные решения в системном анализе принимаются, как правило, коллективом. Поэто-

---

му системный аналитик должен уметь использовать знания и методы, которыми сам он не владеет. Ему невозможно знать все и обо всем. В такой ситуации он не исполнитель, а организатор решения проблемы, четко представляющий цель и методологию ее достижения.

Системный анализ в своем развитии предполагает расширение своих возможностей посредством применения компьютерных технологий. Используемый в настоящем учебном пособии пакет программ по дискретному моделированию и методу анализа иерархий также будет совершенствоваться и не только автором. Основной целью станет более тесная связь пакета с конкретными приложениями. Компьютер должен более четко отвечать требованиям исследователя при решении неформализуемых задач.

Данное пособие дает основы системного анализа в кратком изложении с уклоном в сторону строительного бизнеса. Автор считает, что у каждого студента должна быть выработана определенная системная методология, системное мировоззрение. При этом неважно, на каком факультете он учится. Несмотря на отсутствие единого, универсального алгоритма системного анализа, изложенные в пособии методы математического моделирования, анализ и синтез, а также методики многокритериального выбора, помогут будущему специалисту в освоении предметной области.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Перегудов, Ф. И.* Введение в системный анализ : учеб. пособие для вузов / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. — М. : Высш. шк., 1989. — 367 с.
2. *Саати, Т.* Аналитическое планирование / Т. Саати, К. Кернс. — М. : Радио и связь, 1991. — 224 с.
3. *Губанов, В. А.* Введение в системный анализ : учеб. пособие / В. А. Губанов, В. В. Захаров, А. Н. Коваленко. — Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. — 232 с.
4. *Салугин, А. Н.* Введение в системный анализ. Компьютерные основы принятия решений : учеб. пособие. — Волгоград, 2002. — 107 с.
5. *Филлипс, Д.* Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. — М. : Мир, 1984. — 496 с.
6. *Месарович, М.* Общая теория систем / М. Месарович, И. Такахара. — М., 1978.
7. *Поваров, Г. Н.* Ампер и кибернетика. — М. : Советское радио, 1977. — 96 с.
8. *Винер, Н.* Кибернетика. — М. : Советское радио, 1968. — 326 с.
9. *Черемных, С. В.* Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии : практикум. — М. : Финансы и статистика, 2005. — 192 с.
10. *Дубейковский, В. И.* Функциональное моделирование с использованием продукта AllFusion Process Modeler 4.1.4. 2006 г. // Технический консультант. Отдел внедрения и консалтинга. Компания Интерфейс. URL: [www.interface.ru](http://www.interface.ru) (дата обращения : октябрь 2012 г.).
11. *Дубейковский, В. И.* Эффективное моделирование с AllFusion Process Modeler 4.1.4 и AllFusion PM. — М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2007. — 384 с.
12. *Дэвид, А.* Марка и Клемент макгоуэн. Методология структурного анализа и проектирования. — М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.
13. *Дегтярёв, Ю. Н.* Исследование операций. — М. : Высш. шк., 1986.
14. *Добровольский, Г. В.* Тихий кризис планеты // Вестник Российской академии наук. 1997. Т. 67. № 4. С. 313—320.
15. *Петросян, П. А.* Введение в математическую экологию / П. А. Петросян, В. В. Захаров. — Л., 1986.
16. *Бусленко, Н. П.* Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. — М., 1977.
17. *Моисеев, Н. Н.* Математические задачи системного анализа. — М. : Наука, 1981. — 487 с.
18. *Кудрявцев, Е. М.* Microsoft Project. Методы сетевого планирования и управления проектом. — М. : ДМК Пресс, 2005. — 240 с.

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЕТЕВЫХ ЗАДАЧ

### П.1.1. Структура системы

В данном приложении для обучения системному анализу приведены несколько программ по разделам «Сетевое моделирование», «Метод анализа иерархий» и «Экспертная система». В режиме диалога, без особых навыков программирования студент решает поставленные перед ним задачи с применением нужных алгоритмов. Методические указания по лабораторному практикуму сопровождают изучение дисциплины в реальном времени при выполнении лабораторных работ. Здесь студенту представляется возможность применить готовые программы для принятия решений в строительном менеджменте, технологии производства и экономики, маркетинга, а также иных сферах деятельности специалиста-строителя.

Лицо, принимающее решение в оптимальном использовании ресурсов (финансы, строительные материалы, время, рабочая сила и т. д.), пользуется процедурой, имеющей формальные и неформальные аспекты. В электронном практикуме демонстрируются формальные алгоритмы оптимизации дискретной математики (сетевая оптимизация на графах), а также некоторые неформальные приемы индивидуального и коллективного принятия решений: метод анализа иерархий и метод Дельфи.

На рис. П.1.1 показан экран раздела, посвященного выполнению лабораторного практикума. В основном здесь представлены алгоритмы оптимизации. Приведем примеры реализации формальных задач с использованием алгоритмов на графах. В теоретической части (лекционный курс) алгоритмы были подробно описаны с примерами решения вручную. В лабораторном практикуме задачи решаются с помощью ЭВМ. После получения задания студент формализует поставленную проблему и переходит к решению с помощью алгоритма, заложенного в программе. Результаты анализируются и делаются выводы.

Рассмотрим несколько примеров использования этих программ.

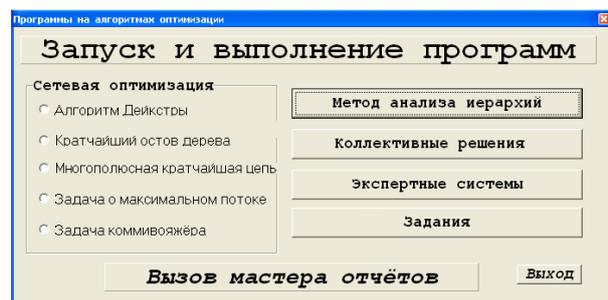


Рис. П.1.1. Главное окно практикума сетевой оптимизации

### П.1.2. Алгоритм о кратчайшем пути

Решается задача с использованием алгоритма Дейкстры. Задача формулируется так: «Дана сеть коммуникаций в виде дорог (рис. П.1.2) в системе доставки продукции цементного завода на строительные предприятия некоторого региона. Требуется определить кратчайший путь на орграфе от завода (вершина 1) до стройки (вершина 9) и отметить пункты, попадающие на маршруте».

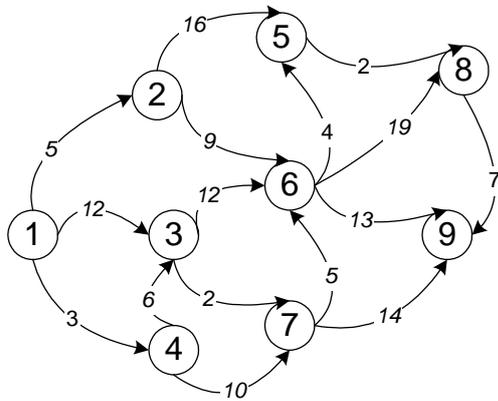


Рис. П.1.2. Сеть дорог, ведущих от цементного завода, расположенного в первой вершине, до одного из потребителей — 9-я вершина

Составим матрицу расстояний для данной сети и введем ее как массив сразу же в память компьютера (рис. П.1.3), предусмотрев то обстоятельство, что если связь с соседней вершиной отсутствует, то ставится «∞». В матрице это означает просто большое число. В нашем случае — 999.

Программы на алгоритмах оптимизации

Файл Help

Алгоритм Дейкстры

Число узлов:

Заполните матрицу расстояний

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	999.0	5.00	12.00	3.00	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0					
2	5.00	999.0	999.0	999.0	16.00	9.00	999.0	999.0	999.0						
3	12.00	999.0	999.0	6.00	999.0	12.00	2.00	999.0	999.0						
4	3.00	999.0	6.00	999.0	999.0	999.0	10.00	999.0	999.0						
5	999.0	16.00	999.0	999.0	999.0	4.00	999.0	2.00	999.0						
6	999.0	9.00	12.00	999.0	4.00	999.0	5.00	19.00	13.00						
7	999.0	999.0	2.00	10.00	999.0	5.00	999.0	999.0	14.00						
8	999.0	999.0	999.0	999.0	2.00	19.00	999.0	999.0	7.00						
9	999.0	999.0	999.0	999.0	999.0	13.00	14.00	7.00	999.0						
10															
11															
12															
13															
14															
15															

Параметры критического пути

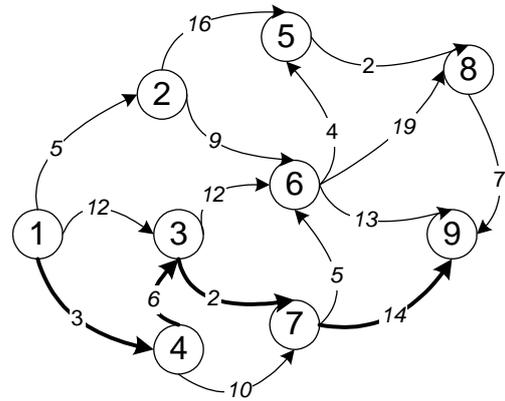
- 2-->6 на расстоянии 9
- 6-->5 на расстоянии 4
- Критический путь от 1 до 6 узла = 14
- 1-->2 на расстоянии 5
- 2-->6 на расстоянии 9
- Критический путь от 1 до 7 узла = 11
- 1-->4 на расстоянии 3
- 4-->3 на расстоянии 6
- 3-->7 на расстоянии 2
- Критический путь от 1 до 8 узла = 20
- 1-->2 на расстоянии 5
- 2-->6 на расстоянии 9
- 6-->5 на расстоянии 4
- 5-->8 на расстоянии 2
- Критический путь от 1 до 9 узла = 25
- 1-->4 на расстоянии 3
- 4-->3 на расстоянии 6
- 3-->7 на расстоянии 2
- 7-->9 на расстоянии 14

Рис. П.1.3. Матрица расстояний (слева) и решение задачи о кратчайшем пути по алгоритму Дейкстры

На самом деле этот алгоритм позволяет большее. С его помощью, например, можно определять кратчайшие маршруты до всех достижимых вершин, начиная со второй и заканчивая последней.

Ответом будет кратчайший путь от 1-й вершины до 9-й по маршруту: 1—4—3—7—9, стоимость которого 25 ед. (рис. П.1.4).

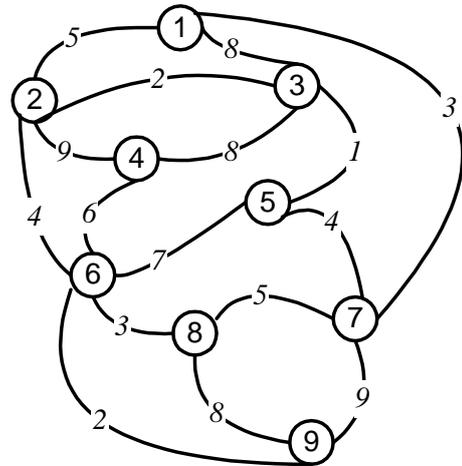
Рис. П.1.4. Кратчайший путь от первой до последней вершины



### П.1.3. Кратчайший остов дерева

Задача о кратчайшем остове дерева встречается там, где требуется соединить все вершины графа дугами, образовав при этом связный граф и чтобы в нем не было циклов. Второе требование: суммарная стоимость дуг полученного дерева должна быть минимальной. По-другому эта задача называется задачей о минимальном покрытии и встречается в более широком круге задач. Пусть исходный неориентированный граф имеет вид как на рис. П.1.5.

Рис. П.1.5. Граф, для которого нужно найти кратчайшее остовое дерево



Выберем из меню сетевой оптимизации программу кратчайшего остова и заполним матрицу смежности, предварительно указав число узлов (рис. П.1.6). Из рис. П.1.6 видно, что матрица смежности имеет нулевые элементы в местах, где прямые связи отсутствуют.

Вид окна интерфейса после решения представлен на рис. П.1.7. Таким образом, алгоритм «отбросил» ненужные дуги, оставив образующие покрытие в виде кратчайшего остова дерева. В литературе встречаются указания о так называемом проклятии размерности, когда подобные задачи не решаются простым перебором из-за большого числа возможных покрытий. Задача с ростом числа вершин получается настолько сложной, что становится непосильной современным компьютерам. Поэтому сетевые алгоритмы оптимизации имеют огромное значение для выхода из подобных ситуаций.

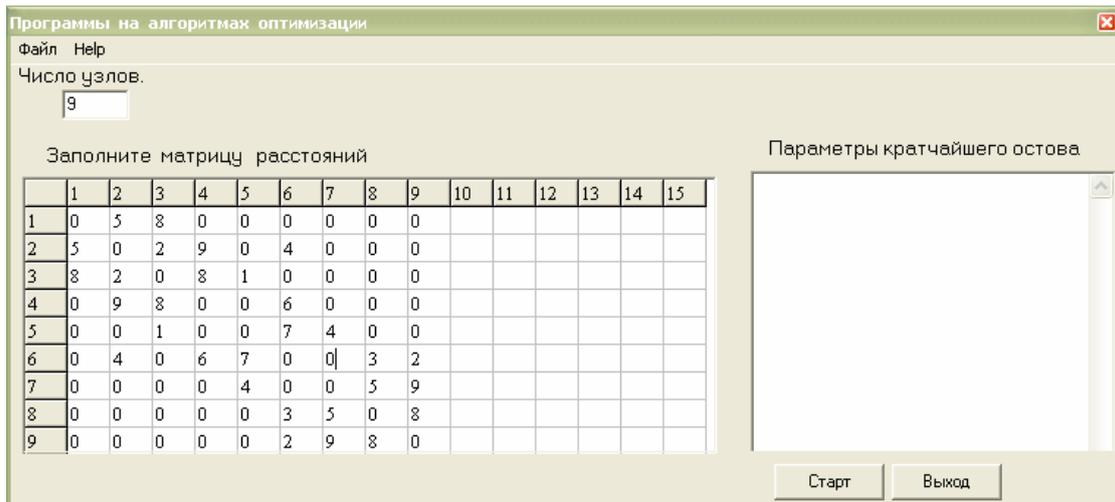


Рис. П.1.6. Заполненная матрица смежности в окне программы

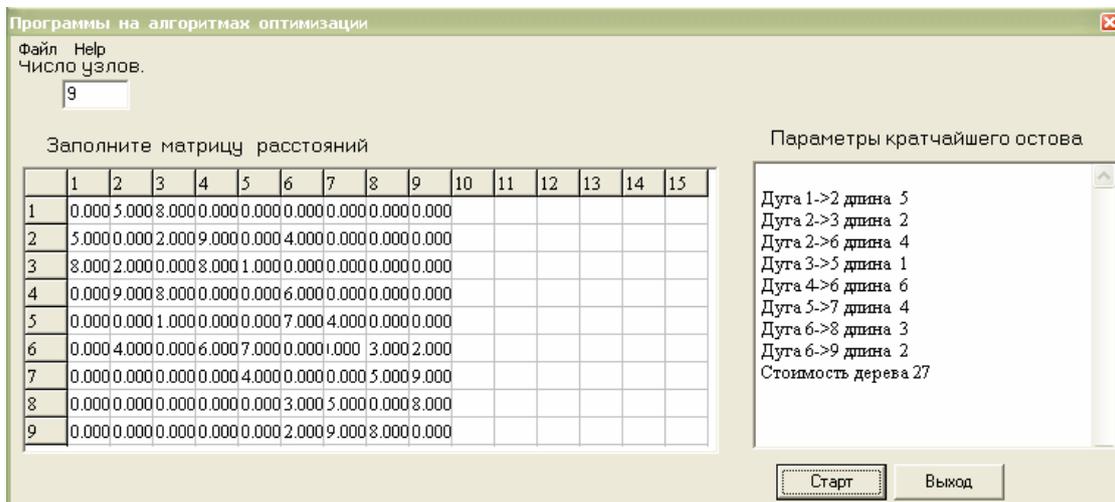


Рис. П.1.7. Множество дуг, образующих кратчайшее покрытие (справа)

На рис. П.1.8 показано полученное кратчайшее остовое дерево для нашего случая. Минимальная стоимость составила 27 ед.

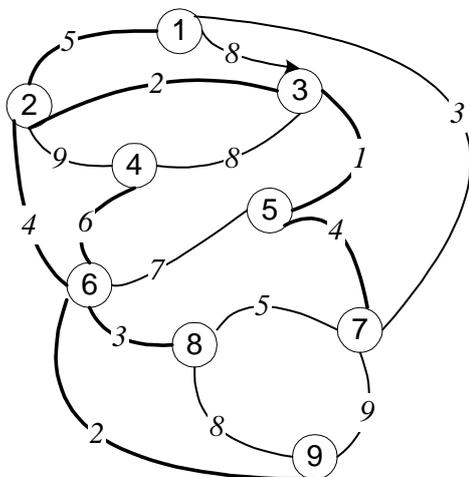


Рис. П.1.8. Результат алгоритма кратчайшего остова

### П.1.4. Многополюсная кратчайшая цепь

Для неориентированного графа кратчайшей цепью между двумя произвольными вершинами называется цепь с минимальной стоимостью. Задача аналогична задаче о кратчайшем пути с тем отличием, что здесь решается задача о кратчайших путях между всеми парами узлов. Впервые эта задача была решена Флойдом<sup>6</sup>. Пусть  $N = \{1...n\}$  — множество узлов,  $c_{ij}$  — длина дуги,  $d_{ik}$  — длина кратчайшей цепи из узла  $i$  в узел  $k$ . Алгоритм Флойда работает следующим образом. Первоначально за длину кратчайшей цепи между двумя произвольными узлами  $i$  и  $k$  принимается длина дуги  $(i,k)$ , соединяющей эти узлы. Затем последовательно проверяются всевозможные промежуточные узлы, расположенные между  $i$  и  $k$ . Если длина цепи, проходящей через некоторый промежуточный узел, меньше текущего значения  $d_{ik}$ , то переменной  $d_{ik}$  приписывается новое значение. Данная процедура повторяется для всех пар узлов пока не будут получены все значения  $d_{ik}$ . В алгоритме строятся две матрицы для преобразования графа: матрица длин кратчайших расстояний и матрица маршрутов. Матрица расстояний содержит текущие оценки длин кратчайших цепей, а матрица маршрутов служит для нахождения промежуточных узлов кратчайших цепей. Реализуем данный алгоритм для графа, изображенного на рис. П.1.9.

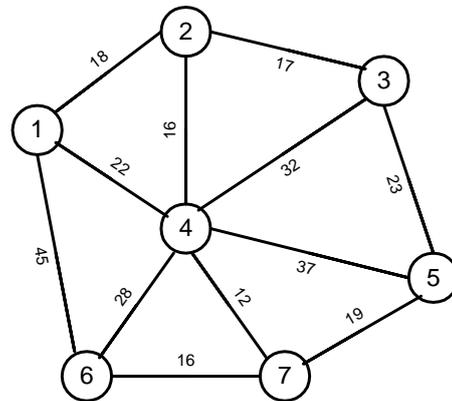


Рис. П.1.9. Исходный граф для многополюсной кратчайшей цепи

На рис. П.1.10 и П.1.11 приведены исходные данные моделирования и результаты работы алгоритма. Следует отметить, что так же как и в алгоритме Дейкстры начальная информация об отсутствии смежных дуг обозначается как бесконечность, а в матрице это большое число — 999 (см. рис. П.1.9). Матрица начал и концов заполняется после старта и является результатом реализации алгоритма. На рис. П.1.11 справа показана схема продвижения по кратчайшему маршруту от 1-й вершины к 7-й. От 1-й вершины мы продвигаемся вниз, пытаюсь достичь 7-ю вершину, и у нас ничего не получается, так как напротив нее стоит вершина под номером четыре. Возвращаемся к 4-й вверх и снова движемся к 7-й. На этот раз успешно. Таким образом, кратчайший путь от 1-й вершины к 7-й лежит через 4-ю. Для остальных вершин то же самое. Отметим оригинальность схемы начал и концов маршрутов. В одной матрице собраны результаты значительного размера. Это нетрудно увидеть. Только число паросочетаний вершин, для которых ищется кратчайший путь, равняется  $n^2$  ( $n$  — число вершин графа). Внутри пар содержится последовательность вершин и дуг, явно не обозначенная в матрице начал и концов, но получающаяся с помощью указанной процедуры.

<sup>6</sup> Алгоритм Флойда — Уоршелла — динамический алгоритм для нахождения кратчайших расстояний между всеми вершинами взвешенного ориентированного графа. Разработан в 1962 г. Робертом Флойдом и Стивеном Уоршеллом.

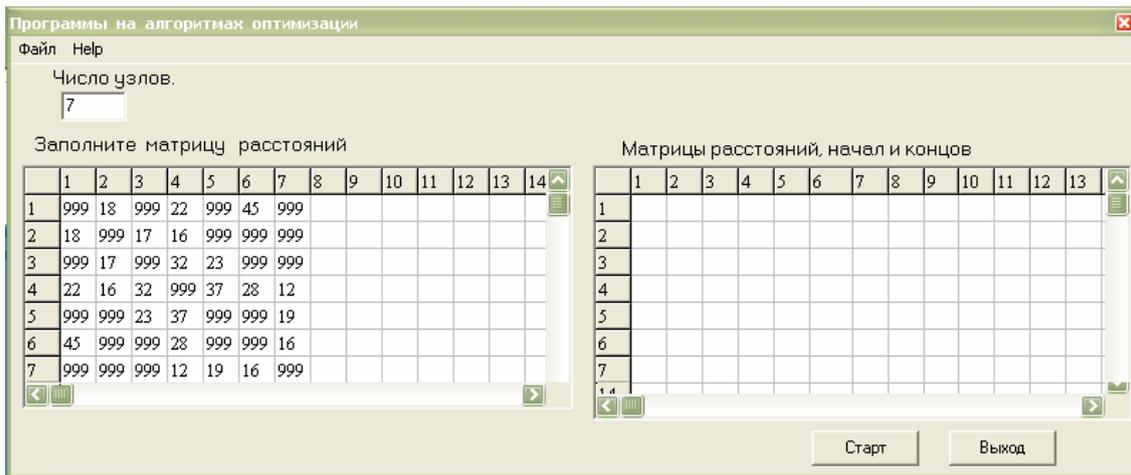


Рис. П.1.10. Подготовка данных для решения задачи о многополюсной кратчайшей цепи

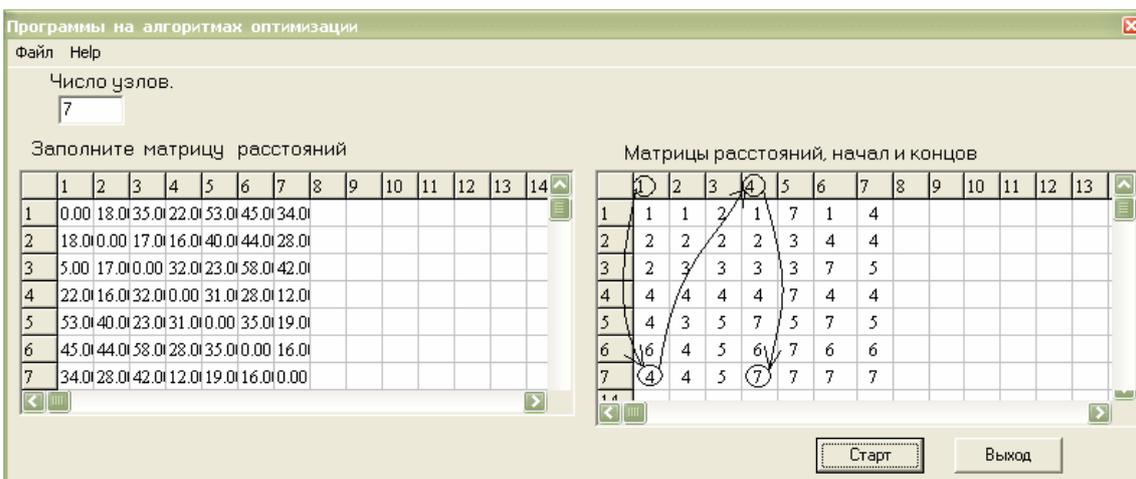


Рис. П.1.11. Результат работы алгоритма: слева появилась новая матрица, показывающая кратчайшие расстояния; справа — матрица маршрутов

### П.1.5. Задача о максимальном потоке

Максимальный поток здесь означает тот максимально возможный поток по ориентированной сети, который возможен с учетом того, что пропускные способности дуг графа, моделирующего эту сеть, ограничены.

Пусть  $G = (N, A)$  — ориентированный граф с одним источником ( $s$ ) и одним стоком ( $t$ ). Пусть дуги  $(i, j)$  имеют ограниченную пропускную способность. Задача о максимальном потоке заключается в поиске таких потоков по дугам, чтобы результирующий из  $s$  в  $t$  был максимальным. Алгоритм начинает работу с некоторого допустимого решения. Затем выполняется процедура расстановки пометок, с помощью которой определяется другой допустимый поток большей величины по пути, который будем называть аугментальным путем. В пометку узла входит следующая информация: если  $q_i$  единиц потока посылается из узла  $i$  в узел  $j$  и вызывает увеличение потока по этой дуге, то будем говорить, что узел  $j$  помечается из узла  $i$  символом « $+q_j$ » и ему приписывается пометка:  $[+q_j, i]$ , если будет уменьшение, то  $[-q_j, i]$ . Текущий поток из узла  $i$  в  $j$  увеличивается, когда  $q_j$  единиц дополнительного потока посылается в узел  $j$  по ориентированной дуге  $(i, j)$  в направлении, совпадающем с ее ориентацией (прямая дуга). Если

узел  $j$  помечается из узла  $i$  и дуга  $(i, j)$  прямая, то поток по данной дуге увеличивается и величина, соответствующая оставшейся неиспользованной пропускной способности дуги, должна быть скорректирована. Данную величину обычно называют остаточной пропускной способностью дуги.

Алгоритм расстановки пометок работает следующим образом. Вначале источнику приписывается пометка  $[\infty, k]$ , т. е. из узла вытекает бесконечно большой поток  $= \infty$ . Затем мы ищем аугментальный путь от источника к стоку, проходящий через помеченные узлы. Все узлы в начальный момент, кроме истока, не помечены. Пытаясь достичь стока, мы проходим по прямым и обратным дугам и последовательно помечаем принадлежащие им узлы. Возможны два случая.

1. Стоку  $t$  приписывается пометка  $[+q_t, k]$ . В этом случае аугментальный путь потока найден и поток по каждой дуге на этом пути может быть увеличен или уменьшен на величину  $q_t$ . После изменения дуговых потоков текущие пометки стираются и процедура повторяется заново.

2. Сток  $t$  не может быть помечен. Это означает, что аугментальный путь не может быть найден. Следовательно, построенные дуговые потоки образуют оптимальное решение. (Более подробное описание можно найти в [5]).

Задача о максимальном потоке, сформулированная на рис. П.1.12, решена с помощью алгоритма сетевой оптимизации (рис. П.1.13 и П.1.14).

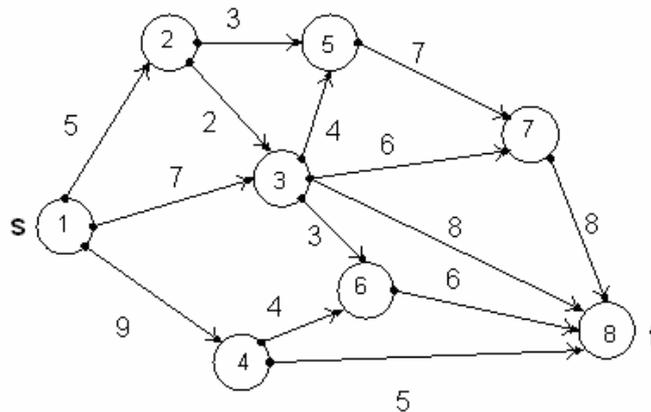


Рис. П.1.12. Ориентированный граф для задачи о максимальном потоке

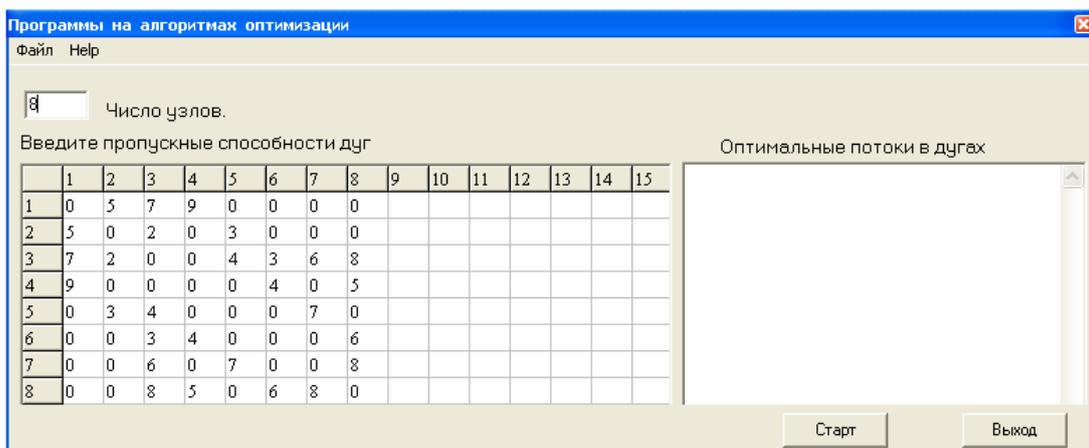


Рис. П.1.13. Подготовка данных для решения задачи о максимальном потоке

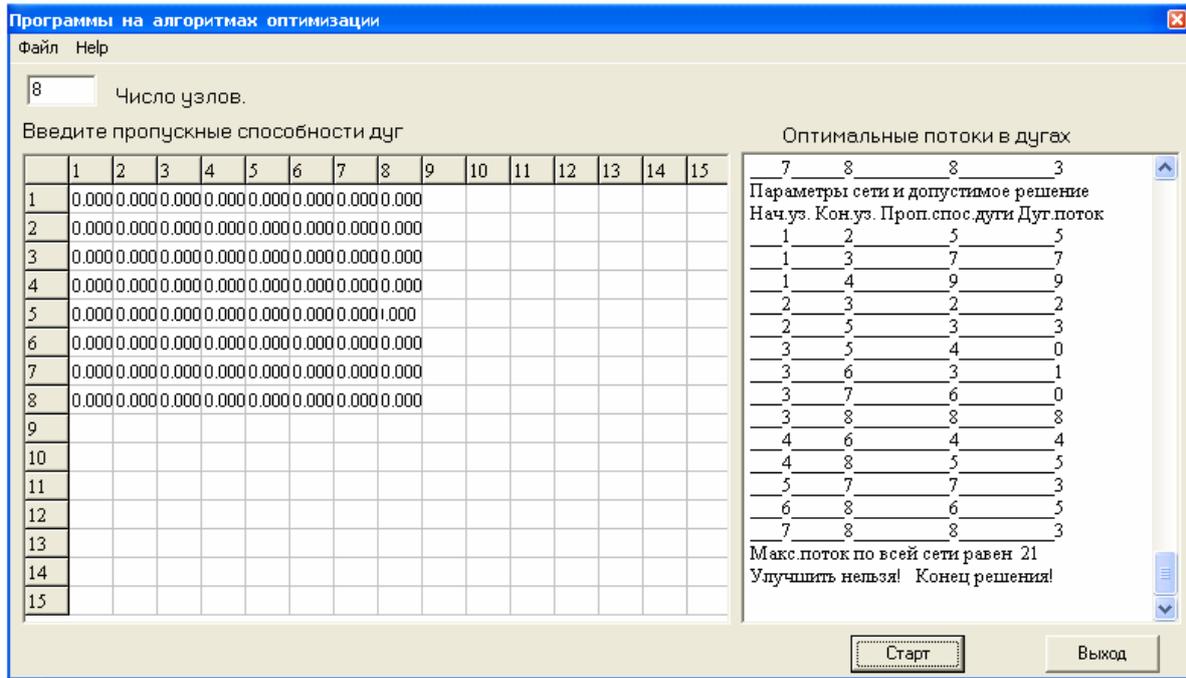


Рис. П.1.14. Результаты расчетов алгоритма: справа приведены потоки в дугах, обеспечивающих максимальное значение суммарного потока на выходе сети

### П.1.6. Задача коммивояжера

Формулировка задачи: коммивояжер должен выехать из заданного города, побывать в каждом из остальных  $(n - 1)$  городов ровно один раз и вернуться в исходный город. Задача заключается в определении последовательности объезда городов, когда коммивояжер проезжает наименьшее расстояние. Вместо длины пути можно рассматривать другие критерии, такие как стоимость, время и т. д. Можно показать, что всего существует  $(n - 1)!$  возможных маршрута.

Рассмотрим алгоритмы ветвей и границ. Вначале определяется некоторое допустимое решение, после чего множество всех оставшихся маршрутов разбивается на все более мелкие подмножества с вычислением нижней границы (минимум стоимости маршрута). Так вычисляются все маршруты с определением их нижних границ и отбрасываются маршруты, превышающие по стоимости текущую нижнюю границу. Отказ от маршрутов осуществляется методом ветвления, основанном на сравнении нижних границ. Если на некоторой итерации алгоритма нижняя граница алгоритма маршрутов из одного подмножества превосходит нижнюю границу другого подмножества, то первое подмножество можно исключить, т. е. ветвление из соответствующего узла не производится. Мы не будем далее конкретизировать работу алгоритма, не в этом наша задача, за нас это сделает уже готовая программа. Однако основную идею метода вы должны представлять. Кроме задачи коммивояжера, метод ветвей применяется во многих прикладных задачах, связанных с составлением расписаний.

Рассмотрим конкретный пример. На рис. П.1.9 представлены пункты назначения, которые должен объехать коммивояжер, с расстояниями, указанными на дугах графа. На рис. П.1.15 и П.1.16 демонстрируется компьютерная реализация алгоритма.

Рассмотренные в прил. 1 примеры — демонстрационные и имеют исходные данные массивов с размерностью меньше 15 элементов. Это означает, что в случае, когда необходимо работать с числовыми массивами мощностью больше чем 15, то задачу следует

редуцировать, если это возможно, или просто перейти к меньшей размерности с помощью конденсации. При работе с большими числами исходные данные нормализуют: для этого найти наибольший элемент массива и разделить на него все остальные (нормировка на единицу).

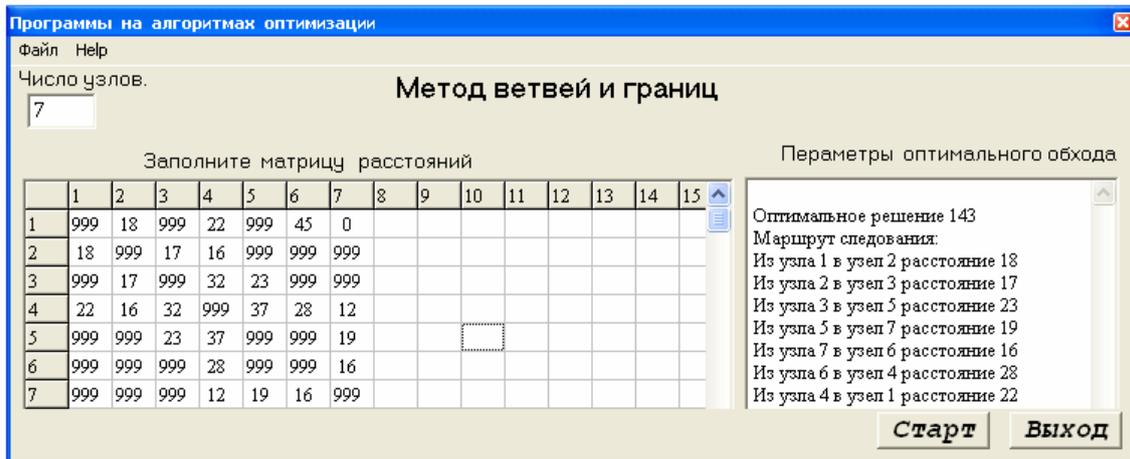


Рис. П.1.15. Подготовка данных и результаты работы алгоритма для решения задачи коммивояжера

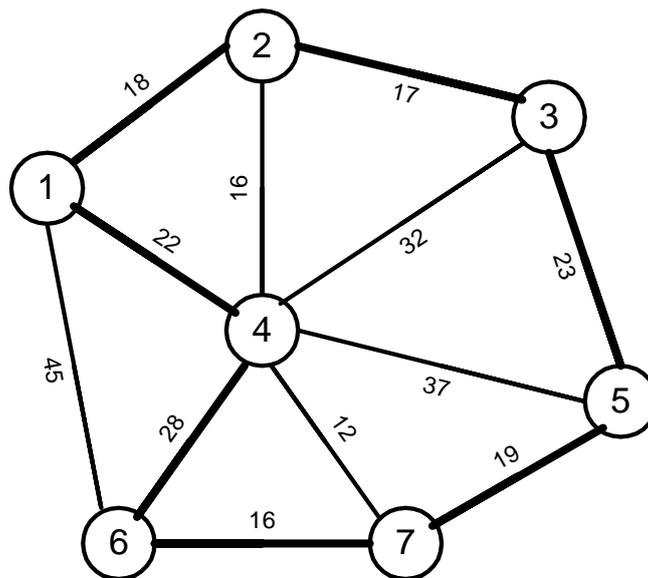


Рис. П.1.16. Кратчайший маршрут коммивояжера для рис. П.1.9

## **СРЕДСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

### **П.2.1. Методика работы с BPWin**

BPWin — CASE-средство верхнего уровня, поддерживающее методологии IDEF0 (функциональная модель), IDEF3 (WorkFlow Diagram) и DFD (DataFlow Diagram).

Основу методологии IDEF0 составляет графический язык описания бизнес-процессов. Модель в нотации IDEF0 представляет собой совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм. Вершина этой древовидной структуры, представляющая собой самое общее описание системы и ее взаимодействия с внешней средой, называется контекстной диаграммой. После описания системы в целом проводится разбиение ее на крупные фрагменты. Этот процесс называется функциональной декомпозицией, а диаграммы, которые описывают каждый фрагмент и взаимодействие фрагментов, называются диаграммами декомпозиции. После декомпозиции контекстной диаграммы проводится декомпозиция каждого большого фрагмента системы на более мелкие и так далее до достижения нужного уровня подробности описания. Синтаксис описания системы в целом и каждого ее фрагмента одинаков во всей модели. Работы (Activity), которые означают некие поименованные процессы, функции или задачи, изображаются в виде прямоугольников. Именем работы должен быть глагол или глагольная форма. Взаимодействие работ с внешним миром и между собой описывается в виде стрелок. Стрелки представляют собой некую информацию и именуется существительными. В IDEF0 различают пять типов стрелок:

1. Вход (Input) — материал или информация, которая используется или преобразовывается работой.

2. Управление (Control) — правила, стратегии, процедуры или стандарты, которыми руководствуется работа. Каждая работа должна иметь хотя бы одну стрелку управления.

3. Выход (Output) — материал или информация, которая производится работой. Каждая работа должна иметь хотя бы одну стрелку выхода.

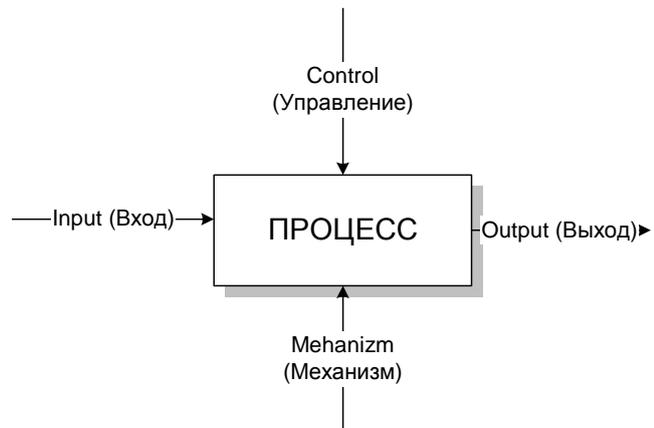
4. Механизм (Mechanism) — ресурсы, которые выполняют работу, например, персонал предприятия, станки, механизмы и т. д.

5. Вызов — специальная стрелка, указывающая на другую модель работы.

Каждый тип стрелок подходит или выходит к определенной стороне прямоугольника, изображающего работу. К левой стороне подходят стрелки входов, к верхней — стрелки управления, к нижней — механизмов реализации выполняемой функции, а из

правой выходят стрелки выходов (рис. П.2.1.) Такое соглашение предполагает, что, используя управляющую информацию и реализующий ее механизм, функция преобразует свои входы в соответствующие выходы.

Рис. П.2.1. Взаимодействие процесса с внешним миром



Общие принципы построения модели в методологиях DFD и IDEF3 сходны с IDEF0: модель также представляет собой совокупность иерархически зависимых диаграмм, прямоугольники изображают работы или процессы, стрелки — это тоже некоторые данные. Построение модели осуществляется сверху вниз путем проведения декомпозиции крупных работ на мелкие.

Диаграммы потоков данных (Data flow diagramming, DFD) используются для описания документооборота и обработки информации. Их можно использовать как дополнение к модели IDEF0 при более наглядном отображении текущих операций и документооборота в корпоративных строительных структурах. Прямоугольники DFD описывают функции обработки информации (работы), документы (стрелки, arrow), объекты, сотрудников или отделы, которые участвуют в обработке информации (внешние ссылки), и таблицы для хранения документов (хранилище данных, data store). В отличие от IDEF0, для стрелок нет понятия «вход», «выход», «управление» или «механизм» и неважно, в какую грань работы входит или из какой грани выходят эти стрелки.

При создании новой модели (меню «File | New») выводится диалоговое окно, в котором программа предлагает ввести наименование модели, нотацию для отображения контекстной диаграммы. После ввода имени и выбора нотации автоматически создается контекстная диаграмма с единственной работой, изображающей систему в целом. Для внесения имени работы следует щелкнуть по работе правой кнопкой мыши, выбрать в меню «File | New» и в появившемся диалоге внести имя работы (рис. П.2.2).

Для описания свойств контекстной диаграммы и свойств модели служит диалог «Model Properties Editor» (вызывается из меню «Model | ModelProperties») (рис. П.2.3). В этом диалоге представлены несколько закладок: «General», «Purpose», «Definition», «Source», «Status», «Presentation», «Display», «Layout», «ABC Units».

Закладка «General» предназначена для определения основных свойств модели. В ней представлены поля для ввода информации о наименовании модели, проекта, в который входит модель, имени и инициалов автора модели, а также тип модели: AS IS, которая показывает систему в ее текущем состоянии, или TO BE, которая показывает, как система будет работать в будущем. Также с помощью опции выбора «Apply CRUD/IRUN restrictions» можно включить или выключить ограничения, накладываемые на присвоение данных стрелкам механизмов и вызовов.

Закладка «Purpose» предназначена для ввода информации о назначении модели. На ней представлены два поля ввода информации: Purpose — для ввода информации о цели модели, объяснение того, почему система находится под анализом, что показывает модель и что пользователь может делать с моделью; Viewpoint — для ввода сведений об источнике информации, о системе.

Закладка «Definition» содержит два поля ввода — Definition и Scope, которые предназначены, соответственно, для описания модели и ввода информации об уровне и детальности модели.

Закладка «Source» предназначена для ввода информации об источнике данных, где указывается имя, должность или документ, в котором содержится информация для описания модели.

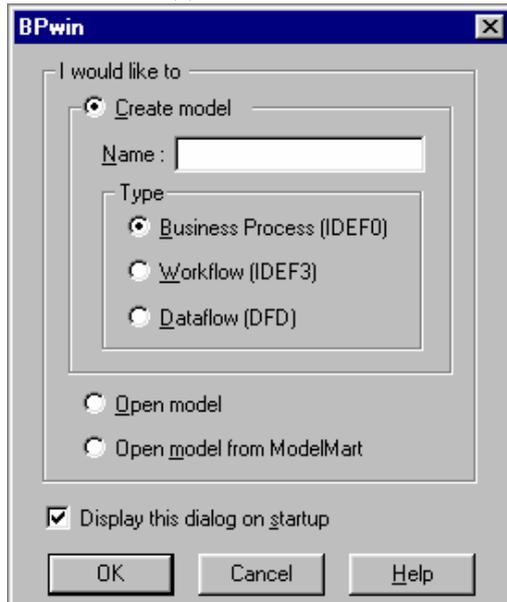


Рис. П.2.2. Диалог начала создания функциональной модели

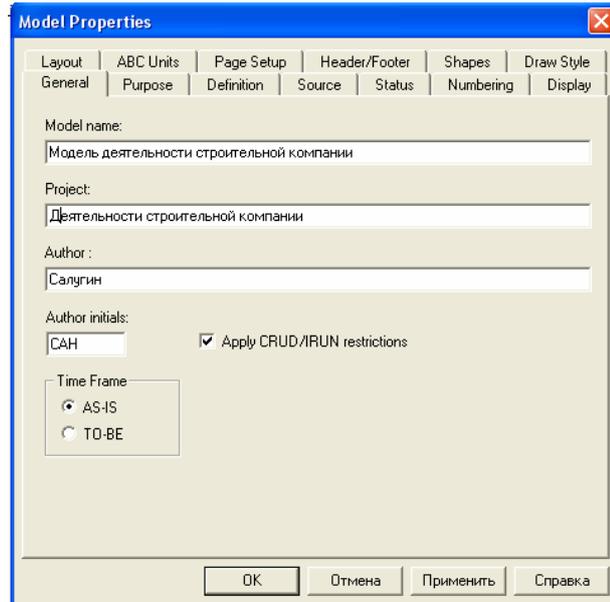


Рис. П.2.3. Окно свойств модели

Стрелки на контекстной диаграмме служат для описания взаимодействия строительной организации с внешней средой. Они могут начинаться у границы диаграммы и заканчиваться у работы, или наоборот. Такие стрелки называются граничными. Для внесения граничной стрелки входа на контекстной диаграмме необходимо:

- 1) нажать на символ стрелки в палитре инструментов;
- 2) перенести курсор к левой стороне экрана, пока не появится начальная штриховая полоска;
- 3) нажать один раз на полоску (откуда выходит стрелка) и еще раз на левую часть работы со стороны входа (где заканчивается стрелка);
- 4) вернуться в палитру инструментов и выбрать опцию редактирования стрелки;
- 5) дважды нажать на линию стрелки, в всплывающем меню выбрать «Name Editor» и добавить имя стрелки (рис. П.2.4.).

После создания контекстной диаграммы можно приступить к декомпозиции (рис. П.2.5). Для этого необходимо выбрать работу и нажать кнопку перехода на нижний уровень ▾. Появится диалог «Activity Box Count» (см. рис. П.2.5), в котором задается количество работ декомпозиции (в дальнейшем можно будет добавить недостающие работы или удалить лишние) и нотацию диаграммы. BPWin позволяет создавать смешанные модели, когда в рамках одной модели могут сосуществовать и быть связанными

модели IDEF0, DFD и IDEF3. Такой подход позволяет описать интересующие нас аспекты с различных сторон. Для обеспечения наглядности и лучшего понимания моделируемых процессов рекомендуется использовать от трех до шести блоков на одной диаграмме.

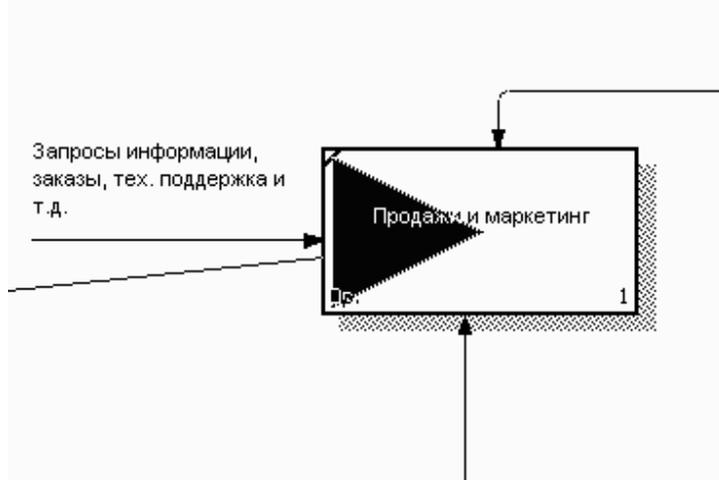


Рис. П.2.4. Создание граничных стрелок. Начало стрелки от бордюра диаграммы, конец — при появлении треугольника на блоке работы

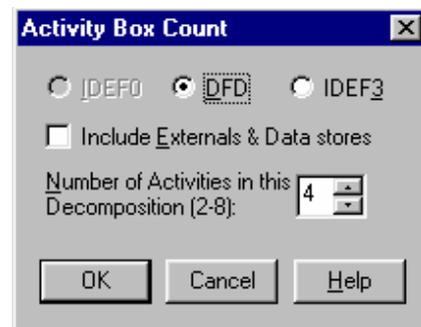


Рис. П. 2.5. Декомпозиция верхнего уровня на 4 DFD нижнего уровня

При включении ОК появляется диаграмма декомпозиции. Работы располагаются в порядке доминирования (по степени важности или в порядке очередности выполнения), начиная с левого верхнего угла и кончая нижним правым углом, что значительно облегчает в дальнейшем чтение диаграммы. Стрелки, которые были внесены на контекстной диаграмме (вышележащий уровень), отображаются и на диаграмме декомпозиции (миграция стрелок), но при этом не касаются работ. Такие стрелки называются несвязанными и воспринимаются, как синтаксическая ошибка. Для связывания стрелки необходимо перейти в режим редактирования стрелок, выбрать стрелку и соответствующий сегмент работы. Для связи работ между собой используются внутренние стрелки, т. е. стрелки, которые не касаются границы диаграммы, начинаются у одной и заканчиваются у другой работы. Для рисования внутренней стрелки необходимо в режиме рисования стрелок выбрать сегмент (например, выхода) одной работы, затем сегмент (например, входа) другой. Вновь внесенные граничные стрелки на диаграмме декомпозиции нижнего уровня изображаются в квадратных скобках и автоматически не появляются на диаграмме верхнего уровня.

Инструментом такого перемещения является туннелирование стрелок. При образовании граничной стрелки на любой диаграмме на внешнем окончании стрелки формируется символ в виде квадратных скобок. Этот символ напоминает, что стрелка не повторена на вышележащей, родительской диаграмме. BPWin предусматривает здесь три варианта действий системного аналитика. При выделении курсором затуннелированного прямоугольными скобками конца стрелки в выпадающем контекстном меню (правая клавиша) можно выбрать «Arrow Tunnel», «Off Page Reference», «External Reference».

Для миграции затуннелированной стрелки на вышележащую диаграмму предусмотрена следующая технология:

- 1) правой кнопкой мыши в режиме «Pointer Tool» выделить затуннелированный конец стрелки;
- 2) в открывшемся контекстном меню выделить «Arrow Tunnel», после чего в окне «Border Arrow Editor» (рис. П.2.6) выбрать «Resolve it to Border Arrow».

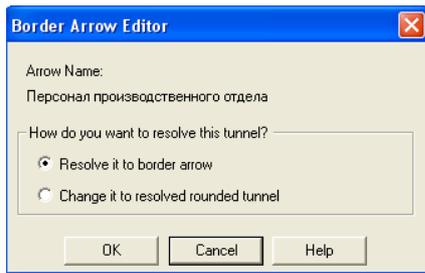


Рис. П.2.6. Окно редактирования граничных стрелок

Если родительская диаграмма, на которой после этого будет повторена переносимая стрелка, не является TOP-диаграммой, то на ней вновь возникает задача миграции вверх. Можно разрешить стрелке остаться затуннелированной, если в этом же окне выбрать «Change To Tunnel» (поменять на туннель), что приведет к замене прямоугольных скобок скобками круглыми и не вызовет миграции стрелки на родительскую диаграмму. Это обозначает, что данная граничная стрелка одной из функций декомпозиции не настолько существенна, чтобы быть отраженной на вышележащих диаграммах.

Для того, чтобы дополнить модель IDEF0 диаграммой DFD, нужно в процессе декомпозиции в диалоге «Activity Box Count» выбрать нотацию DFD. В этом случае в палитре инструментов на новой диаграмме появятся новые кнопки:

 — добавить в диаграмму внешнюю ссылку (External Reference). Внешняя ссылка является источником или приемником данных извне модели.

 — добавить в диаграмму хранилище данных (Data store). Оно позволяет описать данные, которые необходимо сохранить в памяти, прежде чем использовать в работах.

 — ссылка на другую страницу. В отличие от IDEF0 инструмент «Off-page reference» позволяет направить стрелку на любую диаграмму (а не только на верхний уровень).

Наличие в диаграммах DFD-элементов для описания источников, приемников и хранилищ данных позволяет более эффективно и наглядно описать процесс документооборота. Однако для описания логики взаимодействия информационных потоков более подходит IDEF3, называемая также Workflow diagramming, — методология моделирования, использующая графическое описание информационных потоков, взаимоотношений между процессами обработки информации и объектов, являющихся частью этих процессов. Диаграммы Workflow могут быть использованы в моделировании бизнес-процессов для анализа завершенности процедур обработки информации. С их помощью можно описывать сценарии действий сотрудников организации, например, последовательность обработки заказа или события, которые необходимо обработать за конечное время. Каждый сценарий сопровождается описанием процесса и может быть использован для документирования каждой функции.

Прямоугольники на диаграмме Workflow называются единицами работы (Unit of Work, UOW) и обозначают событие, процесс, решение или работу. Для редактирования диаграммы используются примерно те же диалоги, что и для IDEF0. В палитре инструментов на диаграмме Workflow имеются кнопки для новых элементов:

 — добавить в диаграмму объект ссылки (Referent). Объект ссылки в IDEF3 выражает некую идею, концепцию или данные, которые нельзя связать со стрелкой, перекрестком или работой. Имя объекта ссылки задается в диалоге «Referent» (пункт всплывающего меню «Name Editor»), в качестве имени можно использовать имя какой-либо стрелки с других диаграмм или имя сущности из модели данных. Объекты ссылки должны быть связаны с единицами работ или перекрестками пунктирными линиями.

Официальная спецификация IDEF3 различает три стиля объектов ссылок: безусловные (unconditional), синхронные (synchronous) и асинхронные (asynchronous). BPWin поддерживает только безусловные. Синхронные и асинхронные, используемые в диаграммах переходов состояний объектов, не поддерживаются.

 — добавить в диаграмму перекресток (Junction). Перекрестки используются для отображения логики взаимодействия стрелок при слиянии и разветвлении или для отображения множества событий, которые могут или должны быть завершены перед началом следующей работы. Различают перекрестки для слияния (Fan-in Junction) и разветвления (Fan-out Junction) стрелок. Перекресток не может использоваться одновременно для слияния и разветвления. При внесении перекрестка в диаграмму в диалоге «Junction Type Editor» необходимо указать тип перекрестка. Смысл каждого типа приведен в табл. П.2.1.

Таблица П.2.1

Условные обозначения перекрестков нотации IDEF3

Обозначение и наименование	Смысл в случае слияния стрелок (Fan-in Junction)	Смысл в случае разветвления стрелок (Fan-out Junction)
 Asynchronous AND	Все предшествующие процессы должны быть завершены	Все следующие процессы должны быть запущены
 Synchronous AND	Все предшествующие процессы завершены одновременно	Все следующие процессы запускаются одновременно
 Asynchronous OR	Один или несколько предшествующих процессов должны быть завершены	Один или несколько следующих процессов должны быть запущены
 Synchronous OR	Один или несколько предшествующих процессов завершены одновременно	Один или несколько следующих процессов запускаются одновременно
 XOR (Exclusive OR)	Только один предшествующий процесс завершен	Только один следующий процесс запускается

Все перекрестки на диаграмме нумеруются, каждый номер имеет префикс «J». Свойства перекрестка можно редактировать при помощи диалога «Definition Editor». В отличие от IDEF0 и DFD, в IDEF3 стрелки могут сливаться и разветвляться только через перекрестки. Здесь различают три типа стрелок, стиль которых устанавливается через меню «Edit | Arrow Style»:

1. Старшая (Precedence)  — сплошная линия, связывающая единицы работ (UOW). Рисуются слева направо или сверху вниз.

2. Отношения (Relational Link)  — пунктирная линия, используемая для изображения связей между единицами работ (UOW) и между единицами работ и объектами ссылок.

3. Поток объектов (Object Flow)  — стрелка с двумя наконечниками используется для описания того, что объект используется в двух или более единицах работы, например, когда объект порождается в одной работе и используется в другой.

В результате дополнения диаграмм IDEF0 диаграммами DFD и IDEF3 может быть создана смешанная модель, которая наилучшим образом описывает все стороны деятельности строительного предприятия. Иерархию работ в смешанной модели можно увидеть в окне «Model Explorer». Работы в нотации IDEF0 изображаются зеленым цветом, IDEF3 — желтым, DFD — синим. BPWin представляет также возможность привести в соответствие модель процессов и модель данных.

## П.2.2. Практическая реализация модели

В качестве примера рассмотрим деятельность вымышленной строительной компании, которая существует 5 лет и занимается в основном сборкой и продажей дачных домов. Годовой оборот компании составляет примерно 20 млн долл. Компания закупает стройдетали от трех независимых поставщиков и самостоятельно реализует продукцию, ориентируясь на покупателей, для которых главный критерий — стоимость дома. Предполагаемый объем рынка для компании в последующие 2 года — 50 млн долл.

Несмотря на некоторое увеличение объема продаж, прибыли уменьшаются, растет конкуренция на рынке. Чтобы не потерять позиции, компания решает проанализировать текущие бизнес-процессы и реорганизовать их с целью увеличения эффективности производства и продаж. Основные процедуры бизнес-процесса таковы:

- 1) менеджеры принимают заказы клиентов;
- 2) операторы группируют заказы по типам домов;
- 3) рабочие собирают из строительных конструкций дачные дома;
- 4) операторы отслеживают процессы согласно заказам;
- 5) главный менеджер организует процесс монтажа дома на месте, указанном клиентом в заказе.

В настоящее время строительная компания использует лицензионную бухгалтерскую информационную систему «1С-бухгалтерия», которая позволяет оформить заказ, счет и отследить платежи по счетам.

Улучшение деятельности компании должно касаться структуры управления, эффективности производства и внутреннего контроля. В результате реорганизации может потребоваться внедрение новой корпоративной информационной системы (состоящей не только из одного бухгалтерского модуля). Однако менеджеру, перед тем как пытаться производить какие-то улучшения, необходимо разобраться в существующих бизнес-процессах.

### П.2.2.1. Создание контекстной диаграммы

Для создания контекстной диаграммы нужно выполнить следующие действия:

1. Запустить BPWin.
2. В диалоговом окне «I would like to» ввести имя модели {Деятельность строительной компании}, выбрать «Type IDEF0» и нажать «ОК». Автоматически создается контекстная диаграмма. Кнопка  на панели инструментов включает и выключает инструмент просмотра и навигации (появляется слева). Если непонятно, как выполнить то или иное действие, то пользователь может вызвать помощь — клавиша F1 или меню «Help».
3. Перейти в меню «Model | Model Properties». В закладке «General» диалогового окна «Model Properties» ввести имя модели {Деятельность строительной компании}, имя проекта {Модель деятельности строительной компании}, имя автора и тип модели — Time Frame {AS-IS}.
4. В закладке «Purpose» ввести «Цель» {Purpose: Моделировать текущие (AS—IS) бизнес-процессы строительной компании} и «Точку зрения» {Viewpoint: Генеральный директор}.
5. В закладке «Definition» ввести определение {Это учебная модель, описывающая деятельность строительной компании} и «Score» {Общее управление бизнесом: исследование рынка, производство недостающих строительных деталей, сборка коттеджей, продажа}.

6. В закладке «Source» записать {Материалы курса системного анализа по BРWin}. В закладке «Status» установить «WORKING».

7. Перейти на контекстную диаграмму и правой кнопкой щелкнуть по работе. В контекстном меню выбрать «Name» и задать имя {Деятельность строительной компании}.

8. В закладке «Definition» записать определение {Текущие бизнес-процессы строительной компании}.

9. В закладке «Status» установить «WORKING».

10. В закладке «Source» внести {Материалы курса системного анализа по BРWin}.

### П.2.2.2. Создание диаграммы декомпозиции

1. Выбрать кнопку перехода на нижний уровень в палитре инструментов (рис. П.2.7, П.2.8), в диалоговом окне установить число работ «3» на диаграмме нижнего уровня.

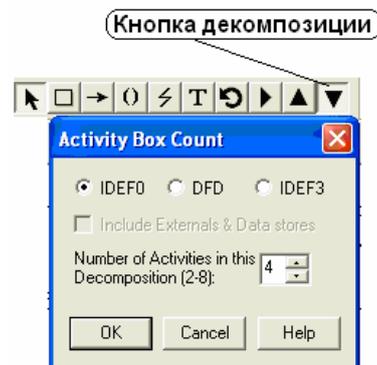


Рис. П.2.7. Декомпозиция IDEF0-диаграммы на четыре процесса

Автоматически будет создана диаграмма декомпозиции. Правой кнопкой мыши щелкнуть по работе (прямоугольнику), выбрать «Name Editor» и внести имя работы. Повторить операцию для всех трех работ.

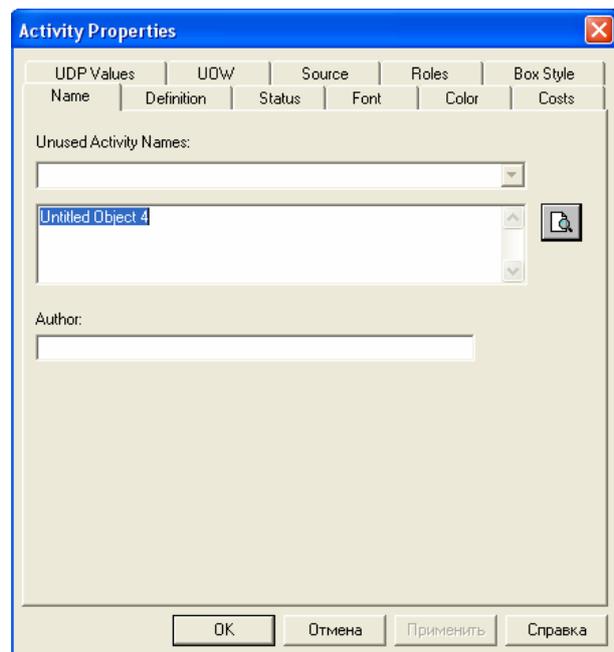


Рис. П.2.8. Диалог «Activity Properties» определяет свойства работы

2. Определить статус и источник для каждой работы согласно табл. П.2.2. Перейти в режим рисования стрелок и связать граничные стрелки (кнопка  на палитре инструментов) с остальными так, как показано на рис. П.2.9.

Таблица П.2.2

Описание работ для диаграммы декомпозиции

Функциональный блок	Описание	Статус	Источник
Маркетинг	Телемаркетинг, презентации, выставки	WORKING	Материалы курса системного анализа по BPWin
Заказы	Оформление заказов клиентам и получение строительных компонентов от поставщиков	WORKING	Материалы курса системного анализа по BPWin
Сборка коттеджей	Изготовление строительных конструкций, сборка коттеджей	WORKING	Материалы курса системного анализа по BPWin
Продажа	Монтаж коттеджей на месте, благоустройство территории	WORKING	Материалы курса системного анализа по BPWin

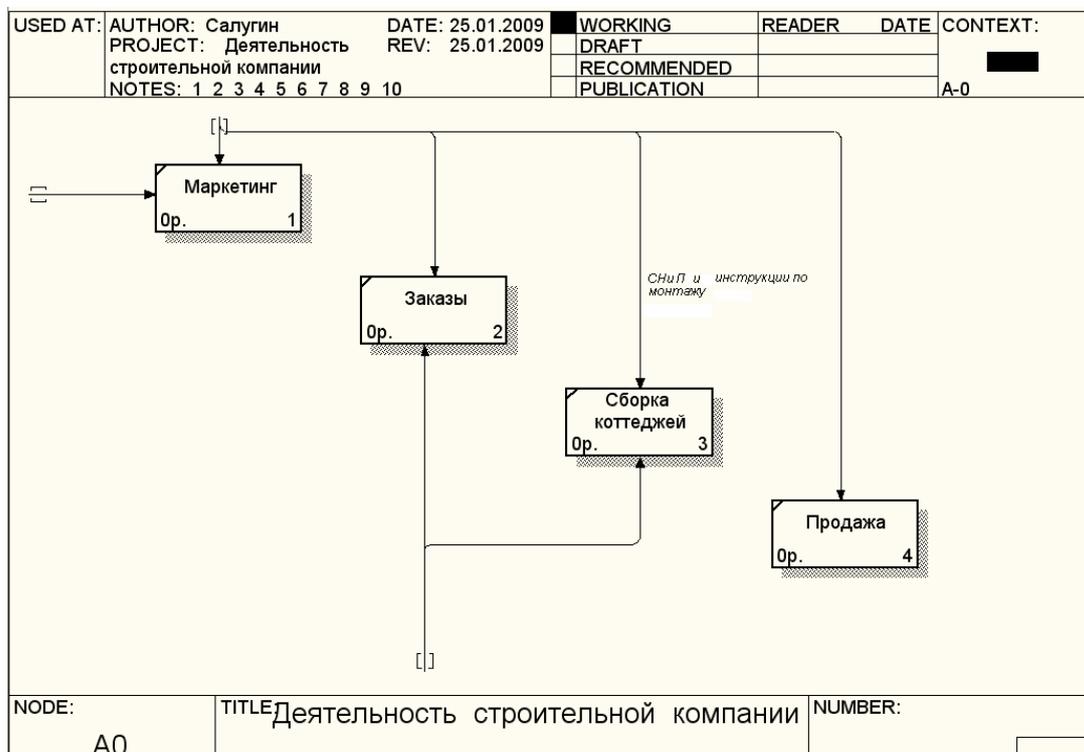


Рис. П.2.9. Диаграмма декомпозиции

3. Правой кнопкой мыши щелкнуть по ветви стрелки управления работы «Сборка коттеджей» и переименовать ее в «Правила сборки коттеджей». Для добавления стрелки выделить кнопку «Clear», внести имя и свойства работы, затем — «Add». Для удаления всех имен стрелок, не используемых в модели, — «Purge Unused».

4. Создать стрелку обратной связи (по управлению) (рис. П.2.10), идущую от работы «Заказы» к работе «Маркетинг». Для большей наглядности изменить стиль стрелки (толщина линий) и установить опцию «Extra Arrowhead» (из контекстного меню). Методом «Drag&drop» перенести имена стрелок так, чтобы их было удобнее читать. Если необходимо, установить «Squiggle» (из контекстного меню).

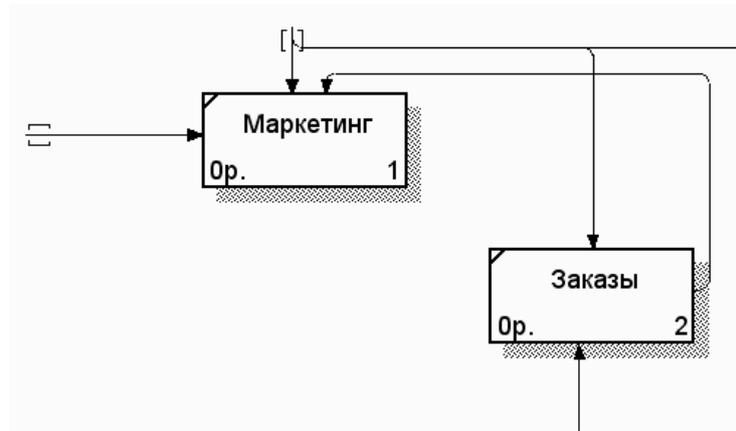


Рис. П.2.10. Стрелка обратной связи

5. Создать новую граничную стрелку выхода «Маркетинг» из работы «Продажи». Эта стрелка автоматически не попадает на диаграмму верхнего уровня и имеет квадратные скобки на конце  $\rightarrow \square$ . Щелкнуть мышью по квадратным скобкам и в диалоговом окне «Border Arrow Editor» выбрать «Resolve Border Arrow». Для стрелки «Маркетинг» выбрать опцию «Trim» из контекстного меню (правая клавиша мыши). Ниже приведены примеры диаграмм.

Декомпозируется работа «Сборка домов». В результате проведения экспертизы получена следующая информация:

- 1) производственный отдел получает заказы клиентов от отдела продаж по мере их поступления;
- 2) диспетчер координирует работу сборщиков, сортирует заказы, группирует их и дает указание на монтаж домов на месте, когда они готовы;
- 3) каждые два месяца диспетчер группирует заказы отдельно для разных типов домов и направляет на участок сборки;
- 4) рабочие участка сборки собирают дома согласно спецификациям заказа и инструкциям по сборке. Когда несколько домов, соответствующая группа заказов собрана, она направляется на приемку. Приемщики проверяют каждую конструкцию дома и в случае необходимости могут заменить неисправные стройдетали;
- 5) результаты тестирования направляются диспетчеру, который принимает решение о передаче комплектов домов на отгрузку.

На основе этой информации ввести новые работы и стрелки (табл. П.2.3).

Таблица П.2.3

Описание процессов для работы «Сборка домов»

Функциональный блок	Описание	Статус
Отслеживание расписания и управление сборкой	Просмотр заказов, установка расписания выполнения заказов, просмотр результатов работ, формирование групп заказов на сборку и отгрузку	WORKING
Сборка конструкций	Сборка домов в соответствии с инструкциями и указаниями диспетчера	WORKING
Технический контроль	Технический контроль домов и компонент. Замена некондиционных строительных компонент	WORKING

После протуннелирования и связи на верхнем уровне граничных стрелок получим диаграмму (рис. П.2.11).

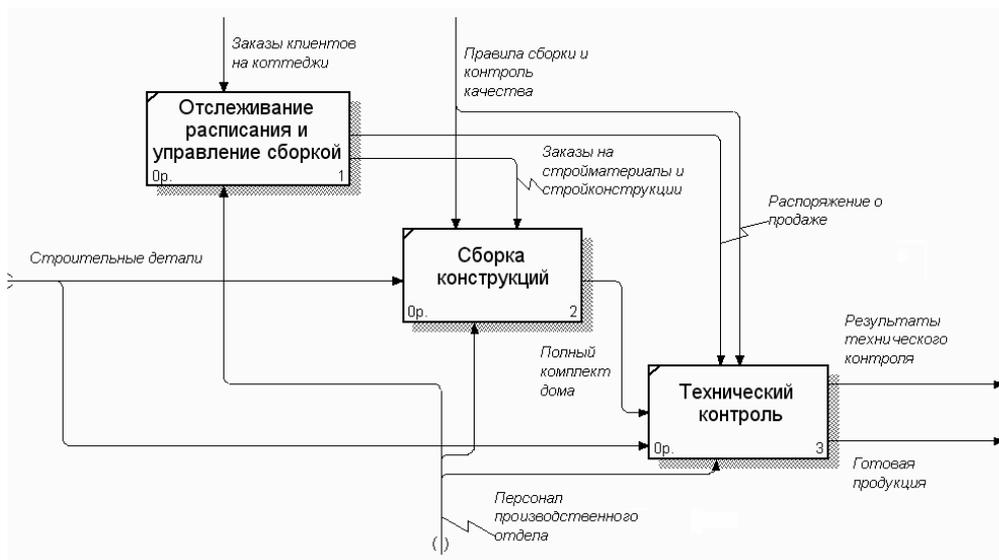


Рис. П.2.11. Диаграмма после туннелирования

### П.2.2.3. Создание диаграммы узлов

Выбрать «Diagram | Add Node Tree», задать имя и установить опции диалогового окна «Node Tree Definition», как показано на рис. П.2.12.

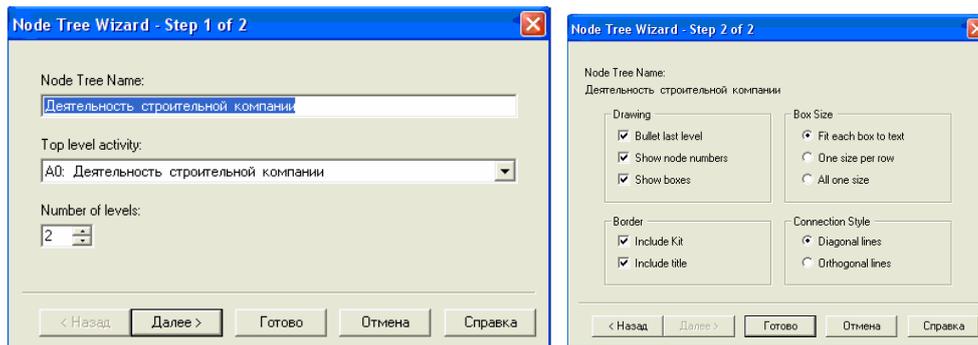


Рис. П.2.12. Мастер создания диаграммы узлов за два шага

Щелкнуть по кнопке «ОК». Создается диаграмма дерева узлов (рис. П.2.13).

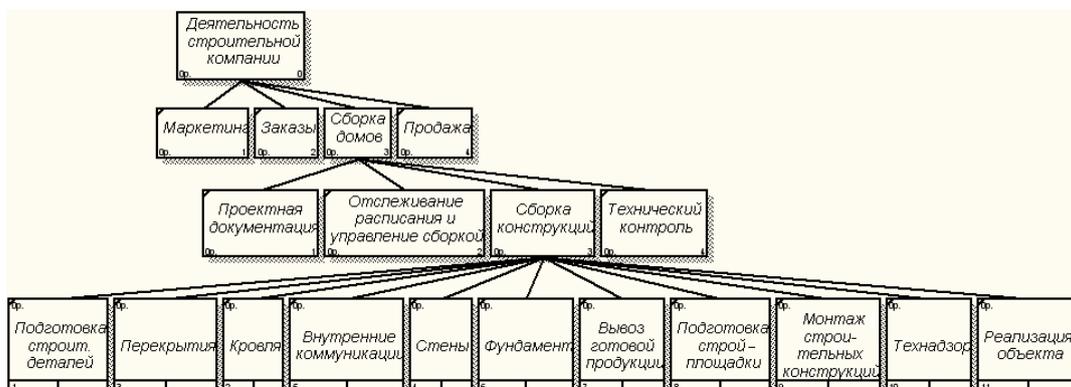


Рис. П.2.13. Диаграмма узлов

Для проведения деловой встречи директору компании необходимо иметь общую картину бизнес-процессов. Для этого создадим диаграмму дерева узлов: установить фокус на диаграмме дерева узлов, перейти в меню «Diagram | Add Node Tree», отключить опцию «Bullet Last Level», щелкнуть «OK».

### П.2.2.4. Создание диаграммы IDEF3

Для создания IDEF3-диаграммы следует перейти на диаграмму A2 и декомпозировать работу «Сборка домов». В диалоговом окне «Activity Box Count» установить число работ «4» и нотацию IDEF3 (рис. П.2.14).



Рис. П.2.14. Выбор типа диаграммы для IDEF3 модели

Появляется диаграмма IDEF3, содержащая работы (UOW). Правой кнопкой мыши щелкнуть по работе, выбрать в контекстном меню «Name Editor» и внести имя работы «Подготовка строительных компонент». Затем в закладке «Definition» внести определение «Подготавливаются все строительные компоненты согласно спецификации заказа». Внести в диаграмму (кнопка ) другие работы, как на рис. П.2.15. С помощью кнопки  палитры инструментов создайте объект ссылки. Ввести имя объекта внешней ссылки «Строительные компоненты» (рис. П.2.16).

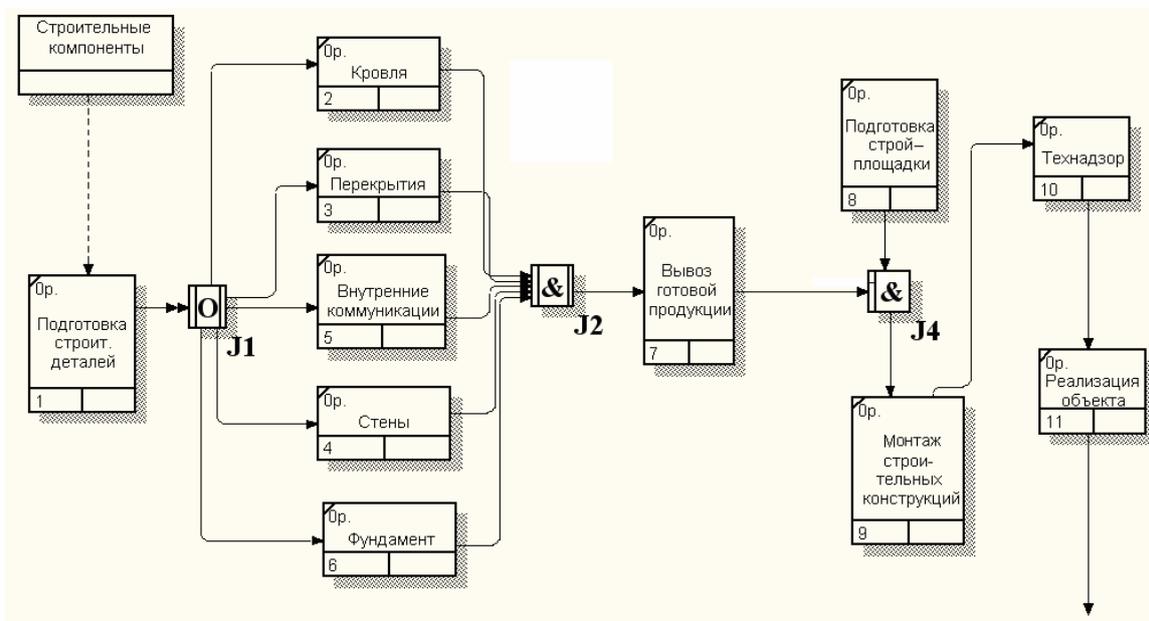


Рис. П.2.15. IDEF3-диаграмма, иллюстрирующая технологический процесс строительства загородного дома

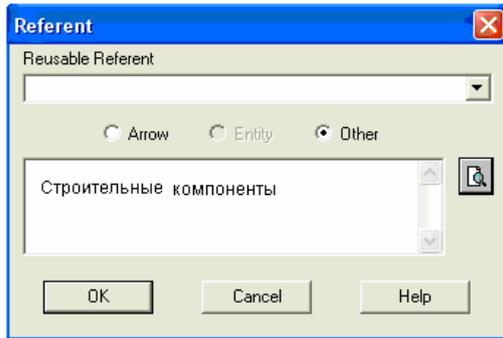


Рис. П.2.16. Окно «Referent» для ввода параметров ссылки

Сохранить модель. С помощью кнопки  на палитре инструментов внести перекрестки типа «асинхронное или» и связать работы с перекрестками, как показано на рис. П.2.15.

### П.2.2.5. Создание сценария

Выбрать пункт меню «Insert | FEO Diagram» и создать диаграмму FEO на основе диаграммы IDEF3 «Сборка загородных домов» (рис. П.2.17). Для этого следует просто удалить элементы, не входящие в сценарий. На основе диаграммы IDEF3 можно создать, например, сценарий, описывающий путь неисправных компонентов. В сценарий должны входить только объекты, содержащие основные этапы деятельности строительной организации (рис. П.2.17).

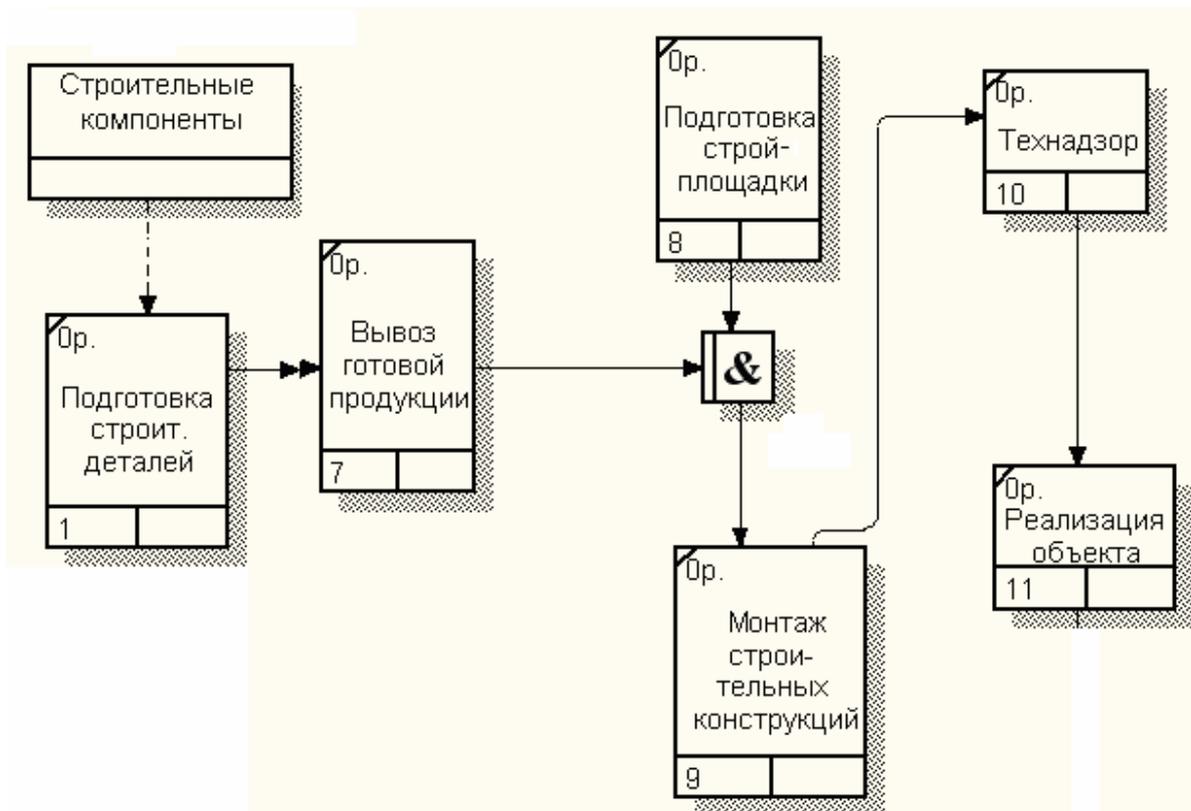


Рис. П.2.17. FEO-диаграмма для иллюстрации бизнес-процесса

### П.2.2.6. Затратный (cost) анализ

Добавление дополнительной информации в виде оценок функциональных блоков обеспечивает задание таких характеристик бизнес-процесса, как стоимость, время выполнения работы, качество. Рассмотрим два метода задания этой информации:

- 1) задание оценок для функциональных блоков;
- 2) задание свойств блока, определяемых пользователем.

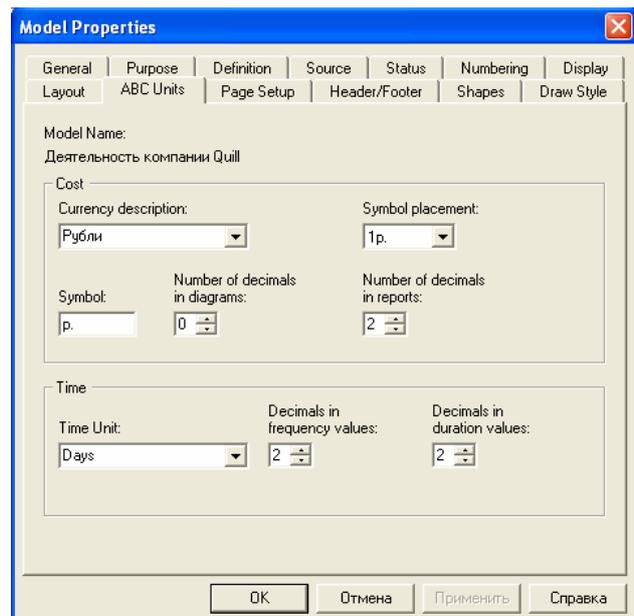
Добавление стоимостных оценок для функциональных блоков основано на применении метода Activity based costing (ABC). Основная идея этой технологии состоит в задании оценки отдельных блоков модели для получения общей оценки затрат на проект. Затраты на работу функциональных блоков принимаются равными затратам всех входящих в них подблоков. Таким образом, ABC может использоваться для определения оценки затрат на разработку проекта в целом, также для определения стоимости производимой строительной продукции; затрат на доставку материала; затрат на предполагаемые изменения в технологии.

Технология ABC предполагает объединение затрат в «центры затрат» (под которыми понимается любой бизнес-процесс) с последующим размещением стоимостей по объектам модели. Перед началом оценивания затрат необходимо убедиться, что существующая модель полна и устойчива. Оценивание функциональных блоков производится в три этапа:

- 1) определение единиц измерения;
- 2) определение «центров затрат»;
- 3) оценивание объектов модели.

При установке единиц измерения задается вид валюты и вид представления денежных единиц на экране. Кроме того, определяются единицы времени измерения длительности процессов и их цикличности (минуты, часы и т. п.). Эти параметры являются глобальными по отношению к модели, задаются в закладке «ABC Units» диалога задания свойств модели (рис. П.2.18). Для каждого функционального блока модели задается стоимость работы. Общая стоимость работы функционального блока состоит из затрат, определенных на предыдущем этапе при задании центров затрат. Для этого используется «Activity cost editor», вызываемый из контекстного меню при щелчке правой кнопкой мыши (см. рис. П.2.18).

Рис. П.2.18. Свойство модели в окне «ABC Units» для задания размерностей



Для каждого функционального блока определяются:

- 1) частота его выполнения;
- 2) продолжительность работы;
- 3) затраты на работу блока из «центра затрат».

Общие затраты на работу функционального блока вычисляются автоматически, она показывается в левом нижнем углу функционального блока, для которого задана оценка затрат. На производственном участке работают 50 монтажников и 1 технический контроллер. В среднем в месяц собирается 2 загородных дома. Двое рабочих — стажеры. Зарплата диспетчера 15 000 р. в месяц, монтажник и технический контроллер получают по 600 р. в день, стажеры — по 300 р. Средняя стоимость строительных компонентов для загородного дома составляет 1 500 000 р. В диалоговом окне «Model Properties» в закладке «ABC Units» нужно установить единицы измерения стоимости и времени (рис. П.2.18).

В «Cost Centers Editor» окна «Model Properties» необходимо внести название и определение для центров затрат (табл. П.2.4).

Т а б л и ц а П.2.4

*Данные для центра затрат*

Центр затрат	Определение
Управление	Затраты, связанные с составлением графика работ, изготовлением, монтажом и техническим контролем
Рабочая сила	Затраты на оплату рабочих, занятых сборкой и контролем
Компоненты	Затраты на закупку компонентов

Для заполнения окна «Центр затрат» последовательно набрать наименование и активизировать «Add». Описание (Definition) вводится текстом в окно (рис. П.2.19).

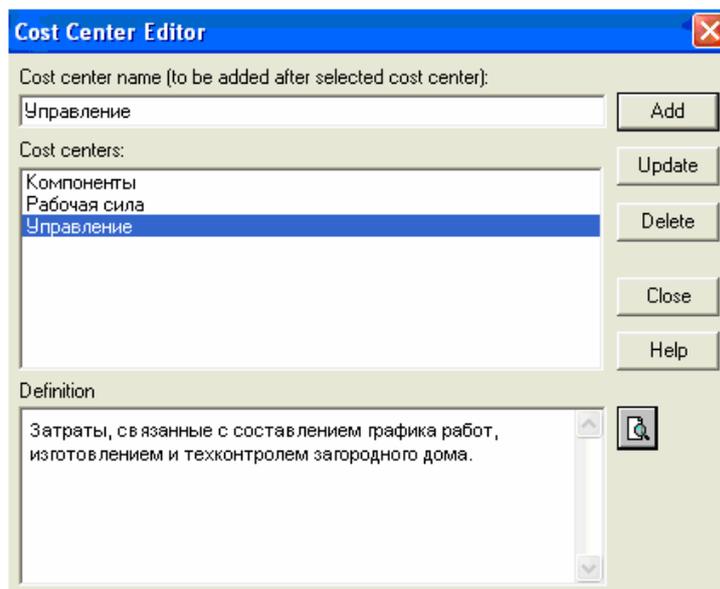


Рис. П. 2.19. Диалог ввода данных о «Центрах затрат»

Для указания стоимости работы следует щелкнуть по ней правой кнопкой мыши и выбрать в контекстном меню «Cost Editor». Внесите параметры ABC (табл. П.2.5, рис. П.2.20).

Параметры ABC для назначения стоимости работы

Функциональный блок	Cost Center	Затраты	Продолжительность	Частота
Отслеживание расписания и управление сборкой	Управление	25	1	1
	Рабочая сила	100	15	1
Сборка дома	Компоненты	30 000		
Технический контроль			1	1

Рис. П.2.20. Ввод стоимостных параметров блока

### П.2.2.7. Оценка затрат с категориями UDP

Свойство, определяемое пользователем (User-defined property — UDP), создается для отображения произвольной информации, относящейся к конкретному функциональному блоку или стрелке. BPWin поддерживает различные типы UDP, включая:

- 1) контекстные списки для хранения информации об организации процесса или оценки его уровня;
- 2) исполнимые UDP, содержащие ссылки на прикрепленные объекты, обрабатываемые другими программами;
- 3) текстовые списки, используемые, например, для хранения информации о сотрудниках фирмы.

UDP могут использоваться для детализации модели и задания, например, таких свойств, как время, стоимость, качество и ответственные лица. UDP задаются с помощью пункта «User Defined Property Name Editor» меню «Edit»:

- 1) задать имя свойства;
- 2) назначить свойству тип данных;
- 3) уточнить характеристики свойства (это нужно для некоторых типов данных).

После создания UDP существует возможность присвоения им значений с помощью закладки «UDP values» диалога редактирования свойств функционального блока или стрелки.

Для усвоения вышесказанного следует выполнить следующие действия. Перейти в «Model | UDP Definition Editor» и в диалоговом окне «Property Name Editor» внести название ключевых слов. Для внесения ключевых слов необходимо в поле «New Keyword | New Member» внести наименование ключевых слов и щелкнуть по кнопке «Add Keyword» (рис. П.2.21).

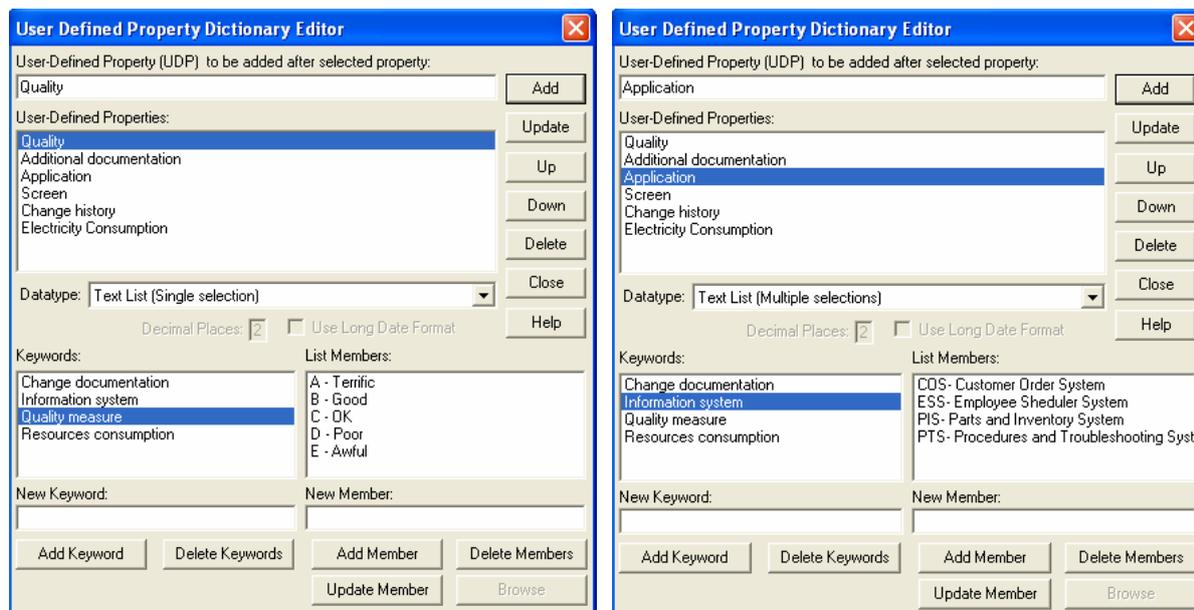


Рис. П.2.21. Определение UDP с помощью User-Defined Property Name Editor

Внести следующие категории:

Resources Consumption (расход ресурсов);

Documentation (документация);

Information System (информационная система);

Quality Measure (мера измерения качества).

Создать UDP. Для этого в поле «User Defined Property (UDP) to be added after selected property» внести имя UDP, например, «Quality». Затем выбрать тип UDP из бокса Datatype — «Text List (Single selection)», после чего — «Add». Для UDP типа List необходимо задать список значений. В поле «New Keyword | New Member» внести значение А — «Terrific» и щелкнуть по кнопке «Add Member». Затем внесите другие значения UDP Quality: В — Good; С — OK; D — Poor; E — Awful. Для включения UDP в «Ключевое слово» щелкнуть по UDP в списке, затем щелкнуть по «Ключевому слову» в нижнем списке, после чего щелкнуть по кнопке «Update». Из табл. П.2.6 внести UDP.

После внесения UDP типа Command или Command List щелчок по кнопке «>>>» приведет к запуску приложения. В диалоговом окне IDEFO «Activity Properties» с помощью кнопки «Categories» в окне «Activity Categories Editor» отключим категорию «Information System». Свойства UDP можно присвоить не только работам, но и стрелкам. Щелкнув по стрелке правой кнопкой и выбрав в контекстном меню UDP «Editor», можно задать значения UDP стрелкам: «Заказы на загородные дома» — В — Good; «Собранные дома» — А — Terrific.

Таблица П.2.6

## Список UDP

Наименование UDP	Тип	Члены	Ключевое слово
Application (приложения)	Text List	COS — Customer Order System (модуль оформления заказов); ESS — Employee Sheduler System (создание расписания); PIS — Parts and Inventory System (учет комплектующих); PTS — Procedures and Troubleshooting System (сборка)	Information System
Additional Documentation (дополнительная документация)	Command	Winword.EXE sample1.doc Winword.EXE sample2.doc POWERPNT.EXE sample3.ppt	Documentation

**Пример П.2.** Создадим два дополнительных UDP (табл. П.2.7).

Таблица П.2.7

## Исходные данные для примера П.2

Наименование UDP	Тип	Члены	Категория
Responsibility (ответственность)	Text List (Single Selection)	Ivanov, Petrov, Sidorov	Quality Measure
Customer Satisfaction (оценка клиента)	Integer List	1 2 3 4 5	Quality Measure

Свойства работ UDP определим по табл. П.2.8.

Таблица П.2.8

## Свойства работ UDP

Функциональный блок	Ответственный	Удовлетворенность заказчика
Отслеживание расписания и управление сборкой загородных домов	Директор	4
Сборка загородных домов	Прораб	4
Тестирование загородных домов	Диспетчер	4

Краткое описание, приведенное в данном приложении, позволит читателю сделать первые шаги в проектировании сложных систем строительного бизнеса, формировать функциональные модели производства, делая его более прозрачным и доступным для управления. Дойдя до определенного уровня программирования, ЛПП своими силами вполне способен овладеть всеми тонкостями CASE-средств, чтобы разрабатывать для своих нужд эффективные и наглядные графические модели, отражающие сложные процессы строительного производства и оптимальную систему управления.

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

### **П.3.1. Создание плана нового проекта**

Управление проектами — это искусство и наука организации, планирования и управления различными процессами в условиях ограниченных ресурсов, времени и затрат. Под проектом понимается любая деятельность, направленная на достижение поставленных целей с максимально возможной эффективностью при заданных ограничениях времени, людских ресурсов и финансовых затрат на строительство коттеджа, модернизацию оборудования, проведение исследований грунтов, проектирование коммуникационных систем и т. д.

Ниже рассматривается одна из распространенных и удобных в использовании систем управления проектами — система MS Project 2003. Пример взят из книги Е. М. Кудрявцева [18] с некоторыми сокращениями.

Работа над проектом включает в себя определение задач и ресурсов, отслеживание выполнения задач проекта и выдача отчетов о ходе его выполнения. Для создания плана нового проекта необходимо произвести запуск MS Project, определить дату начала или окончания, ввести общие сведения. Для этого нужно щелкнуть по кнопке «Создать» — первой кнопке в третьей строке сверху главного окна системы MS Project в панели инструментов; выделить пункт «Проект» главного меню и в выпадающем меню активизировать «Сведения о проекте» (рис. П.3.1); ввести начальную или конечную дату выполнения проекта (процесса) и подтвердить — «ОК».

Диалоговое окно «Сведения о проекте» используется для ввода, просмотра или изменения начальных сведений о проекте. Пользователь имеет возможность выбрать планирование проекта: ввести начальную дату для планирования проекта или конечную дату для планирования проекта с даты окончания проекта, определить календарь проекта, получить общую статистику проекта.

Перед вводом даты начала или окончания проекта необходимо установить какой способ расчета будет выбран: от даты начала проекта или от даты окончания проекта. Для этого в раскрывающемся списке «Планирование от:» необходимо выбрать планирование проекта или от «даты начала проекта» или «от даты окончания проекта». Введем дату начала выполнения проекта — число, месяц и год. Для уточнения дня недели щелкнем по стрелке, расположенной в правой части текстового окна. Появится развернутый календарь указанного месяца. Щелкнув еще раз по этой же стрелке, можно увидеть, что появилось название дня недели.

Рис. П.3.1. Диалоговое окно «Сведения о проекте»

В первом случае конечная дата проекта рассчитывается на основании даты начала проекта, а все задачи начинаются как можно раньше. Кроме того, длительности, связи, ограничения задач и другие факторы планирования также планируются от даты начала проекта.

Во втором случае дата начала проекта рассчитывается на основании даты окончания проекта, а все задачи начинаются как можно позже. Кроме того, длительности, связи, ограничения задач и другие факторы планирования также планируются от даты окончания проекта. В раскрывающемся списке «Календарь» имеется три пункта, каждый из которых определяет режим выполнения проекта. В системе MS Project имеется панель инструментов «Консультант» с кнопками: «Задачи», «Ресурсы», «Отслеживание», «Отчет».

### П.3.2. Задачи проекта

Для составления задач проекта щелкнуть по кнопке «Задачи» на панели инструментов «Консультант» — первой кнопке слева в пятой строке сверху — кнопке с надписью «Задачи». Появится начальное окно «Консультанта» с названием «Задачи» — окно в левой части рабочей области, в которой синим цветом выделены основные этапы, связанные с вводом данных касающихся всего проекта и его задач: определение проекта; определение рабочего времени проекта; ввод задач проекта; организация этапов задач; планирование задач; добавление дополнительных сведений о задаче или ссылки на них; добавление столбцов для особых сведений; установка крайних сроков и ограничений; добавление документов в проект; публикация данных проекта на сервере. Рассмотрим некоторые из этапов и соответствующие им шаги.

#### П.3.2.1. Определение проекта

Для перехода к этапу «Определение проекта» щелкнуть по пункту «Определение проекта» и выполнить «Ввод сведений о проекте»: ввести предполагаемую дату начала выполнения проекта и щелкнуть по пункту «Сохранить и перейти к шагу 2». Второй шаг («Совместная работа над проектом»): определить, требуется ли использовать при

совместной работе над проектом MS Project Server и MS Project Web Access; «Сохранить и перейти к шагу 3». Третий шаг («Сохранение проекта»): определить в окне «Сохранение документа» имя нового проекта — «Установка мачты». После четвертого шага («Ввод дополнительных сведений») произойдет переход к начальному окну «Консультанта» под названием «Задачи» с перечислением основных этапов.

### П.3.2.2. Определение рабочего времени проекта

Для перехода к этому этапу щелкнуть по пункту «Определение рабочего времени проекта». Появится окно «Консультанта», где требуется выполнить пять шагов: на первом шаге («Определение общих рабочих часов для проекта») в правой части экрана появится шаблон календаря рабочего времени длительностью одна неделя. В системе MS Project каждый ресурс имеет календарь, в котором указаны рабочие и нерабочие дни для этого ресурса, а также часы работы по рабочим дням. На первом шаге появляется запрос: «Выберите шаблон календаря». Оставив шаблон календаря «Стандартный» без изменения, выполнить «Сохранить и перейти к шагу 2». На втором шаге можно указать, какие дни недели являются обычными рабочими днями (рис. П.3.2). Далее возможны два варианта действия, один из которых может быть активизирован. Если активизирован первый пункт «Использовать рабочие часы» — (поставлен флажок), то далее следует щелкнуть по пункту «Сохранить и перейти к шагу 3».

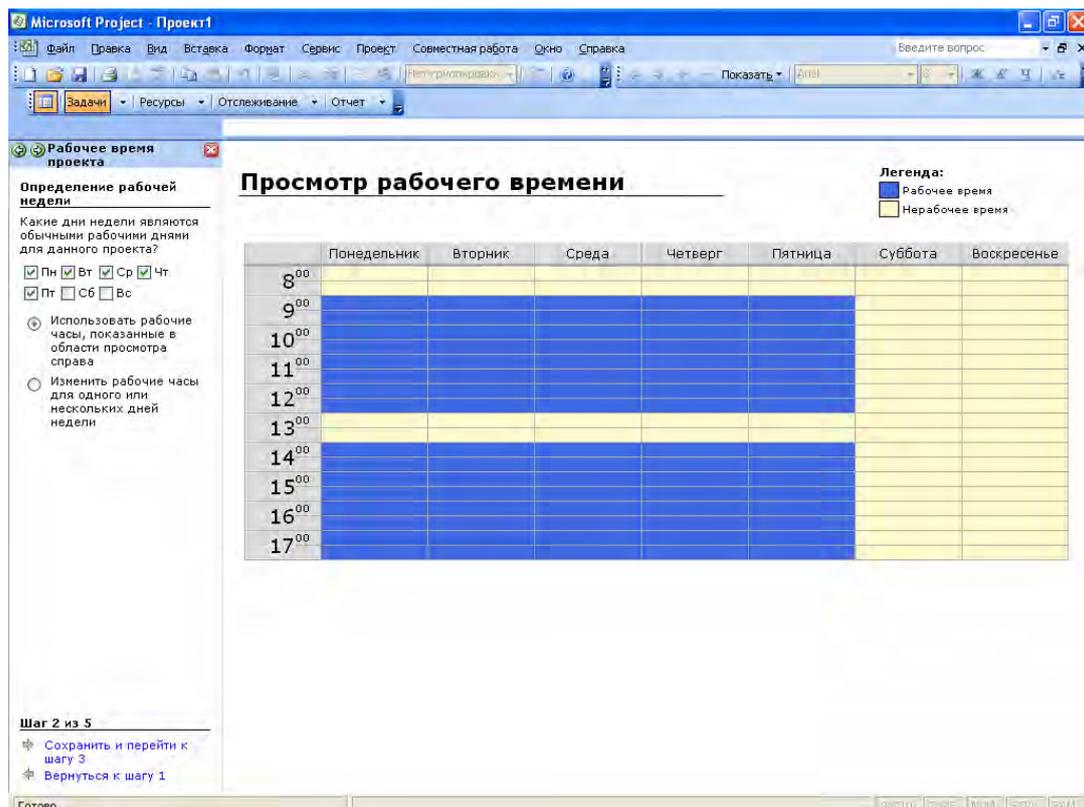


Рис. П.3.2. Рабочее время в течение недели

Если активизирован второй пункт («Изменить рабочие часы для одного или нескольких дней недели»), то в окне «Консультанта» появятся пять раскрывающихся списков: один с названием «День» и по два списка, соответственно, с названиями «С:» «До:» (рис. П.3.3).

Рис. П.3.3. Раскрывающиеся списки для выбора дня недели и часов работы в окне «Консультанта»

День: Понедельник ▾

С: 9:00 ▾ До: 13:00 ▾

14:00 ▾ 18:00 ▾

Для изменения рабочих часов одного или нескольких дней недели нужно щелкнуть по стрелке справа в списке под названием «День» и установить нужные параметры для «Применить для всех дней».

На третьем шаге («Задание праздников и выходных дней») произвести задание праздников и выходных дней (рис. П.3.4).

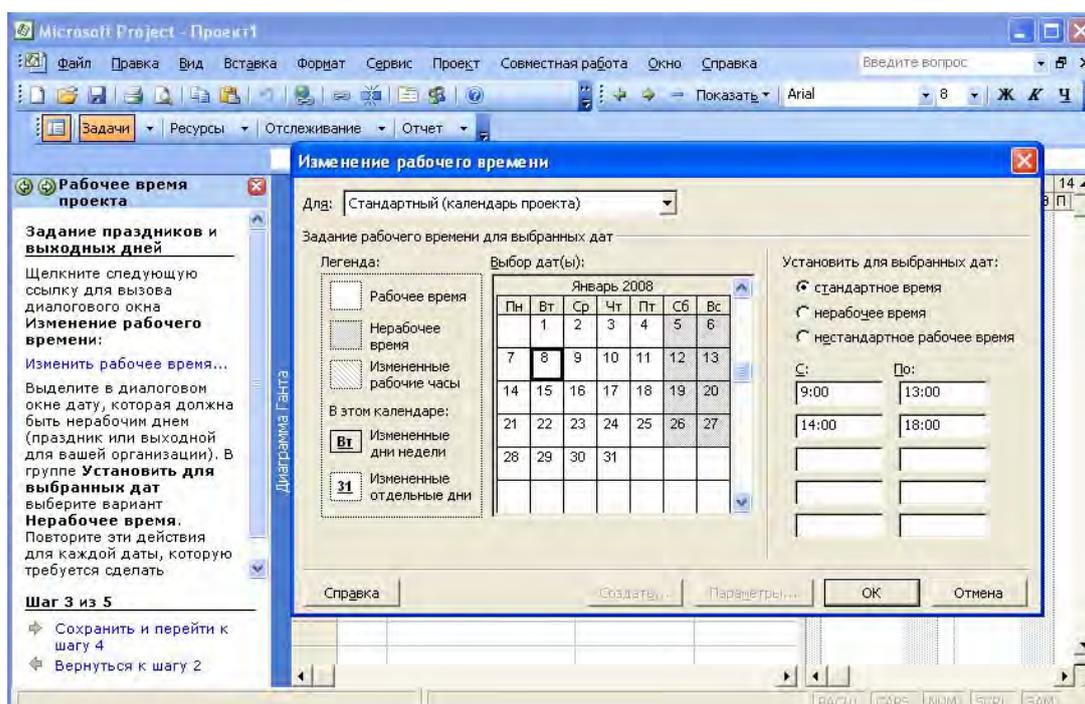


Рис. П.3.4. Диалоговое окно «Изменение рабочего времени»

На четвертом шаге («Определение единиц времени») проводится определение единиц времени.

### П.3.2.3. Ввод задач проекта

Для перехода к этому этапу надо щелкнуть по пункту «Ввод задач проекта» в исходном окне «Консультанта» под названием «Задачи». Появится окно «Консультанта» с названием «Ввод задач» и объяснение, как его выполнить.

На данном этапе в столбце под именем «Название задачи» ввести список задач, требуемых для выполнения проекта. Допустим, что мы должны установить мачту. Для этого необходимо выполнить целый ряд операций: заказать фундаментный блок; изготовить его; доставить на место установки мачты; выполнить необходимые земляные работы; сделать опалубку; забетонировать и выждать время на затвердение бетона; установить фундаментный блок; изготовить мачту и доставить ее на место; установить мачту.

Введем эти задачи в ячейки столбца «Название задачи» диаграммы Ганта. Для этого необходимо щелкнуть по ячейке в столбце «Названия задач», в котором предполагается ввод названия задачи и ввести название задачи (рис. П.3.5).

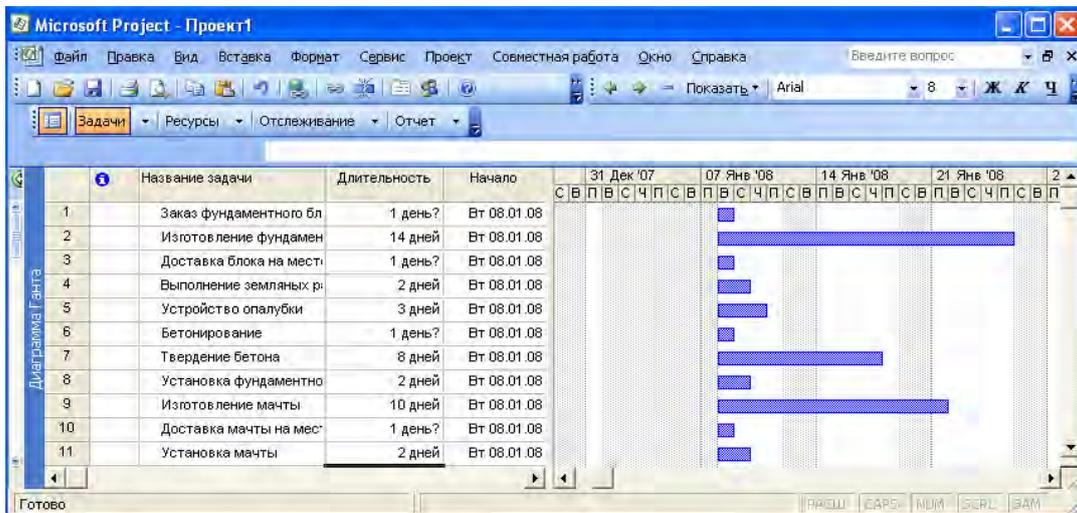


Рис. П.3.5. Ввод задач проекта в представлении календарного графика Ганта

В столбце «Длительность» вводится время, необходимое для выполнения каждой задачи (часы, дни или месяцы). В системе MS Project начальная и конечная даты рассчитываются с учетом связей между задачами. В ячейках столбца «Длительность» используются следующие сокращения. Задача с нулевой длительностью автоматически помечается как веха, но сделать вехой можно любую задачу. Для этого надо выбрать задачу в столбце «Название задачи» и щелкнуть по кнопке «Сведения о задаче», расположенной в панели инструментов «Стандартная». Появится диалоговое окно «Сведения о задаче» с многочисленными вкладками. Щелкните по вкладке «Дополнительно». Раскроется вкладка, показанная на рис. П.3.6. Установить флажок в переключателе «Пометить задачу как веху», расположенном в левом нижнем углу.

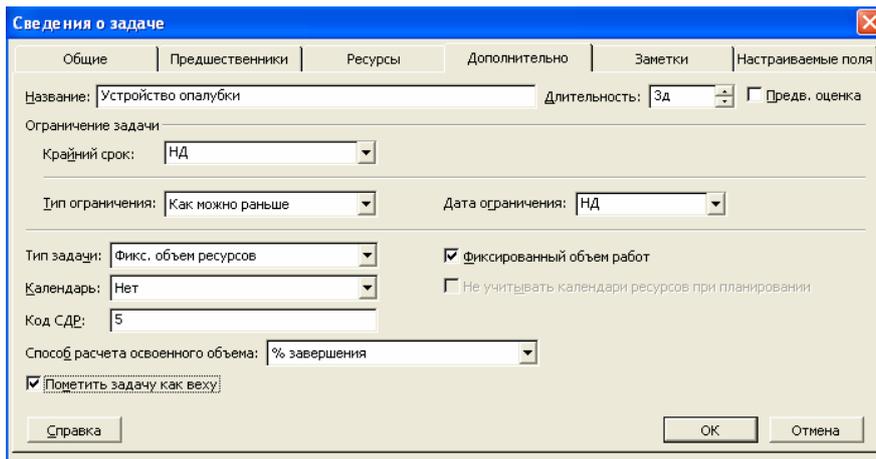


Рис. П.3.6. Диалоговое окно «Сведения о задаче» с открытой вкладкой «Дополнительно»

После выполнения этапа «Ввод задач» щелкните по пункту «Готово». Произойдет переход к начальному окну.

### П.3.2.4. Организация этапов проекта

Создадим иерархию задач для упорядочения выполнения проекта. Задачи, которые будут выполняться в один и тот же период времени, расположим с отступом под суммарной задачей. По умолчанию все суммарные задачи выделяются полужирным шрифтом и располагаются с выступом, а подзадачи отображаются под ними с отступом.

Для определения или изменения уровня задачи относительно задачи, расположенной выше, используются первые две кнопки на панели инструментов «Форматирование:»  — кнопка «На уровень выше» для повышения уровня выделенной задачи относительно задачи, расположенной выше;  — кнопка «На уровень ниже» для понижения уровня выделенной задачи относительно задачи, расположенной выше. При этом задача, расположенная выше, автоматически станет суммарной.

При использовании первого способа назначения уровня задачи необходимо щелкнуть по пункту «Вид» главного меню. Появится выпадающее меню; щелкнуть по пункту «Диаграмма Ганта» в выпадающем меню. Появится диаграмма Ганта активного проекта; выбрать столбец «Название задач» по задаче, для которой вы определяете уровень относительно выше расположенной задачи; щелкнуть по кнопке «На уровень выше» для повышения уровня выделенной задачи относительно задачи, расположенной выше, или по кнопке «На уровень ниже» для понижения уровня выделенной задачи.

При использовании второго способа назначения уровня задачи необходимо установить указатель мыши на первой букве названия задачи. Он должен принять вид двуправленной стрелки; щелкнуть левой кнопкой мыши и, не отпуская ее, перетащить указатель мыши вправо, чтобы расположить задачу с отступом, или влево, чтобы расположить ее с выступом.

Чтобы отменить структурирование, следует сдвигать все подзадачи и суммарные задачи нижних уровней на уровень выше до тех пор, пока все задачи не окажутся на одном структурном уровне. Данные суммарной задачи, такие как «Длительность» и «Затраты», система MS Project вычисляет автоматически по данным подзадач.

Для структуризации проекта целесообразно, кроме задач проекта, вводить этапы проекта, так называемые суммарные (укрупненные) задачи. Например, для задачи «Установка мачты» перед первыми тремя задачами можно ввести суммарную задачу под названием «Изготовление и доставка блока». Перед последующими четырьмя задачами можно ввести этап — задачу под названием «Подготовка фундамента». И, наконец, перед последними тремя задачами можно ввести этап — задачу под названием «Установка блока и мачты».

Для ввода этапа или новой задачи необходимо щелкнуть по номеру той задачи, перед которой требуется ввести этап проекта или строку для новой задачи; щелкнуть правой кнопкой мыши на выделенной задаче. Появится контекстно-зависимое меню, показанное на рис. П.3.7: щелкнуть в контекстно-зависимом меню по пункту «Новая задача». Появится строка для ввода пункта проекта или новой задачи перед выделенной задачей. В нашем случае — перед первой задачей. Следует учесть, что после ввода пункта или новой задачи тут же изменяется нумерация задач вместе с пунктами (суммарными задачами).

При форматировании для понижения уровня выделенных задач задача, расположенная выше, автоматически станет суммарной и автоматически определится ее длительность, а в графической части графика Ганта она будет представлена в виде темной ленты с указанием начала и окончания выполнения суммарной (укрупненной) задачи. Аналогичные действия сделаем с другими этапами проекта. После завершения

структурирования списка задач можно оставить для просмотра только суммарные задачи проекта. Для этого достаточно щелкнуть мышью по пиктограмме со знаком «минус», расположенной перед названием этапа суммарной задачи. При этом все задачи, входящие в состав этапа, исчезнут и перед названием суммарной задачи появится пиктограмма со знаком «плюс». Для разворачивания суммарной задачи проекта необходимо щелкнуть мышью по пиктограмме со знаком «плюс» перед раскрываемой суммарной задачей.

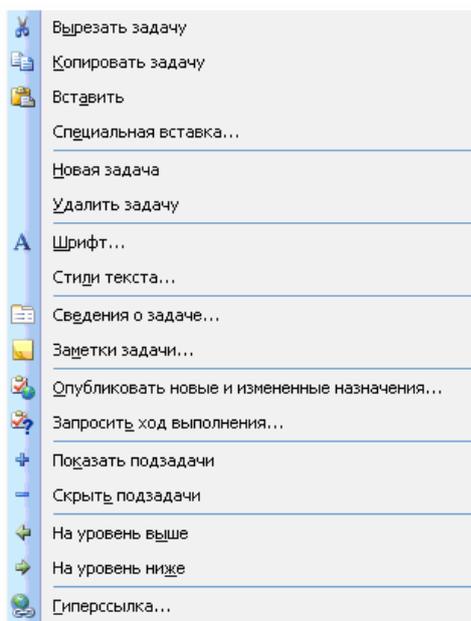


Рис. П.3.7. Контекстно-зависимое меню для выполнения задачи

После выполнения этапа «Организация задач» щелкнуть по пункту «Готово» и система вернется в начальное окно.

### П.3.2.5. Планирование задач

Здесь производится связывание задач. Часто начало или окончание одной задачи зависит от начала или окончания выполнения другой задачи. Например, задача «Изготовление фундаментного блока» не может быть начата, пока не закончится «Заказ фундаментного блока».

Для связывания первых двух задач нашего примера переместить бегунок в такое местоположение, чтобы был виден столбец с названием «Предшественники». Однако при таком расположении не видны названия задач. Можно временно скрыть столбцы, лежащие между «Длительность» и «Предшественники». Для этого щелкнуть сначала правой кнопкой мыши по названию скрываемого столбца, а затем левой кнопкой мыши по пункту «Скрыть столбец» в появившемся контекстно-зависимом меню; поместить в ячейку, стоящую на пересечении строки с названием задачи «Изготовление блока» и столбца с названием «Предшественники», номер задачи, после которой может быть выполнена данная задача. В нашем примере это будет цифра «2»; поместить в ячейку, расположенную на пересечении строки с названием следующей задачи («Доставка блока») и столбца с названием «Предшественники», номер операции, после которой может быть выполнена следующая задача. В нашем примере это будет цифра «3» и т. д. Если последующая задача имеет связь с несколькими предыдущими задачами, то указываются номера всех предшествующих задач через точку с запятой.

После того как задачи связаны, изменение дат предшественника будет влиять на изменение дат последователей. В системе MS Project по умолчанию создается связь задач типа «Окончание—начало» (ОН). Кроме того, в системе могут создаваться связи «Начало—начало» (НН), «Окончание—окончание» (ОО) или «Начало—окончание» (НО).

В названии этапа — суммарной задачи в ячейку столбца «Предшественники» не вводится номер задачи — ячейка остается пустой. Если задаче не предшествует ни одна задача, то в ячейку также не вводится номер задачи — ячейка остается пустой. Если операции предшествуют несколько задач, то номера задач указываются через точку с запятой.

После ввода этапов и задач в проекте «Установка мачты» в столбце «Названия задач» на диаграмме Ганта и указания в поле «Предшественники» номеров предшествующих задач (кроме суммарных) автоматически рассчитывается и появляется график Ганта (рис. П.3.8).

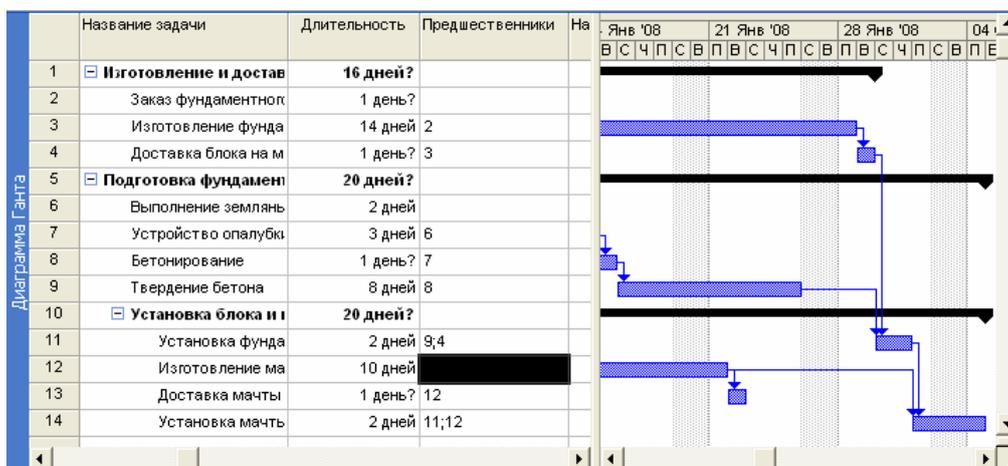


Рис. П.3.8. Диаграмма Ганта для проекта «Установка мачты» с этапами

Чтобы просмотреть столбцы таблицы или график проекта целиком используем расположенные внизу бегунки. Не отпуская бегунок, перемещаем его до тех пор, пока на экране не появятся нужные данные. Для скрытия того или иного столбца необходимо щелкнуть правой кнопкой мыши по названию скрываемого столбца. Появится контекстно-зависимое меню (рис. П.3.9), щелкнуть по пункту «Скрыть столбец». Выделенный столбец в таблице исчезнет с экрана.

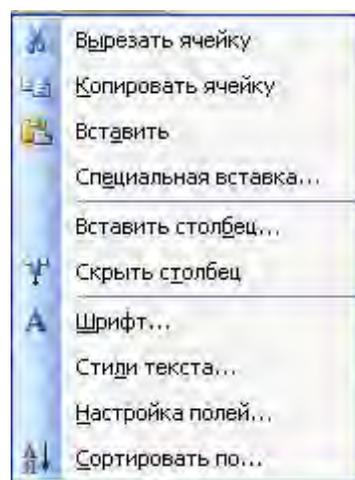


Рис. П.3.9. Контекстно-зависимое меню для выделенного столбца

Если столбец снова потребуется, щелкнуть правой кнопкой мыши по названию столбца, перед которым надо ввести нужный столбец. Появится контекстно-зависимое меню, щелкнуть по пункту «Вставить столбец». Появится диалоговое окно «Определение столбца» (рис. П.3.10), щелкнуть по стрелке справа в поле «Имя поля» — для его раскрытия; найти с помощью бегунка нужный столбец.

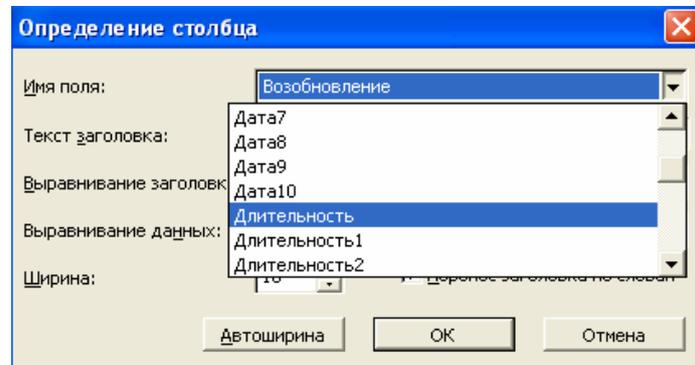


Рис. П.3.10. Окно «Определение столбца»

Щелкнуть по нужному столбцу, а затем — «ОК». Выбранный столбец появится в таблице перед указанным.

Создание связи между двумя и более задачами можно выполнить другим способом: щелкнуть по пункту главного меню «Вид». Появится выпадающее меню; щелкнуть по пункту «Диаграмма Ганта» и в выпадающем меню в левой части диаграммы выбрать задачи для связи. Для этого в столбце «Название задач» выбрать задачи в том же порядке, в котором они должны быть связаны. Чтобы выбрать несколько задач можно использовать клавишу «Shift». Для выбора нескольких задач вразброс — «Ctrl». Щелкнуть по кнопке «Связать задачи» на панели инструментов (третья строка сверху).

Для изменения связи между задачами нужно дважды щелкнуть по линии связи между задачами, которую необходимо изменить. Появится диалоговое окно «Зависимость задач». Допустим, что в нашей задаче мы дважды щелкнули по связи, идущей от задачи «Бетонирование» до задачи «Установка фундаментного блока» (рис. П.3.11).

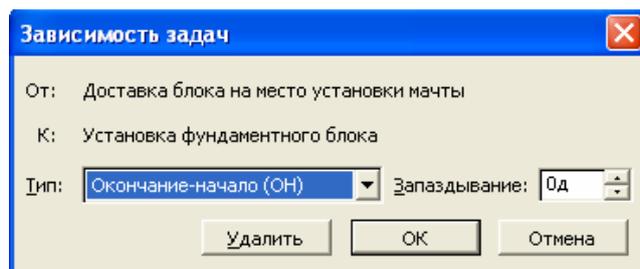


Рис. П.3.11. Диалоговое окно «Зависимость задач»

В поле «От:» указывается название задачи, от которой отходит связь. В поле «К:» — название задачи, к которой подходит связь. В раскрывающемся списке под названием «Тип»: можно выбрать другой тип связи между задачами: «Окончание—Начало» (ОН); «Начало—Начало» (НН); «Окончание—Окончание» (ОО); «Начало—Окончание» (НО); (Нет). В текстовом поле «Запаздывание»: устанавливаются число дней, связанное с запаздыванием выполнения работы. По умолчанию оно равно 0 дней. Чтобы удалить связь между задачами, надо щелкнуть по кнопке «Удалить» в диалоговом окне «Зависимость задач». Для подтверждения — «ОК», в противном — «Отмена».

Планирование хода выполнения задач может быть достигнуто путем расчета начальных и конечных дат выполнения каждой задачи проекта на основе их длительностей и связей между задачами. При необходимости можно самостоятельно устанавливать определенную начальную или конечную дату выполнения задачи. Для этого необходимо выбрать в столбце «Название задач» задачу, для которой требуется установить начальную или конечную дату; щелкнуть по кнопке «Сведения о задаче», расположенной в инструментальной панели. Появится диалоговое окно «Сведения о задаче» с множеством вкладок; щелкнуть по вкладке «Дополнительно». В текстовом поле «Тип ограничения» раскрыть список, щелкнув по стрелке в правой части поля. Раскрывающийся список включает следующие типы ограничений: «Как можно позже»; «Как можно раньше»; «Начало не позднее»; «Начало не ранее»; «Окончание не позднее»; «Окончание не ранее»; «Фиксированное начало»; «Фиксированное окончание».

Выбрать тип ограничения и в поле со списком «Дата ограничения» ввести или выбрать дату. Результаты ввода показаны на рис. П.3.12.

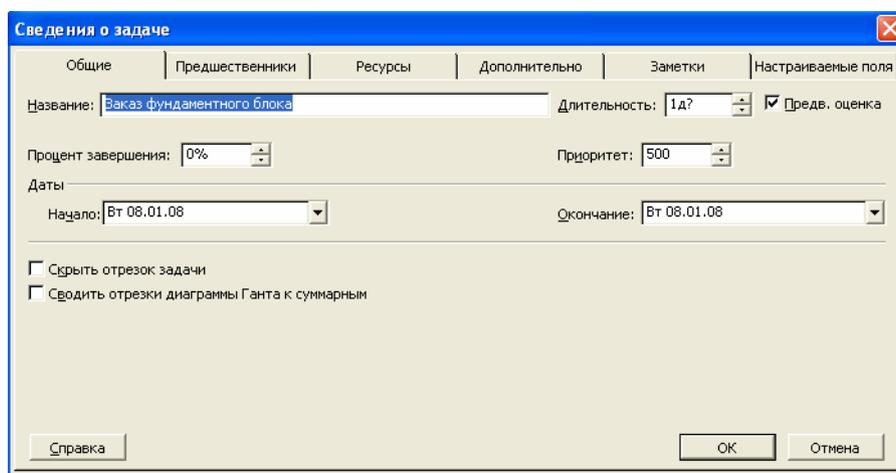


Рис. П.3.12. Диалоговое окно «Сведения о задаче»

Для установки конкретных дат начала и окончания задач используются поля диаграммы Ганта: «Начало» и «Окончание» (рис. П.3.13.)

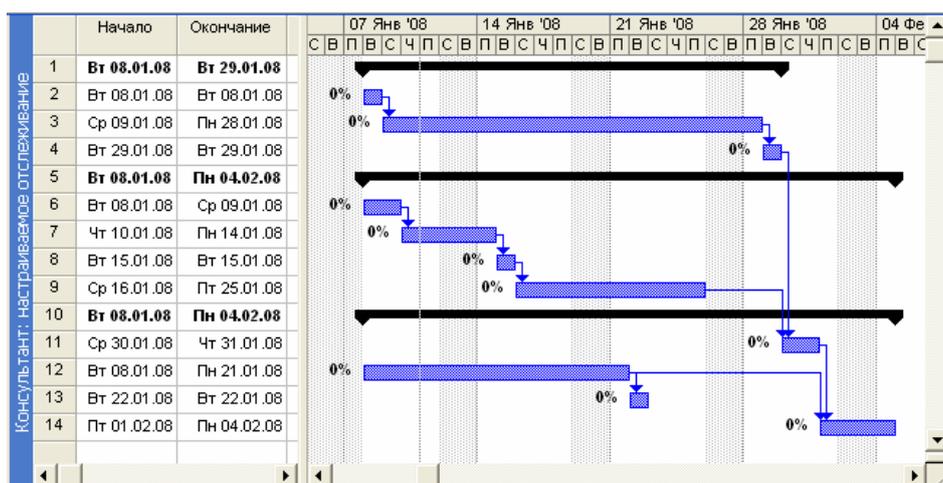


Рис. П.3.13. Столбцы установки конкретных дат начала и окончания задач в диаграмме Ганта

Если установить курсор на любой задаче графика Ганта, находящегося в правой части диаграммы Ганта, то появится окно сообщений с более подробными данными о данной задаче с названием задачи, временем начала и окончания и длительностью ее выполнения.

При любом изменении начала или окончания выполнения той или иной задачи автоматически пересчитывается весь проект и показывается новый график, расположенный в правой части диаграммы Ганта.

В приложении приведены лишь необходимые для первого знакомства примеры и описания утилит пакета. Существует множество приемов, с помощью которых можно переносить информацию о ходе выполнения проектов из MS Project в другие пакеты, такие как VPWin или Excel. Объединение пакетов различного предназначения в значительной мере увеличивает возможности такого симбиоза, дополняя процесс проектирования продвинутыми современными технологиями, повышающими качество его реализации.

## Словарь терминов и понятий

*Абстрактные модели* — модели, полученные на основе теоретического анализа в виде дескриптивных соотношений.

*Адаптация (аккомодация)* — приспособление системы к изменяющимся внешним и внутренним условиям.

*Апостериорная оценка* — оценка, формируемая после опыта на основании информации, полученной в результате опыта.

*Априорная оценка* — оценка, формируемая до опыта на основании предварительной информации.

*Балансовый метод* — метод взаимного сопоставления ресурсов и потребностей в них, используемый в практике управления.

*Воздействие управляющее* — воздействие органа управления на объект управления с целью перевода его в желательное состояние.

*Восприимчивость управляемой системы* — способность системы принимать воздействие определенной силы.

*Генетическая структура* или *генотип гомеостатической системы* — ограниченное множество, границы которого определяются теми значениями параметров, которые можно получать из исходного без введения новых компонентов и состояний, не предусмотренных существующей структурой, в пределах которого система может принимать состояния в процессе адаптации.

*Глобальный вектор приоритетов* — приоритеты альтернатив с учетом относительных весов всех предшествующих критериев. Каждом возможному решению ставится в соответствие положительное число — приоритет в виде соответствующей компоненты глобального вектора.

*Гомеостатическая система* — система, у которой, несмотря на влияние изменений в окружающей среде, функциональное состояние остается неизменным.

*Готовая продукция* — продукция основного и вспомогательного производства, предназначенная для реализации.

*Дисперсионный коэффициент конкордации* — мера согласованности суждений группы экспертов, вычисляемая на основании результатов ранжировки объектов группой экспертов.

*Дисперсия случайной величины* — мера разброса ее распределения, являющаяся вторым моментом отклонения от математического ожидания.

*Доход* — денежные средства и материальные ресурсы, получаемые юридическими и физическими лицами в результате их деятельности.

*Задача линейного программирования* — поиск минимума линейной формы при наличии ограничений, заданных линейными уравнениями (неравенствами).

*Затраты* — ресурсы, необходимые для производства продукции (работ, услуг).

*Имитационная модель* — динамическое представление системы путем продвижения ее от одного состояния к другому по характерным для нее операционным правилам.

*Индекс согласованности* — количественная оценка противоречивости результатов сравнений в матрице сравнений. Противоречия в сравнениях возникают из-за субъективных ошибок экспертов. Индекс согласованности не зависит от шкал сравнений, но зависит от количества парных сравнений. Это положительное число. Чем меньше противоречий в сравнениях, тем меньше значение индекса согласованности. При использовании способа сравнений с эталоном значение индекса согласованности равно нулю.

*Исследование операций* — дисциплина, охватывающая совокупность близких методов, в которых за основу исследования принимаются работы, выполняемые системой в процессе ее функционирования, а состояния системы и значения ее параметров рассматриваются как результаты выполняющихся работ.

*Качество продукции* — совокупность свойств продукции, обеспечивающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

*Квазислучайные числа* — числа, процесс вычисления которых детерминирован, но сгенерированы таким образом, что являются близкими к случайным числам с заданным законом распределения.

*Квантование по времени* — идеализация, при которой время в системе измеряется не календарным ходом, а дискретными событиями производственного цикла, происходящими в определенные моменты.

*Кибернетика* — наука об общих законах управления, прежде всего об информации и связи, безотносительно к природе управляемого объекта.

*Кибернетические экстремальные системы управления* — системы, которые обеспечивают поддержание показателя качества в некоторой окрестности его экстремального значения, изменяющегося под воздействием внешних условий.

*Контроль* — функция управления, устанавливающая степень соответствия принятых решений фактическому состоянию системы, выявляющая отклонения и их причины.

*Коэффициент ранговой корреляции* — мера зависимости между ранжировками, выполненными двумя экспертами.

*Коэффициенты относительной важности целей* — заданные величины приоритетов для всей совокупности целей, дающие в сумме единицу.

*Критерий регулярности* — критерий, используемый для оценки адекватности самоорганизующихся моделей.

*Локальный вектор приоритетов (ЛВП)* — вычисляется в предположении, что объекты данного уровня иерархии графовой модели системы являются альтернативами. Приоритеты в компонентах ЛВП количественно характеризуют важность каждого объекта относительно других на том же уровне.

*Массив информации* — совокупность однородных записей, рассматриваемых как одно целое и упорядоченных таким образом, что их описание (набор индексов) однозначно определяет положение каждого элемента и путь доступа к нему.

*Математические модели* — это модели в виде логических соотношений или алгоритмов численных соотношений в виде таблиц или законов распределения, определяющих количественные соотношения между параметрами входа и выхода.

*Математическое ожидание* — взвешенная по вероятности средняя величина всех возможных значений.

*Метод анализа иерархий* — процедура, связанная с неопределенностью выбора вариантов из-за противоречивости критериев, участвующих в достижении цели. Этот метод позволяет лицу, принимающему решение, сделать правильный выбор с использованием формальных и неформальных приемов и состоит в декомпозиции проблемы на более простые части, обработке суждений экспертов по специальному алгоритму.

*Метод фазовой плоскости* — метод косвенного исследования изменения параметров состояния системы, основанный на исследовании траектории движения изображающей точки в фазовом пространстве, осями координат которого в двумерном случае, например, являются регулируемая величина и скорость ее изменения либо ошибка системы и скорость изменения этой ошибки.

*Надежность системы* — свойство системы сохранять способность достижения поставленных целей с выполнением требований к качеству функционирования.

*Нестационарный случайный процесс* — случайный процесс, показатели распределения которого со временем изменяются.

*Обработка данных* — процесс приведения данных к виду, необходимому для дальнейшего использования.

*Обратная связь* — подача выходного параметра какого-либо элемента в неизменном или преобразованном виде на вход того же элемента.

*Обучающая и проверяющая последовательности* — последовательности фактически наблюдаемых точек, в которых определяется или проверяется адекватность параметров модели.

*Обучение* — процесс, способствующий самоприспособлению системы к внешней среде, соответствующий возможностям ее генетической структуры.

*Операторная запись* — алгебраическое уравнение, получаемое из исходного дифференциального уравнения путем замены операторов дифференцирования на комплексное число, степень которого равняется порядку заменяемой производной.

*Оптимально организованные гомеостатические системы* — системы, которые для обеспечения стабильности в достижении назначенных целей потребляют минимально возможные величины затрат.

*Отказ* — в общем смысле применительно к производственным системам — это невыполнение объектом управления команды субъекта управления; в узком смысле применительно к строительному производству под отказом понимается невыполнение любой позиции планового задания, сформированной в процессе управления и обеспечивающей достижение конечной цели в соответствии с установленным критерием.

*Относительная согласованность матрицы сравнений* — отношение индекса согласованности к среднестатистическому значению индекса согласованности при случайном выборе коэффициентов матрицы сравнений. Относительная согласованность для системы в целом характеризует взвешенное среднее значение относительной согласованности по всем матрицам сравнений. Данные можно считать согласованными, если значение относительной согласованности меньше чем 0,1.

*Отрицательная обратная связь* — вычитание из входного параметра значения параметра, подающегося на вход в виде обратной связи. Используется в управлении для обеспечения устойчивости функционирования.

*Парные сравнения* — количественные оценки отношения приоритета одного объекта к приоритету другого в виде матрицы сравнений. Цель парных сравнений — вычисление вектора приоритетов.

*Поиск информации* — совокупность логических и технических операций, конечной целью которых является извлечение из массива документов нужной информации или документа по заданным признакам.

*Положительная обратная связь* — суммирование входного параметра и значения параметра, подающегося на вход в виде обратной связи. Эта связь приводит к обострению и движение системы становится неустойчивым.

*Поток информации* — совокупность сообщений, циркулирующих в системе, необходимых для осуществления процессов управления.

*Принцип внешнего дополнения* — корреляция управляющего воздействия по отношению к возмущающему воздействию.

*Рекурсивная формула* — формула, с помощью которой на основании  $i$ -го события определяется событие  $(i + 1)$ .

*Решетчатая функция* — функция, принимающая новые значения только на границе временного интервала и сохраняющая внутри этого интервала значения, принятые в его начале.

*Связь* — наличие влияния одного узла на другой в графовой модели. С точки зрения теории графов связь — это дуга направленного графа. Связь одного узла-критерия с другим означает приоритетную направленность их влияний на выбор.

*Синергетика* — наука о самоорганизации систем. Новое междисциплинарное направление научных исследований, в рамках которого изучаются процессы перехода от хаоса к порядку и обратное (процессы самоорганизации) в открытых нелинейных средах самой различной природы.

*Система с обратными связями* — если модель системы имеет такие уровни, что из одного узла этого уровня можно попасть в другой узел того же уровня, то система имеет обратные связи. Такие системы могут обладать свойством самоорганизации.

*Системный анализ* — продвинутая методология управления с математическим аппаратом и ЭВМ. С успехом применяется для оптимизационных задач в планировании и стратегии управления по нескольким критериям. Методы решения многокритериальных проблем разработаны в системном анализе в контексте задач выбора как основной концепции принятия управленческих решений.

*Спорадическая величина* — случайно кратковременно возникающая и самопроизвольно исчезающая величина.

*Среднеквадратическое отклонение случайной величины* — корень квадратный из ее дисперсии.

*Степень устойчивости* — мера запаса устойчивости системы и времени окончания переходного процесса, определяемая действительной частью ближайшего к мнимой оси комплексного корня характеристического уравнения.

*Структура диссипативная* — структура, возникающая в результате процесса самоорганизации, для осуществления которого необходим противоположный рассеивающий (диссипативный) фактор.

*Структура нестационарная* — эволюционирующая структура, способная к росту, усложнению и подверженная распаду.

*Структура сложная* — структура, построенная из нескольких простых структур. Используется при декомпозиции для принятия решений.

*Структура стационарная* — устойчивая, неразвивающаяся структура, т. е. структура, которая представляет собой один из устойчивых полюсов эволюции открытой системы.

*Узел* — с математической точки зрения ситуация принятия решения с использованием структурной модели в виде графа, где узел является основным элементом его структуры.

*Уровень иерархии* — множество равноправных узлов. Название уровня отражает ситуацию принятия решения. Узел определяется названием уровня, которому он принадлежит.

*Устойчивость системы* — свойство системы приходиться к новому установившемуся состоянию после окончания переходного процесса, вызванного каким-либо возмущающим или управляющим воздействием.

*Устойчивость вектора приоритетов* — качественная характеристика чувствительности значений приоритетов к малым изменениям данных или структуры модели. Чем меньше чувствительность значений приоритетов, тем больше обоснованность использования этих приоритетов для поддержки принятия решения. Если при малых изменениях данных или структуры рейтинг изменяется несущественно, то он считается устойчивым.

*Фазовая траектория* — траектория движения точки, изображающей состояние системы в фазовом пространстве.

*Фазовый портрет системы* — совокупность ее фазовых траекторий. Позволяет визуализировать процессы функционирования системы и ее эволюцию.

*Форма документа* — совокупность реквизитов, расположенных в определенной последовательности в документе.

*Цель управления* — оптимизация некоторой функции по ряду значений параметров (критериев) и промежуточных целей.

*Цикл жизни данных* — время, по истечении которого теряется полезность данных, используемых в процессе управления.

*Черный ящик* — укрупненное представление производственной системы как объекта управления в виде непрозрачного объекта, внутрь которого нельзя проникнуть и установить таким путем связь его выходов со входами.

*Шкала сравнений* — упорядоченный набор чисел для выражения результатов парных сравнений. Шкала сравнений позволяет выразить оценки отношений значений приоритетов объектов, поэтому ее деления — безразмерные величины. Шкалы, используемые в методе анализа иерархий, являются шкалами отношений, когда результату сравнения пары объектов ставится в соответствие значение — оценка «весов» объектов.

*Экстремальные адаптивные системы* — системы, которые осуществляют в процессе приспособления к изменяющимся условиям среды поиск оптимума (максимума или минимума) некоторого параметра.

Учебное электронное издание

**Салугин Александр Николаевич**

**ВВЕДЕНИЕ В СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ.  
МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Учебное пособие

Начальник РИО *М. Л. Песчаная*

Редактор *О. А. Шипунова*

Компьютерная правка и верстка *А. Г. Сиволобова*

Минимальные систем. требования:

PC 486 DX-33; Microsoft Windows XP; Internet Explorer 6.0; Adobe Reader 6.0.

Подписано в свет 12.01.2015.

Гарнитура «Таймс». Уч.-изд. л. 13,8. Объем данных 5,6 Мбайт.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»

Редакционно-издательский отдел

400074, Волгоград, ул. Академическая, 1

<http://www.vgasu.ru>, [info@vgasu.ru](mailto:info@vgasu.ru)