

Н. П. САДОВНИКОВА

Д. С. ПАРЫГИН

М. В. ЩЕРБАКОВ

**СИСТЕМЫ
ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин
М. В. Щербаков

СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Учебное пособие



Волгоград
2021

Рецензенты:

кафедра «Информационные системы и математическое моделирование»
Волгоградского института управления – филиала Российской академии
народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ,
зав. кафедрой канд. техн. наук, доцент *О. А. Астафурова*;
профессор кафедры «Методика преподавания математики и физики, ИКТ»
Волгоградского государственного социально-педагогического университета,
д-р пед. наук *Т. М. Петрова*

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Садовникова, Н. П.

Системы поддержки принятия решений : учеб. пособие / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, М. В. Щербаков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – 108 с.

ISBN 978-5-9948-4004-7

Представлены основные положения теории принятия решений и рассмотрены вопросы, связанные с разработкой систем поддержки принятия решений (СППР). Приведена классификация СППР и примеры архитектур для различных типов СППР.

Предназначено для студентов факультета электроники и вычислительной техники очной и заочной форм обучения.

Ил. 11. Табл. 4. Библиогр.: 46 назв.

ISBN 978-5-9948-4004-7

© Волгоградский государственный
технический университет, 2021
© Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин
М. В. Щербаков, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	7
1.1. Основные понятия теории принятия решений. Классификация методов принятия решений	7
1.2. Методы принятия решений	12
1.3. Элементы теории измерений.....	15
1.4. Принятие решений в условиях неопределенности	21
1.4.1. Принятие решений с неизвестными вероятностями исходов.....	22
1.4.2. Принятие решений с известными вероятностями исходов.....	23
1.4.3. Дерево решений.....	24
1.5. Математические модели многокритериальной оптимизации	25
1.5.1. Оптимальность по Парето	26
1.5.2. Иерархические методы многокритериальной оптимизации	27
1.6. Нечеткие модели принятия решений	30
1.6.1. Принятие решений в нечетких условиях по схеме Беллмана – Заде...	31
1.6.2. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов	32
Вопросы к главе 1	34
ГЛАВА 2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ.....	35
2.1. Методологии решения проблем на основе системного анализа	35
2.2. Управление решениями	41
Вопросы к главе 2.....	44
ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ....	45
3.1. Классификация систем поддержки принятия решений	47
3.2. СППР на основе данных.....	48
3.3. СППР на основе моделей	55

3.3.1. СППР на основе онтологии.....	60
3.3.2. Мультиагентные модели в СППР.....	62
Вопросы к главе 3	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	67
<i>Приложение 1. Лабораторная работа № 1. Постановка задачи принятия решений и экспертное оценивание</i>	<i>71</i>
<i>Приложение 2. Лабораторная работа № 2. СППР на основе анализа данных.....</i>	<i>76</i>
<i>Приложение 3. Лабораторная работа № 3. Реализация сценариев поведения в СППР (когнитивные карты)</i>	<i>83</i>
<i>Приложение 4. Лабораторная работа № 4. Задачи принятия решений в условиях риска.....</i>	<i>90</i>
<i>Приложение 5. Лабораторная работа № 5. Задачи выбора альтернатив с использованием метода анализа иерархий (МАИ)</i>	<i>96</i>
<i>Приложение 6. Лабораторная работа № 6. Методы генерации идей</i>	<i>101</i>
<i>Приложение 7. Методические указания к контрольной работе «Разработка СППР»</i>	<i>108</i>

ВВЕДЕНИЕ

Системы поддержки принятия решений используются для обеспечения задач различных уровней управления и помогают людям принимать решения в сложных ситуациях. Совершенствование инструментов анализа ситуаций и принятия решений приводят к появлению новых подходов в организации деятельности, которые должны соответствовать новым условиям и характеризуются постоянным повышением динамичности процессов, сложностью вариантов принимаемых решений, высоким уровнем неопределенности исследуемых явлений. Существенно увеличились возможные риски, масштабы и размеры потерь, которые могут возникнуть при принятии недостаточно обоснованных решений. Как следствие, увеличилась ответственность человека за принятие «неправильного» решения, возросли трудности, связанные с его нахождением, преодолеть которые невозможно без использования новых методов анализа информации и моделирования ситуаций.

Современные тенденции развития методологии поддержки принятия решений связаны с интеллектуальным анализом данных и искусственным интеллектом. С каждым годом появляется все больше сфер деятельности, в которых внедряются подходы, ориентированные на работу с большими массивами разнородных данных и извлечением знаний, созданием систем управления на основе данных (от англ. «Data Driven Decision»).

Умение работать с разными математическими методами и моделями поддержки принятия решений является одной из наиболее перспективных и востребованных компетенций ближайшего времени.

Целью создания данного пособия является ознакомление студентов и других заинтересованных лиц с методами и моделями поддержки принятия решений, принципами разработки программных систем, которые

позволяют решать задачи, связанные с анализом ситуаций, прогнозированием, принятием решений.

В первой главе рассмотрены основные понятия теории принятия решений. Приведены примеры постановки задач принятия решений. Представлены наиболее востребованные методы принятия решений, прежде всего те, которые дают возможность учитывать многокритериальность и неопределенность.

Вторая глава посвящена вопросам применения системного подхода для решения проблем. В ней рассмотрены системные представления процесса принятия решений и приведены основные положения методологий решения проблем С. Оптнера и Р. Акоффа, которые стали основой для многих исследований в данной области.

В третьей главе представлены результаты анализа современных подходов к построению систем поддержки принятия решений. Рассмотрена их классификация и приведены примеры реализации СППР на основе наиболее известных технологий.

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

1.1. Основные понятия теории принятия решений.

Классификация методов принятия решений

Теория принятия решений стала складываться в середине XX века в рамках методологии системного анализа, хотя самые первые работы по исследованию голосования как способа коллективного выбора появились еще в XVII веке. Основное назначение теории принятия решений – разработка методов и средств, позволяющих одному человеку или группе лиц сформулировать множество возможных вариантов решения проблемы, сравнить их между собой, найти среди них лучшие или допустимые варианты, которые удовлетворяют тем или иным требованиям, и при необходимости объяснить сделанный выбор.

Теория принятия решений – область исследования, вовлекающая понятия и методы математики, статистики, экономики, менеджмента и психологии с целью изучения закономерностей выбора людьми путей решения проблем и задач, а также способов достижения желаемого результата. Различают нормативную теорию, которая описывает рациональный процесс принятия решения и дескриптивную теорию, описывающую практику принятия решений.

Реализация процесса принятия решения, при котором не учитываются психологические аспекты поведения людей на отбор окончательного решения, происходит на основе нормативных моделей принятия решений. Эти модели принятия решений, как правило, реализуют концепцию максимальной полезности.

В соответствии с концепцией максимизации полезности лицо принимающее решение (ЛПР) ставит задачу поиска наилучшего (оптимального) решения среди всех возможных в соответствии с

выбранным заранее критерием, направленным на максимизацию полезности.

Условиями применения нормативных моделей являются [1]:

- наличие информации – достоверной, необходимой и достаточной;
- использование известных (нормативных) правил (алгоритмов, методов) построения альтернативных решений и выбора окончательного из них.

Предполагается, что последствия каждой из рассматриваемых альтернатив могут быть просчитаны, а концепция максимальной полезности направлена на поиск оптимального решения.

Существуют другие концепции принятия решений, например, концепция ограниченной рациональности, предложенная лауреатом Нобелевской премии по экономике Г. Саймоном [2]. Данная концепция основана на возможности реализации такой психологической особенности человека, как способность принимать решения, трудно сопоставимые или практически несопоставимые по совокупности критериев в условиях неопределенности и в условиях ограниченного времени [1].

Данная концепция также может быть реализована и для нормативных моделей, например, когда выбирается не одна оптимальная альтернатива, а множество, удовлетворяющих определенным требованиям. При этом следует учитывать, что в нормативных моделях правила отбора альтернатив известны заранее, а уровень притязаний ЛПР задается отклонением искомых альтернатив именно от оптимальной.

Предпосылками и условиями применения дескриптивных моделей являются неполнота или избыточность информации, а также отсутствие известных заранее правил предпочтения (правил отбора альтернатив) и способов (методов расчета) оценки возможных последствий их реализации [1]. В дескриптивных моделях принятия решений существенным является – поведение ЛПР и система взглядов, в соответствии с которой

формируется окончательное решение. В таких моделях используется концепция ограниченной рациональности, которая направлена на поиск не оптимальной альтернативы, а той, которая, по мнению ЛПР, будет эффективной, т.е. будет отвечать его требованиям и притязаниям. Субъективный фактор оказывает влияние на правила предпочтения альтернатив и способ расчета критериев, на основе значения которых альтернативы ранжируются.

Формальная постановка задачи принятия решения

Задача принятия решения состоит в формировании множества возможных вариантов, обеспечивающих разрешение проблемной ситуации при существующих ограничениях, и выделении среди этих вариантов одного лучшего или нескольких предпочтительных вариантов, удовлетворяющих предъявляемым к ним требованиям. Формально задачу принятия решения D можно записать в следующем обобщенном виде [3]:

$$D = \{F, A, X, G, P\},$$

где F – формулировка задачи принятия решения, которая включает в себя содержательное описание стоящей проблемы и при необходимости ее модельное представление, определение цели или целей, которые должны быть достигнуты, а также требования к виду окончательного результата;

A – совокупность возможных вариантов (альтернатив), из которых производится выбор. Это могут быть реально существующие варианты, в качестве которых в зависимости от контекста задачи выступают объекты, кандидаты, способы достижения цели, действия, решения и т.п., либо гипотетическое множество всех теоретически возможных вариантов, которое может быть даже бесконечным. Выбор возникает только тогда, когда имеется не менее двух возможных вариантов решения проблемы;

X – совокупность признаков (атрибутов, параметров), описывающих варианты и их отличительные особенности. В качестве признаков

выступают, во-первых, объективные показатели, которые характеризуют те или иные свойства, присущие вариантам, и которые, как правило, можно измерить; во-вторых, субъективные оценки, которые обычно даются по специально отобраным или сконструированным критериям, отражающим важные для участников выбора черты вариантов;

G – совокупность условий, ограничивающих область допустимых вариантов решения задачи. Ограничения могут быть описаны как содержательным образом, так и заданы в виде некоторых формальных требований к вариантам и/или их признакам. Например, это могут быть ограничения на значения какого-либо признака или различная степень характерности (выраженности) признака для тех или иных вариантов, или невозможность одновременного сочетания определенных значений признаков для реально существующих вариантов;

P – предпочтения одного или нескольких ЛПР, которые служат основой для оценки и сравнения возможных вариантов решения проблемы, отбора допустимых вариантов и поиска наилучшего или приемлемого варианта. Достаточно часто для упрощения постановки задачи принятия решения часть информации, описывающей предпочтения ЛПР, превращается в ограничения.

В процессе принятия решений практически всегда возникает неопределенность. Она может быть связана с неполнотой знаний о проблеме, по которой принимается решение; с невозможностью оценки последствий принимаемых решений и учета реакции окружающей среды, противоречивостью целей и пр.

До последнего времени самым используемым способом снятия неопределенности было привлечение экспертов или руководителей, субъективное мнение которых становилось основой для определения критериев и выбора альтернатив. Методология многокритериальной оптимизации основана на принципе множества возможных решений. В

этом случае объективная составляющая остается в виде ограничений связанных с конкретной задачей.

Типичная задача принятия решений подразумевает:

– выявление предпочтений ЛПР, т.е. выявление и ранжирование приоритетов, учет неопределенности в оценках ЛПР и формирование его предпочтений;

– генерацию возможных решений, т.е. формирование списка альтернатив;

– оценку возможных альтернатив, исходя из предпочтений ЛПР и ограничений, накладываемых внешней средой;

– анализ последствий принимаемых решений;

– выбор лучшего, с точки зрения ЛПР, варианта.

Формальные методы принятия решения могут оказаться полезными при следующих обстоятельствах:

1. Существует некоторая проблема или проблемная ситуация, требующая своего разрешения. Нередко желаемый результат решения проблемы отождествляется с одной или несколькими целями, которые должны быть достигнуты при разрешении проблемной ситуации.

2. Имеется несколько различных вариантов решения проблемы, способов достижения цели, действий, объектов, среди которых производится выбор. Эти варианты в теории принятия решений часто называют альтернативами. Если существует только одна возможность и выбор отсутствует, то нет и задачи принятия решения.

3. Присутствуют факторы, накладывающие определенные ограничения на возможные пути решения проблемы, достижения цели. Эти факторы определяются контекстом решаемой проблемы и могут иметь различную природу: физическую, техническую, экономическую, социальную и прочую.

4. Имеется человек или группа лиц, которые заинтересованы в разрешении проблемы, имеют полномочия для выбора того или иного варианта решения и несут ответственность за выполнение принятого решения.

Классификация задач принятия решений

Одна из возможных классификаций задач принятия решений приведена на **рисунке 1**.



Рис. 1. Классификация задач принятия решений

1.2. Методы принятия решений

Из множества известных методов и подходов к принятию решений наибольший интерес представляют те, которые дают возможность учитывать многокритериальность и неопределенность, а также позволяют осуществлять выбор решений из множества альтернатив различного типа при наличии критериев, имеющих разные типы шкал. В **таблице 1** приведена одна из возможных классификаций [4].

Табл. 1. Классификация методов принятия решений

№	Содержание информации	Тип информации	Метод принятия решений
1	Экспертная информация не требуется		Метод доминирования Метод на основе глобальных критериев
2	Информация о предпочтениях на множестве критериев	Качественная информация Количественная оценка предпочтительности критериев Количественная информация о замещениях	Лексикографическое упорядочение Сравнение разностей критериальных оценок Метод припасовывания Методы «эффективность–стоимость» Методы свертки на иерархии критериев Методы порогов Методы идеальной точки Метод кривых безразличия Методы теории ценности
3	Информация о предпочтительности альтернатив	Оценка предпочтительности парных сравнений	Методы математического программирования Линейная и нелинейная свертка при интерактивном способе определения ее параметров
4	Информация о предпочтениях на множестве критериев и о последствиях альтернатив	Отсутствие информации о предпочтениях; количественная и/или интервальная информация о последствиях. Качественная информация о предпочтениях и количественная о последствиях Качественная (порядковая) информация о предпочтениях и последствиях Количественная информация о предпочтениях и последствиях	Методы с дискретизацией неопределенности Стохастическое доминирование Методы принятия решений в условиях риска и неопределенности на основе глобальных критериев Метод анализа иерархий Методы теории нечетких множеств Метод практического принятия решений Методы выбора статистически ненадежных решений Методы кривых безразличия для принятия решений в условиях риска и неопределенности Методы деревьев решений Декомпозиционные методы теории ожидаемой полезности

Задачи принятия решений в условиях определенности

К этому классу относятся задачи, для решения которых имеется достаточная и достоверная количественная информация. В этом случае с успехом применяются методы математического программирования, суть которых состоит в нахождении оптимальных решений на базе математической модели реального объекта. Основные условия применимости методов математического программирования следующие [4]:

1) задача должна быть хорошо формализована, т. е. имеется адекватная математическая модель реального объекта;

2) существует некоторая единственная целевая функция (критерий оптимизации), позволяющая судить о качестве рассматриваемых альтернативных вариантов;

3) имеется возможность количественной оценки значений целевой функции;

4) задача имеет определенные степени свободы (ресурсы оптимизации), т.е. некоторые параметры функционирования системы, которые можно произвольно изменять в некоторых пределах в целях улучшения значений целевой функции.

Задачи принятия решений в условиях риска и неопределенности

В тех случаях, когда возможные исходы можно описать с помощью некоторого вероятностного распределения, получаем задачи принятия решений в условиях риска. Для построения распределения вероятностей необходимо либо иметь в распоряжении статистические данные, либо привлекать знания экспертов. Обычно для решения задач этого типа применяются методы теории одномерной или многомерной полезности. Эти задачи занимают место на границе между задачами принятия решений

в условиях определенности и неопределенности. Для решения этих задач привлекается вся доступная информация (количественная и качественная).

Если информация, необходимая для принятия решений, является неточной, неполной, а формальные модели исследуемой системы либо слишком сложны, либо отсутствуют, то для решения задачи привлекаются знания экспертов, которые выражены в виде некоторых количественных данных, называемых предпочтениями.

1.3. Элементы теории измерений

В процессе принятия решений формируются ситуации, цели, ограничения, варианты решений и производятся измерения их характеристик. Эти измерения могут носить качественный или количественный характер, могут быть объективными или субъективными.

Теория измерений – это теория о классификации переменных величин по природе информации, которая содержится в числах – значениях этих переменных величин. Происхождение переменной величины накладывает ограничения на множество действий, которые можно производить с этой величиной. Иными словами, для каждой переменной величины существует *класс допустимых преобразований (КДП)*, которые корректно применимы ко всем значениям этой величины [5].

Объективные качественные или количественные измерения производятся измерительными приборами, действие которых основано на использовании физических законов. Теория объективных измерений достаточно хорошо разработана [6].

Субъективные измерения производятся человеком, который выполняет как бы роль измерительного прибора. Естественно, что при этом на результаты измерений влияют психологические особенности мышления человека.

Процедура сравнения объектов по определенным признакам называется *измерением*. Объектами могут быть предметы, явления, события, решения и т.п. В качестве показателей сравнения объектов используются пространственные, временные, физические, физиологические, социологические, психологические и другие свойства и характеристики объектов.

Процедура сравнения включает определение отношений между объектами и способ их сравнения. Отношения между объектами, могут быть определены, например, следующим образом: «больше», «меньше», «равны», «хуже», «предпочтительнее» и т.д.

Для формального описания множества объектов и отношений между ними при фиксированных показателях сравнения вводится понятие *эмпирической системы с отношениями*:

$$M = \langle X, R \rangle,$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ – множество объектов, в качестве которых могут рассматриваться, например, ситуации, цели, решения и т. п.; $R = (R_1, R_2, \dots, R_s)$ – множество отношений между объектами.

Шкалой называется совокупность эмпирической системы M , числовой системы N и отображения f :

$$\Pi = \langle M, N, f \rangle.$$

Один и тот же объект эмпирической системы x_i может быть отображен разными числами с помощью разных шкал, различающихся функциями отображения:

$$c'_i = f1(x_i), c''_i = f2(x_i), \dots$$

В зависимости от вида и свойств функции отображения f различают типы шкал измерений.

Шкала наименований (номинальная шкала) используется для идентификации объектов, а также для описания принадлежности объектов к определенным классам. В этой шкале допустимыми являются все

взаимно-однозначные преобразования. В данной шкале отсутствуют понятия масштаба и начала отсчета. Пол людей, национальность, номера автомашин, паспортов, ИНН, измерены в шкале наименований.

В порядковой шкале числа используются не только для различения объектов, но и для установления порядка между объектами. Для порядковой шкалы функцией отображения f является любой монотонный ряд чисел. Числа в шкале определяют порядок следования объектов и не показывают, на сколько или во сколько раз один объект предпочтительнее другого. В этой шкале также отсутствуют понятия масштаба и начала отсчета. Измерительная информация, полученная по шкале порядка, не пригодна для математической обработки. Примерами измерения в порядковой шкале могут быть оценки успеваемости, баллы землетрясения и шторма, стадии болезни и пр.

Шкалы наименований и порядка являются *качественными* шкалами, в них нет понятия начала отсчета и масштаба измерения. В шкале наименований описывается различие или эквивалентность объектов, а в шкале порядка – качественное превосходство, отличие объектов.

Шкала интервалов применяется для отображения величины различия между свойствами объектов. При экспертном оценивании шкала интервалов применяется для оценки полезности объектов. Основным свойством шкалы интервалов является равенство интервалов. Интервальная шкала может иметь произвольные точки отсчета и масштаб. Функцией отображения f для шкалы интервалов является линейное преобразование $f(x) = ax + b$, где a – масштаб; b – начало отсчета. В этой шкале отношение разности чисел в двух числовых системах определяется масштабом измерения. По шкале интервалов измеряют температуру, величину потенциальной энергии или координату точки на прямой.

Шкала отношений является частным случаем шкалы интервалов при выборе нулевой точки отсчета: $b = 0$. Функцией отображения для

шкалы отношений является преобразование подобия: $f(x) = ax$. В этой шкале числа отражают отношения свойств объектов, т.е. во сколько раз свойство одного объекта превосходит это же свойство другого объекта. По шкале отношений измерены большинство физических единиц: масса тела, длина, заряд, а также цены в экономике.

Абсолютная шкала также является частным случаем шкалы интервалов. В этой шкале принимается нулевая точка отсчета и единичный масштаб. Функцией отображения для абсолютной шкалы является тождественное преобразование, т.е. $f(x) = x$. Это означает, что существует одно и только одно отображение объектов в числовую систему. Отсюда и следует название шкалы, так как для нее единственность отображения понимается в буквальном, абсолютном смысле. Абсолютная шкала применяется, например, для измерения количества объектов (предметов, событий, решений и т.п.). Количество объектов измеряется единственным образом с помощью натуральных чисел $1, 2, \dots, n$.

Шкалы интервалов, отношений, разностей и абсолютная шкала являются *количественными* шкалами.

Выбор той или иной шкалы для измерения определяется характером отношений между объектами системы, наличием информации об этих отношениях и целями принятия решения. Количественные шкалы требуют более полной информации об объектах по сравнению с качественными. Тем не менее, для многих задач (например, если требуется только упорядочить объекты) нет необходимости измерять количественные характеристики объектов, достаточно определить только качественные характеристики.

Методы субъективных измерений

При формировании ситуаций, целей, ограничений и вариантов решений ЛПР и эксперты производят объективные и субъективные

измерения характеристик достоверности, важности и предпочтительности. Для осуществления субъективных измерений применяются различные методы, наиболее употребительными из которых являются: *ранжирование, парное сравнение, непосредственная оценка и последовательное сравнение.*

Будем считать, что имеется конечное число измеряемых объектов $X = (x_1, \dots, x_m)$ и определен один или несколько признаков сравнения, по которым осуществляется сравнение свойств объектов. В этом случае, методы измерения будут различаться только процедурой сравнения объектов, которая включает: построение отношений между объектами системы, выбор отображающей функции f и определение типа шкалы измерений.

Ранжирование представляет собой процедуру упорядочения объектов, осуществляемую на основе знаний и опыта ЛПР или эксперта. Ранжируемые объекты располагаются в порядке предпочтения, им приписываются соответствующие числовые представления. Числовые представления должны удовлетворять условию – их последовательность должна быть монотонна и функция отображения совокупности упорядоченных объектов в числовое представление должна обладать свойством монотонности. Таким свойством функции отображения обладает шкала порядков, поэтому ранжирование объектов есть измерение в порядковой шкале. На практике чаще всего в качестве числового представления последовательности упорядоченных объектов используется натуральный ряд чисел, называемых *рангами*. При этом наиболее предпочтительному объекту присваивается ранг 1, а по мере убывания предпочтения значение ранга возрастает. Эквивалентным объектам присваиваются одинаковые ранги.

Ранжирование наиболее простой метод измерения, не требующий специальной подготовки и обучения экспертов. Существенным

недостатком этого метода является невозможность упорядочения большого числа объектов. При увеличении числа объектов увеличивается количество связей, анализ которых становится невозможным, уже начиная с 15–20 объектов, что приводит в результате к существенным ошибкам.

Процедура установления предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар называется **парным сравнением**. Парное сравнение, так же как и ранжирование, представляет собой измерение в порядковой шкале. В результате сравнения пары объектов x_i, x_j эксперт упорядочивает ее, например, так: если $x_i \succ x_j$, то $f(x_i) > f(x_j)$; если предпочтение в паре обратное, то $f(x_i) < f(x_j)$. Если объекты эквивалентны, то $f(x_i) = f(x_j)$.

При **непосредственной оценке** необходимо поставить в соответствие каждому объекту точку на определенном отрезке числовой оси. При этом эквивалентным объектам приписываются одинаковые числа. Измерения в шкале интервалов могут быть осуществлены с достаточной точностью при полной информированности ЛПР (экспертов) о свойствах объектов. Эти условия на практике встречаются редко, поэтому часто для измерения применяют *балльную оценку*. При этом вместо непрерывного отрезка числовой оси рассматривают участки, каждому из которых приписывается свой балл.

Последовательное сравнение представляет собой комплексную процедуру измерения, включающую как ранжирование, так и непосредственную оценку. При последовательном сравнении выполняются следующие операции:

- 1) ранжирование объектов;
- 2) оценка объектов на отрезке $[0,1]$, при условии, что числовая оценка первого в ранжировке объекта равна единице, т.е. $f(x_1) = 1$;
- 3) если первый объект превосходить по предпочтительности все остальные объекты вместе взятые, то увеличиваем значение числовой оценки первого объекта так, чтобы она стала больше суммы числовых

оценок остальных объектов, в противном случае изменяем величину $f(x_1)$ так, чтобы она стала меньше, чем сумма оценок остальных объектов;

4) если второй объект предпочтительнее, чем все последующие вместе взятые объекты, то изменяем $f(x_2)$ аналогично изменению $f(x_1)$ в п. 3;

5) продолжаем операцию сравнения предпочтительности последующих объектов и изменяем числовые оценки этих объектов в зависимости от предпочтений.

1.4. Принятие решений в условиях неопределенности

Сформулируем *общую постановку задачи принятия решений в условиях неопределенности*. Необходимо найти оптимальное решение – вариант $x^*=(x_1^*, \dots, x_n^*)$, который обеспечивает с учётом неопределённых факторов δ и ζ максимальные значения всех частных целевых функций (критериев оптимальности, показателей эффективности) на множестве $X^a \subseteq X$ допустимых значений: $y_k=f_k(x, \delta, \zeta, \zeta) \rightarrow \max$ и удовлетворяют ограничениям $g_q(x, \delta, \zeta, \zeta) \leq b_q, q = 1, \dots, p, k = 1, \dots, h$.

Следует выделять следующие *виды неопределенности*:

1. Неопределённость вызвана активными действиями нескольких участников процесса принятия решения, каждый из которых преследует свои цели и стремится получить для себя максимальные преимущества за счёт других.

2. Неопределённость может быть связана с принципиальной неизвестностью или недостаточной изученностью внешних обстоятельств, которые могут повлиять на выбор. Совокупность таких объективных обстоятельств принято называть природой, которая в данном контексте выступает в качестве нейтрального, не обладающего «разумом» участника, безразличного к действиям ЛПР и не пытающегося получить выгоду или причинить ущерб.

3. Неопределённость может быть обусловлена невозможностью чёткого описания на естественном языке ситуации выбора, анализируемых вариантов, ограничений на область допустимых значений, целевых показателей качества решения, предпочтений ЛПР, имеющихся зависимостей между элементами задачи выбора.

Для учета неопределенности при принятии решений используют вероятностные модели, теорию нечетких множеств, интервальную математику, теорию игр и пр.

1.4.1. Принятие решений с неизвестными вероятностями исходов

Правило максима – максимизируется максимальная прибыль. В каждой альтернативе находится исход с максимальным значением прибыли, и выбирается альтернатива, позволяющая получить самую большую прибыль.

Правило Вальда (максимина) – максимизируется минимальная прибыль. В каждой альтернативе находится исход с минимальным значением прибыли и выбирается альтернатива, позволяющая максимизировать прибыль в самых неудачных исходах.

Правило Сэвиджа (минимакса) – минимизируются максимально возможные потери. Составляется таблица возможных убытков или упущенной выгоды. В каждом столбце находится максимальная прибыль, затем находятся максимально возможные убытки всех альтернатив данного столбца путем вычитания из найденного максимума прибыли соответствующей альтернативы.

В каждой альтернативе находятся максимально возможные убытки. Выбирается альтернатива, соответствующая минимальному значению максимальных потерь.

Правило на основе принципа неопределенности Лапласа. В соответствие с этим правилом предполагается равновозможность всех

исходов, в силу этого выбирается альтернатива, которая дает максимальную среднюю прибыль.

Правило Гурвица – это компромиссный способ между осторожным правилом Вальда и оптимистичным правилом максимакса. При этом необходимо задать уровень пессимизма p – прогнозируемую вероятность худшего исхода (тогда оптимистический исход имеет вероятность $1 - p$). Решением является альтернатива, которая дает наибольшую средневзвешенную прибыль при учете только худшего и лучшего исходов с вероятностями p и $1-p$.

1.4.2. Принятие решений с известными вероятностями исходов

Если даны вероятности всех исходов, то в этом случае принимается решение в условиях риска. Понятия риска и неопределенности принципиально различаются, прежде всего, тем, что риск может быть измерен. Риск является интегральной характеристикой, сочетающей в себе оценки, как вероятностей реализации решения, так и его последствий.

Будем считать, что нам известна информация о состояниях среды E_1, \dots, E_d в виде матрицы $Y = \|y_{ij}\|_{m \times d}$ частной эффективности вариантов A_1, \dots, A_m , $y_{ij} = f_j(A_i)$; вероятность q_j состояния E_j , $\sum_j p_j = 1$.

Правило максимальной вероятности – максимизируется наиболее вероятная прибыль.

В соответствии с *правилом оптимизации математического ожидания* лучшим считается решение или с наибольшей ожидаемой прибылью, или с наименьшими возможными убытками.

Правило выбора Байеса-Лапласа можно интерпретировать следующим образом: матрица решений дополняется еще одним столбцом, содержащим математическое ожидание значений каждой из строк. Выбираются те варианты, в строках которых стоит наибольшее значение этого столбца.

При этом предполагается, что ситуация, в которой принимается решение, характеризуется следующими обстоятельствами:

- 1) вероятности появления исследуемого состояния известны и не зависят от времени;
- 2) решение реализуется (теоретически) бесконечно много раз;
- 3) для малого числа реализаций решения допускается некоторый риск.

Исследования процессов принятия решения в условиях риска привели к формированию в 1979 г. специальной концепции «теории перспектив» [7].

1.4.3. Дерево решений

Деревом решений называется графическое представление последовательности решений и исходов с указанием для любых их комбинаций соответствующих выигрышей и вероятностей.

«Ствол» и «ветви» дерева решений отображают структуру решаемой проблемы. Все решения и их исходы представлены на «ветвях». В каждой вершине дерева вычисляются *ожидаемые денежные оценки (ОДО)* и выбираются ветви, соответствующие максимальному значению ОДО.

Пример 1. Рассматривается вопрос о вложении средств в реализацию одного из двух проектов. Всего средств 30000 у.е. Планируемая прибыль первого проекта 15 %. Вероятность, что проект будет реализован 0,96. Реализация второго проекта гарантирована, но прибыль только 10 % год.

Дерево решений данной задачи приведено на [рисунке 2](#). Решение можно записать следующим образом:

- вкладывать в первый проект

$$(34500 \times 0,96 + 0 \times 0,04) - 30000 = 3120 \text{ у.е.};$$

- вкладывать во второй проект

$$(33000 \times 1,0 - 30000) = 3000 \text{ у.е.}$$

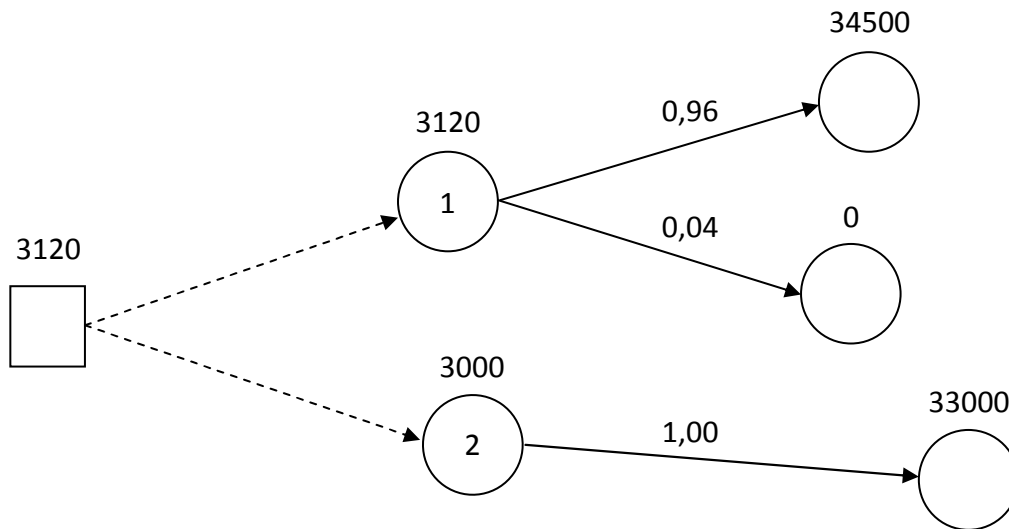


Рис. 2. «Дерево» решений

1.5. Математические модели многокритериальной оптимизации

В теории *многокритериальной оптимизации* (МКО) решаются задачи принятия решений одновременно по нескольким критериям. Задача МКО ставится следующим образом: требуется найти числа x_1, x_2, \dots, x_n , удовлетворяющие системе ограничений

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

для которых функции

$$z_k = f_k(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (2)$$

достигают максимального значения [8].

Множество точек $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ удовлетворяющих системе (2), образует *допустимую область* $D \subset R^n$. Элементы множества D называются *допустимыми решениями* или *альтернативами*, а числовые функции f_k , $k=1, 2, \dots, K$ – *целевыми функциями*, или *критериями*, заданными на множестве D . Эти функции отображают множество $D \subset R^n$ в множество $F \subset R^K$, которое называется *множеством достижимости*.

Впервые проблема многокритериальной оптимизации возникла у итальянского экономиста В. Парето в 1904 г. при математическом исследовании товарного обмена. С математической точки зрения задачи

МКО являются неопределенными, и решение может быть только компромиссным. Например, при выборе лучшего проекта критериями оптимальности могут служить стоимость осуществления проекта и величина прибыли, которую обеспечит данное проектное решение. При использовании только первого критерия будет выбран самый дешевый проект, но его воплощение может привести к получению недопустимо малой прибыли [9].

Следует отметить, что в задачах МКО сокращение множества альтернатив, как правило, идет на основе стратегий исключений. Если после этого остается несколько вариантов, наилучший из них определяется на основе какой-либо из стратегий компенсации. Субъективный фактор поведения человека особенно ярко проявляется при выборе метода свертки многих критериев в один и при отборе метода расчета итоговой общей критериальной оценки, что находит отражение в реализации различных компенсационных стратегий многокритериального выбора [1].

1.5.1. Оптимальность по Парето

Пусть $X_1, X_2 \in D$. Если для всех критериев f_1, f_2, \dots, f_K имеют место неравенства $f_k(X_2) \geq f_k(X_1)$, $k=1, 2, \dots, K$, причем хотя бы одно неравенство строгое, то говорят, что решение X_2 *предпочтительнее* решения X_1 . Условие предпочтительности принято обозначать в виде $X_2 \succ X_1$.

Определение (оптимальность по Парето). В задаче МКО точка $X_0 \in D$ называется оптимальной по Парето, если не существует другой точки $X \in D$, которая была бы предпочтительнее, чем X_0 . Точки, оптимальные по Парето, образуют множество точек, оптимальных по Парето (множество неулучшаемых или эффективных точек) $D_p \subset D$.

Оптимальные решения многокритериальной задачи следует искать только среди элементов множества альтернатив D_p . В этой области ни один

критерий не может быть улучшен без ухудшения хотя бы одного из других.

Обычно решение многокритериальной задачи должно начинаться с выделения множества D_p . При отсутствии дополнительной информации о системе предпочтений ЛПР должно принимать решение именно из множества Парето D_p [8].

Заметим, что целевые функции отображают множество точек, оптимальных по Парето $D_p \subset D \subset R^n$ в множество $F_p \subset F \subset R^K$, которое называется *множеством Парето*.

1.5.2. Иерархические методы многокритериальной оптимизации

В основе данного подхода лежит предположение о том, что исследуемая проблема допускает декомпозицию на простые составляющие части, которые, возможно, также могут рассматриваться как некоторая совокупность еще более простых составляющих. При этом учитывают уровень вершин иерархии и различают три типа вершин:

- вершина *глобальной цели* (вершина нулевого уровня);
- вершины *альтернатив* (последний уровень иерархии);
- вершины *промежуточных целей*.

Получаемая таким образом иерархия и заданные на основе предпочтений лица принимающего решение (ЛПР) меры взаимодействия вершин иерархии составляют формализованное описание задачи принятия решений [9].

Метод анализа иерархий (МАИ) — математический инструмент системного подхода к сложным проблемам принятия решений. МАИ не предписывает лицу принимающему решение (ЛПР) какого-либо «правильного» решения, а позволяет ему в интерактивном режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к ее решению.

Этот метод разработан американским математиком Томасом Саати, который написал о нем книги, разработал программные продукты и в течение 20 лет проводит симпозиумы ISAHN (англ. аббревиатура «International Symposium on Analytic Hierarchy Process»).

МАИ позволяет понятным и рациональным образом структурировать сложную проблему принятия решений в виде иерархии, сравнить и выполнить количественную оценку альтернативных вариантов решения.

Метод анализа иерархий содержит процедуру синтеза приоритетов, вычисляемых на основе субъективных суждений экспертов.

Этапы МАИ (рис. 3):

- построение модели задачи принятия решений в виде иерархии, определение цели, альтернатив цель, критериев оценки;
- определение приоритетов всех элементов иерархии с использованием метода парных сравнений;
- синтез глобальных приоритетов альтернатив путем линейной свертки приоритетов элементов на иерархии;
- проверка суждений на согласованность;
- принятие решения на основе полученных результатов.

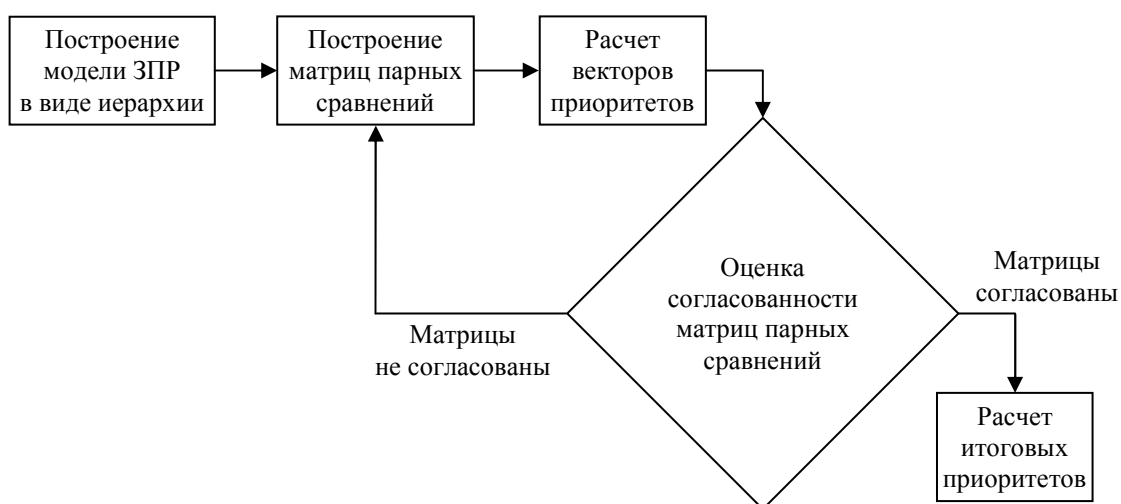


Рис. 3. Основные этапы реализации МАИ

Метод парных сравнений (версия Т. Саати). Рассмотрим реализацию метода парных сравнений в модификации, предложенной Т. Саати [10]. Пусть в некоторой задаче необходимо определить состав некоторого объекта. Причем пусть A_1, A_2, \dots, A_n основные факторы, определяющие состав объекта. Тогда для определения структуры объекта заполняется матрица парных сравнений (рис. 4).

	A_1	A_2	...	A_n
A_1	1	a_{12}		a_{1n}
A_2	a_{21}	1		a_{2n}
...			...	
A_n	a_{n1}	a_{n2}		1

Рис. 4. Матрица парных сравнений

Если обозначить долю фактора A_i через w_i , то элемент матрицы $a_{ij}=w_i/w_j$, соответственно $a_{ij}=1/a_{ji}$ и матрица парных сравнений в данном случае является положительно определенной, обратносимметричной матрицей, имеющей ранг равный 1. Как правило w_1, w_2, \dots, w_n неизвестны заранее и попарные сравнения элементов производятся с использованием субъективных суждений, численно оцениваемых по шкале, а затем решается проблема нахождения компонента w . В подобной постановке задачи, решение проблемы состоит в отыскании вектора (w_1, w_2, \dots, w_n) .

Существует несколько различных способов вычисления искомого вектора. Один из основных методов отыскания вектора w основывается на одном из утверждений линейной алгебры. Очевидно, что искомый вектор является собственным вектором матрицы парных сравнений, соответствующим максимальному собственному числу (λ_{\max}).

Из линейной алгебры известно, что у положительно определенной, обратносимметричной матрицы, имеющей ранг равный 1, максимальное

собственное число равно размерности этой матрицы. При проведении сравнений в реальной ситуации вычисленное максимальное собственное число λ_{\max} будет отличаться от соответствующего собственного числа для идеальной матрицы. Это различие определяет уровень согласованности матрицы, что, в свою очередь влияет на уровень доверия к полученным результатам. Поэтому такая модификация метода парных сравнений содержит внутренние инструменты позволяющие определить качество обрабатываемых данных и степень доверия к ним [10].

Индекс согласованности рассчитывается по формуле:

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение;

n – размерность матрицы.

Опишем один из способов приближенного вычисления собственного столбца (столбца приоритетов):

- 1) суммируем элементы каждой строки и записываем полученные результаты в столбец;
- 2) складываем все элементы найденного столбца;
- 3) делим каждый из элементов этого столбца на полученную сумму.

Для проведения субъективных парных сравнений Т. Саати была разработана шкала относительной важности (табл. 2).

1.6. Нечеткие модели принятия решений

В реальных ситуациях принятия решений цели, ограничения, критерии выбора в большей части субъективны и точно не определены. Нечеткие отношения позволяют моделировать плавное, постепенное изменение свойств, неизвестные функциональные зависимости. Важным понятием в теории нечетких множеств является невероятностная энтропия, которая является интегральной характеристикой нечеткого множества.

Изменение энтропии является основным информационным показателем в моделях принятия решений.

Табл. 2. Шкала относительной важности

Интенсивность относительной важности	Определение	Объяснение
0	Несравнимы	Эксперт затрудняется в сравнении
1	Равная важность	Равный вклад двух видов деятельности в цель
3	Умеренное превосходство одного над другим	Опыт и суждения дают легкое превосходство одному виду деятельности над другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения дают сильное превосходство одному виду деятельности над другим
7	Значительное превосходство	Одному из видов деятельности дается настолько сильное превосходство, что оно становится практически значительным
9	Очень сильное превосходство	Очевидность превосходства одного вида деятельности над другим подтверждается наиболее сильно
2,4,6,8	Промежуточные решения между двумя соседними суждениями	Применяются в компромиссном случае
Обратные величины приведенных выше чисел	Если при сравнении одного вида деятельности с другим получено одно из вышеуказанных чисел (например, 3), то при сравнении второго вида деятельности с первым получим обратную величину (т.е. 1/3)	

1.6.1. Принятие решений в нечетких условиях по схеме Беллмана – Заде

В 1970 году Беллман и Заде опубликовали статью «Decision-Making in Fuzzy Environment» [11], которая послужила отправной точкой для большинства работ по нечеткой теории принятия решений. В той статье

рассматривается процесс принятия решений в условиях неопределенности, когда цели и ограничения заданы нечеткими множествами. Принятие решения – это выбор альтернативы, которая одновременно удовлетворяет и нечетким целям, и нечетким ограничениям.

Пусть $X = \{x\}$ – множество альтернатив. Нечеткую цель \tilde{G} будем отождествлять с нечетким множеством \tilde{G} в X . Аналогичным образом нечеткое ограничение \tilde{C} определяется как некоторое нечеткое множество на универсальном множестве X . Нечеткое решение \tilde{D} также определяется как нечеткое множество на универсальном множестве альтернатив X . Функция принадлежности этого нечеткого множества показывает насколько хорошо решение удовлетворяет нечетким целям и ограничениям. Логической операции «И», которая связывает цели и ограничения, соответствует операция пересечения нечетких множеств. Следовательно, решение – это пересечение нечеткой цели с нечетким ограничением [11]:

$$\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C} \quad (4)$$

В общем случае, когда имеется n целей и m ограничений, результирующее решение по схеме Беллмана–Заде определяется пересечением всех целей и ограничений:

$$\tilde{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap \dots \cap \tilde{G}_n \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2 \cap \dots \cap \tilde{C}_m, \quad (5)$$

и соответственно

$$\mu_D = \mu_{G_1} \wedge \mu_{G_2} \wedge \dots \wedge \mu_{G_n} \wedge \mu_{C_1} \wedge \mu_{C_2} \wedge \dots \wedge \mu_{C_m}. \quad (6)$$

1.6.2. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов

Постановка задачи:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ – множество вариантов, которые подлежат многокритериальному анализу;

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ – множество количественных и качественных критериев, которыми оцениваются варианты.

Задача многокритериального анализа состоит в упорядочивании элементов множества X по критериям из множества G .

Пусть $\mu_{G_i}(x_j)$ – число в диапазоне $[0,1]$, которое характеризует уровень оценки варианта $x_j \in X$ по критерию $G_i \in G$: чем больше число $\mu_{G_i}(x_j)$, тем выше оценка варианта x_j по критерию G_i , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, k}$. Тогда критерий G_i можно представить в виде нечеткого множества \tilde{G}_i на универсальном множестве вариантов X [12]:

$$\tilde{G}_i = \left\{ \frac{\mu_{G_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_{G_i}(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_{G_i}(x_k)}{x_k} \right\} \quad (7)$$

где $\mu_{G_i}(x_j)$ – степень принадлежности элемента x_j нечеткому множеству \tilde{G}_i .

Для нахождения степени принадлежности нечеткого множества (7) сформируем матрицы парных сравнений вариантов по каждому критерию. Общее количество таких матриц совпадает с количеством критериев и равняется n .

Наилучшим вариантом будем тот, который одновременно лучший по всем критериям. Нечеткое решение \tilde{D} находится как пересечения частных критериев:

$$\tilde{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap \dots \cap \tilde{G}_n = \left\{ \frac{\min_{i=\overline{1, n}} \mu_{G_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\min_{i=\overline{1, n}} \mu_{G_i}(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\min_{i=\overline{1, n}} \mu_{G_i}(x_k)}{x_k} \right\} \quad (8)$$

Согласно с полученным нечетким множеством \tilde{D} , наилучшим вариантом следует считать тот, для которого степень принадлежности является наибольшей.

Коэффициенты относительной важности критериев могут быть определены различными методами, например, с помощью парных сравнений по шкале Саати [10].

Вопросы к главе 1

1. Формальная модель задачи принятия решения (ЗПР).
2. Классификация методов принятия решений.
3. При каких условиях целесообразно применять методы принятия решений.
4. Что понимается под «измерением»?
5. Что такое «шкала измерения»?
6. Чем определяется тип шкалы измерения?
7. Назовите типы шкал измерений и охарактеризуйте их.
8. Какие шкалы измерений являются качественными, а какие количественными?
9. Чем определяется выбор шкалы измерения?
10. Приведите примеры величин, измеренных в разных шкалах.
11. Какие критерии используются для принятия решений в условиях неопределенности?
12. Приведите пример задачи принятия решений с использованием значений вероятностей исходов.
13. Как зависит выбора решения от изменения значений вероятностей?
14. Принятие решений в нечетких условиях.
15. Перечислите все компоненты задачи многокритериального выбора.
16. Что значит оптимальность по Парето?
17. Опишите основные этапы метода анализа иерархий.
18. Постановка задачи принятия решений при нечетких целях и ограничениях.
19. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов.

ГЛАВА 2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ

Системные исследования – особый научный феномен, обладающий специфическими свойствами, отличающими его от других типов и форм научного познания. Системный подход отказывается от односторонне аналитических, линейно-причинных методов исследований и основной акцент делает на анализе целостности, интегративных свойств объекта, выявлении его многообразия связей и отношений, имеющих место как внутри исследуемого объекта, так и в его взаимоотношениях с внешним окружением [13].

Системный подход базируется на методологии *системного анализа* – последовательности действий по установлению структурных связей между переменными или постоянными элементами исследуемой системы [14].

Системный анализ создает основу для логического и последовательного подхода к проблеме принятия решений и может быть использован для рассмотрения любых проблем, но применение его методологии должно согласовываться с природой конкретной системы.

2.1. Методологии решения проблем на основе системного анализа

Существуют множество методологий решения проблем реализующих системный подход. Прежде всего, следует отметить работы Р. Акоффа, С. Оптнера, М. Месаровича, Т. Парсонса, Г. Спенсера, Ф. Перегудова, Г. Щедровицкого и др.

Методология решения проблем С. Оптнера

Этапы методологии С. Оптнера [15] представлены на [рисунке 5](#).

Решение проблемы в рамках данной методологии определяется как деятельность, которая сохраняет или улучшает характеристики системы за счет введения изменений, повышающих эффективность использования

ресурсов. Система есть средство, с помощью которого выполняется процесс решения проблемы. Изменение эффективности использования ресурсов измеряется [15]:

- 1) увеличением или уменьшением потребности в ресурсах без соответствующего изменения в объеме стоимости и прибыли;
- 2) увеличением или уменьшением подверженности риску;
- 3) изменением некоторой относительной величины, измеряемой критериями.

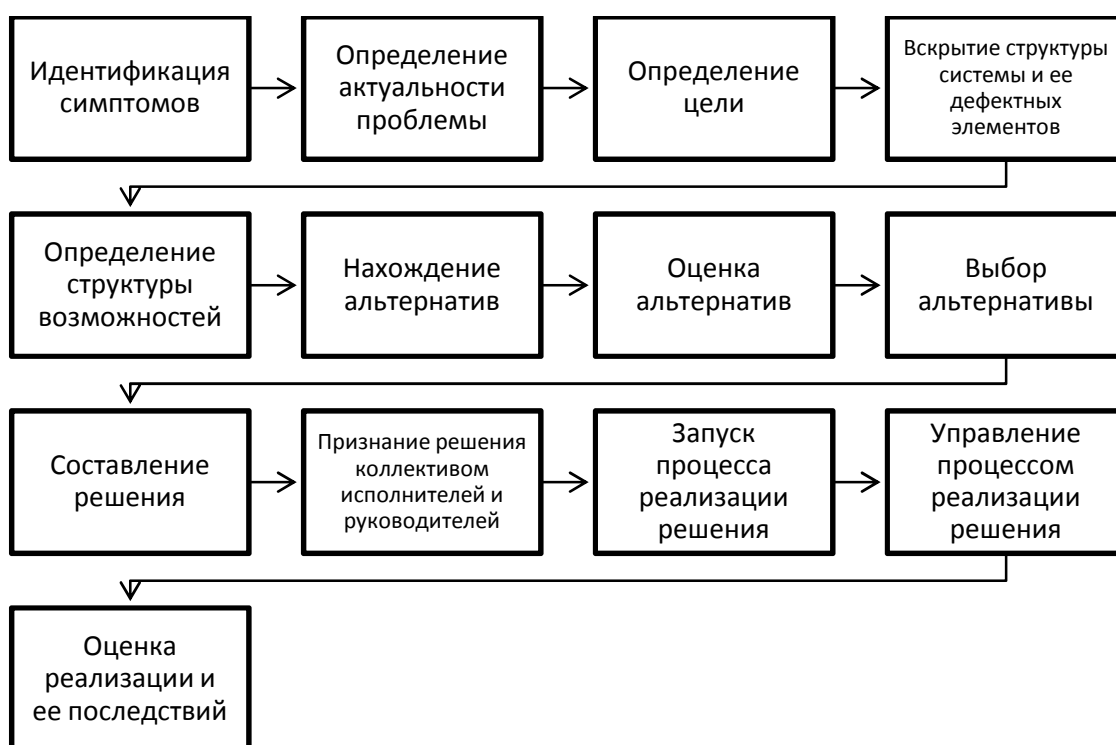


Рис. 5. Методология решения проблем (С. Оптнер)

Проблемой называется ситуация, характеризующаяся различием между необходимым (желаемым) выходом и существующим выходом. Проблемы бывают:

– хорошо структурированные (well-structured), или количественно сформулированные проблемы, в которых существенные зависимости выяснены очень хорошо;

– слабо структурированные (ill-structured), или смешанные проблемы, которые содержат как качественные элементы, так и малоизвестные, неопределенные стороны, которые имеют тенденцию доминировать;

– неструктурированные (unstructured), или качественно выраженные проблемы, содержащие лишь описание важнейших ресурсов, признаков и характеристик, количественные зависимости между которыми совершенно неизвестны.

Требования к системе есть средство фиксации однозначных утверждений, определяющих цель и, как правило, отождествляются с желаемым состоянием. Цель может принимать форму, которая обуславливает достижение максимума (или минимума) некоторого критерия, величина которого еще должна быть определена, или же форму задания диапазона значений, внутри которого должно лежать решение. Комбинация целей, устанавливающих курс, и принуждающих связей, ограничивающих цели, образует ограничение, при котором начинается изучение проблемы. Ограничение есть сумма правил, установлений и выдвинутых лично или извне руководящих принципов, определяющих границу проблемы. Каждая проблема должна иметь определенное ограничение. Совместимость цели и принуждающих связей существенна. Без согласования целей и ограничений невозможно согласовать решение.

При постановке проблемы необходимо реализовать следующие этапы [15]:

- во-первых, описать, каким образом проблема была обнаружена;
- во-вторых, установить, почему она рассматривается как проблема;
- в-третьих, отличить ее от «симптома» некоторых смежных проблем;
- в-четвертых, дать операционные определения нежелательных последствий проблемы.

К гипотезам на стадии формулирования проблемы не предъявляется никаких требований. Момент времени, в который проблема впервые стала очевидно известной, может быть ценным свидетельством и позволит исследовать проблему в динамике.

Решение проблемы определяет способ, которым должно быть реализовано действие, направленное на преобразование существующей системы в желаемую. Решение реализуется посредством управления с помощью обратной связи, состоящего из модели выхода, проверки соответствия и модели воздействия [15].

При решении проблемы первая задача состоит в том, чтобы определить набор объектов – *альтернатив*, подлежащих анализу. Оценка альтернатив является средством отбора решений или целей. Наличие альтернатив предполагает способность сделать выбор между двумя или более приемлемыми решениями. Содержанием альтернатив являются условия, при которых может быть сделан один выбор.

Критерий является средством, с помощью которого измеряются или выбираются альтернативы и выносится суждение об относительной выгоде выбора.

Методология решения проблем Р. Акоффа

Проблема, по словам Акоффа [16] – это ситуация выбора, в которой рассматриваемые варианты возможных действий существенно отличаются для того, кто делает выбор. Проблемная ситуация – некоторая реальность, которой некий субъект недоволен, неудовлетворён и хотел бы изменить. Для устранения проблемной ситуации необходимо учитывать мнение всех участников проблемной ситуации (стейкхолдеров). Для этого формируется проблемное месиво (*mess*) – связанная совокупность (система) различных представлений и мнений стейкхолдеров о проблемной ситуации и целевое

месиво – совокупность целей стейкхолдеров, их представлений о желательном состоянии реальности.

Улучшающее вмешательство – это такое изменение проблемной ситуации, которое положительно оценивается хотя бы одним из ее участников и неотрицательно – всеми остальными.

Способы решения проблем по Акоффу можно разделить на четыре типа, которые образуют иерархию, в том смысле, что каждый из них (обычно) менее эффективен, чем следующий по списку:

1. *Невмешательство* («Absolutio»). В этом случае проблема игнорируют в расчете на то, что она решится без какого либо вмешательства благодаря естественному ходу событий.

2. *Частичное вмешательство* («Resolution»). Такой подход основан на использовании предшествующего опыта, и выбор решений ограничен только испытанными решениями. Частичное вмешательство реагирует на симптомы и не выявляет причины.

3. *Оптимальное решение* («Solution»). В данном случае с помощью специальных исследований ищется наилучший вариант решения проблемы.

4. *Растворение* («Dissolution»). Данный способ состоит в том, чтобы преобразовать, перестроить либо систему, у которой появилась проблема, либо окружающую её среду таким образом, чтобы ликвидировать проблему или устранить её причины, создав тем самым системе возможность действовать в будущем гораздо лучше, чем она может это делать сегодня.

Акофф указывает на системный характер проблем, отмечая, что первые три способа не изменяют структуру или функции самой системы. Решение, найденное для проблемы без учёта её связи с другими проблемами, обычно порождает новые проблемы [16]. Четвертый способ позволяет устранить причину появления проблемы и тем самым

предотвратить негативные последствия, которые могли бы произойти в случае отсутствия улучшающего воздействия.

Градации целей:

1) задачи-результаты, которые предполагается получить в пределах планового периода;

2) цели-результаты, которых не предполагается достичь и за пределами планового периода, но к которым мы рассчитываем приблизиться в рамках этого периода;

3) идеалы-результаты, которые считаются недостижимыми, но приближение к которым возможно.

Таким образом, задачи можно рассматривать как средства достижения целей, а цели – как средство приближения к идеалам.

В соответствии с идеями и системными представлениями Акоффа переход из состояния проблемной ситуации в состояние желаемой должен осуществляться системно, упорядоченно, путем последовательного выполнения определенных шагов [17]:

1. Этап первый – фиксация проблемы. Задача этого этапа – сформулировать проблему и зафиксировать ее документально.

2. Этап второй – диагностика проблемы.

3. Этап третий – составление списка стейкхолдеров.

4. Этап четвертый – выявление проблемного месива.

5. Этап пятый – определение конфигуратора – минимального набора профессиональных языков, позволяющего дать полное (адекватное) описание проблемной ситуации и ее преобразований.

6. Этап шестой – целевыявление.

7. Этап седьмой – определение критериев.

8. Этап восьмой – экспериментальное исследование систем.

9. Этап девятый – построение и усовершенствование моделей.

10. Этап десятый – генерирование альтернатив.

11. Этап одиннадцатый – выбор, или принятие решения.

12. Этап двенадцатый – реализация улучшающего вмешательства.

2.2. Управление решениями

Цель процесса управления решениями (ISO/IEC 15288:2015) заключается в том, чтобы «...обеспечить структурированную, аналитическую основу для идентификации, описания и оценки набора альтернативных вариантов решения в любой точке жизненного цикла и выбора наиболее выгодного направления деятельности» [18].

Ситуации, требующие принятия решения (возможности) как правило встречаются на протяжении всего жизненного цикла системы. Метод управления решениями наиболее часто используется системными инженерами при оценке альтернатив. Исследование альтернатив направлено на определение, измерение и оценку требований заинтересованных сторон для облегчения лицу принимающему решение поиска варианта, представляющего наилучший баланс между конкурирующими целями.

С помощью техники декомпозиции рассматриваемых решений на логические части и последующего синтеза этих частей обратно в единое целое, процесс управления решениями позволяет ЛПР работать на понятном для человека уровне, одновременно избегая излишнего упрощения проблемы.

Кроме того, декомпозируя общую проблему, эксперты могут получить возможность проводить оценку альтернативных вариантов в рамках своей предметной области.

Процесс анализа решений изображен на [рисунке 6](#).

В основе процесса управления решениями лежат принципы, основанные на следующих практиках:

- 1) использование математических методов анализа решений для исследования альтернатив;
- 2) разработку одной основной модели решения (мастер-модель), с последующим ее уточнением, обновлением и использованием как это требуется для оценки альтернатив на протяжении всего жизненного цикла;
- 3) использование цели-ориентированного мышления (Value-Focused Thinking, VFT) для получения наилучших альтернатив;
- 4) идентификацию неопределенностей и оценка рисков для каждого решения.

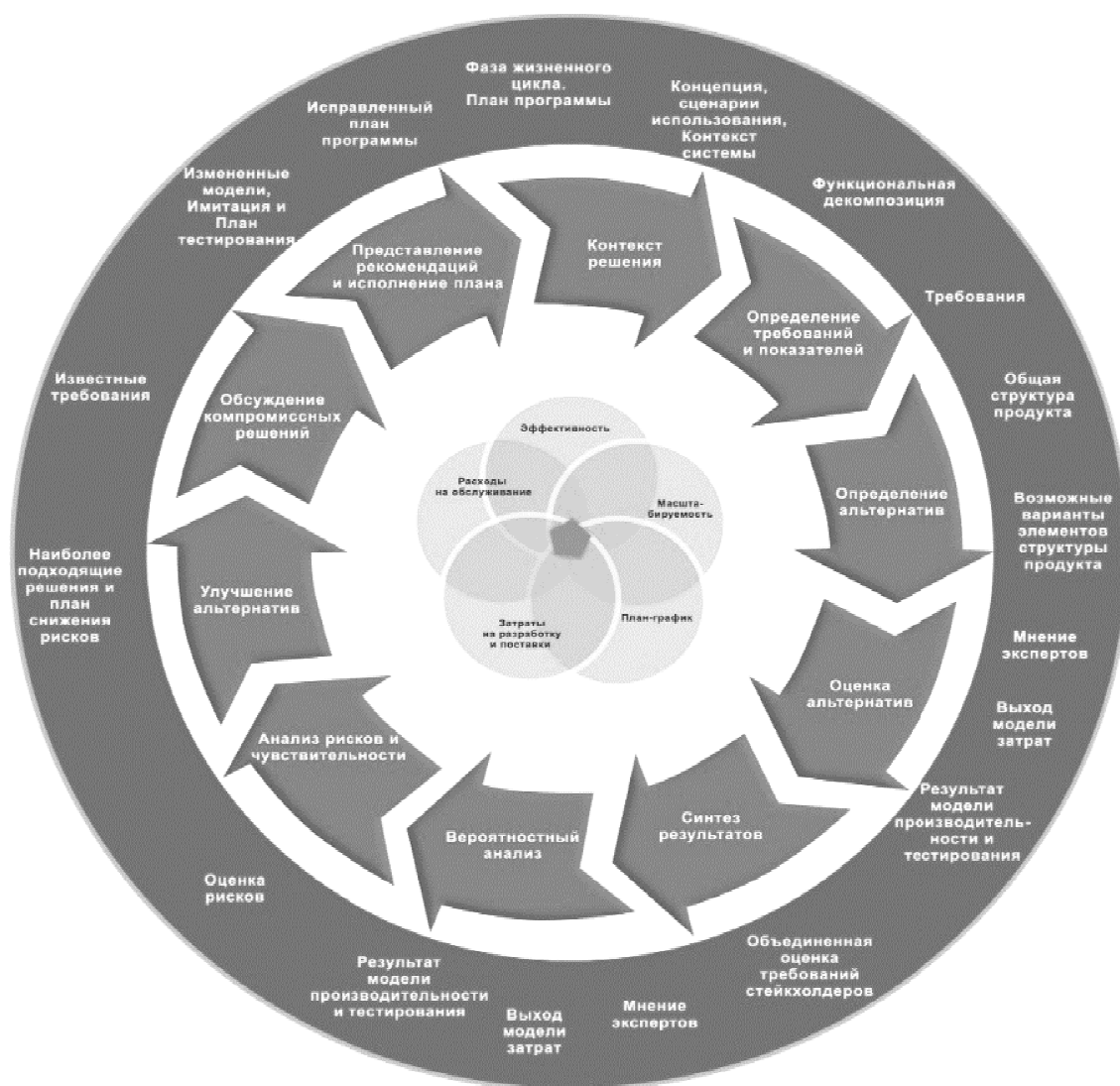


Рис. 6. Процесс управления решениями (INCOSE DAWG 2013)

Источник: [19]

Контекст решения включает описание системы, этап жизненного цикла, этапы решения, список лиц, принимающих решения, стейкхолдеров, доступные ресурсы. Постановку задачи принятия решения предпочтительно определить с точки зрения жизненного цикла системы [19].

В первую очередь необходимо определить требования и показатели, используя, например, интервью и фокус-группы с экспертами предметной области («эксперт») и стейкхолдерами. При оценке альтернатив в системной инженерии, ценности стейкхолдеров часто включают конкурирующие требования в части эксплуатационных характеристик, графика разработки, себестоимости, стоимости поддержки и перспектив развития. В корпорациях, требования каждого акционера также должны быть включены в этот список.

В части эксплуатационных характеристик, функциональная декомпозиция поможет получить подробный набор потенциальных целей. Этот список основных целей необходимо проверить, что каждая цель действительно важна и контролируема (управляема), и что весь набор полный, не избыточный, лаконичный, конкретный и понятный.

Для каждого требования должны быть определены показатели – это необходимо для определения ценности каждого варианта с точки зрения данного требования. Показатель (свойство, критерий оценки и метрика) должен быть недвусмысленным, исчерпывающим, постоянный, действующий и понятный.

Определяющая особенность многофакторного (многоцелевого) анализа решений – переход из пространства показателей в пространство значений. Переход выполняется с помощью оценочной функции (value function), которая совмещает шкалу измерений с диапазоном оценки.

При создании оценочной функции «точка отказа» (от англ. «walk-away point») на шкале показателя (ось x) должна быть установлена в

значение 0 на шкале оценки (ось y). Точка отказа – это такой результат измерения, при котором не зависимо от других результатов, ЛПР откажется от данного решения. Также определяется оценка измерений до той точки, когда альтернативные варианты перестают добавлять ценность, которая отмечается как «достижимая цель» (от англ. «stretch goal», идеал). После этого размечается отрезок до 100 баллов (или 1, 10) на шкале оценки (ось y).

Вопросы к главе 2

1. Почему системный анализ необходим при решении проблем?
2. Перечислите этапы методология решения проблем по С. Оптнеру.
3. Как можно измерить эффективность использования ресурсов?
4. Опишите хорошо структурированные проблемы. Приведите пример.
5. Опишите слабоструктурированные проблемы. Приведите пример.
6. Опишите неструктурированные проблемы. Приведите пример.
7. Как методология решения проблем по С. Оптнеру согласуется с классической теорией принятия решений?
8. Как системные свойства проблемы влияют на решение?
9. Какие типы решения проблем предложил Р. Акоффа?
10. В чем отличие и сходство методологий Оптнера и Акоффа?

ГЛАВА 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Процесс поддержки принятия решений заключается в помощи ЛПР в процессе принятия решений и включает:

- помощь ЛПР при анализе объективной составляющей (понимание и оценка ситуации, условий и ограничений, накладываемых внешней средой);

- выявление предпочтений ЛПР (выявление и ранжирование приоритетов, учет неопределенности в оценках ЛПР и формирование его предпочтений);

- генерацию возможных решений (формирование списка альтернатив);

- оценку возможных альтернатив, исходя из предпочтений ЛПР, и ограничений, накладываемых внешней средой;

- анализ последствий принимаемых решений;

- выбор лучшего с точки зрения ЛПР варианта.

Компьютерная поддержка процесса принятия решений основана на формализации методов получения рекомендаций, даваемых ЛПР, и алгоритмизации самого процесса выработки решения. Для автоматизации этого процесса создают системы поддержки принятия решений (СППР).

Существует множество определений СППР. Одно из первых принадлежит М. Скот-Мортану, по словам которого, СППР сочетают интеллектуальные ресурсы людей с возможностями компьютера для повышения качества решений [20]. Мур и Чанг определили СППР как «расширяемую систему, способную проводить специальный анализ и моделирование решений, ориентированных на будущее планирование и использование в незапланированные и нестандартные временные метки» [21].

В работе [22] СППР определяется как интерактивная, гибкая и адаптируемая система, разработанная для поддержки решения неструктурированных или слабоструктурированных управленческих проблем, направленных на улучшение процесса принятия решений. Система использует данные (внутренние и внешние) и модели и обеспечивает простой и удобный интерфейс, позволяя ЛПР контролировать процесс принятия решения. СППР предлагает поддержку во всех этапах процесса принятия решений.

Э. А. Трахтенгерц определяет СППР как человеко-машинную систему, позволяющую ЛПР использовать свои знания, опыт, объективные и субъективные модели и другую информацию для реализации компьютерных методов выработки решений и выполняющую следующие функции [23]:

- анализ ситуации;
- генерация решений;
- оценка решений и выбор лучшего;
- обеспечение постоянного обмена информацией в процессе принятия решений и согласование групповых решений;
- моделирование принимаемых решений;
- прогнозирование последствий принимаемых решений;
- сбор данных о результатах принятых решений и их оценка.

Учитывая все определения, упомянутые выше, можем выделить основные характеристики СППР [23]:

- СППР использует и данные, и модели;
- СППР предназначены для помощи менеджерам в принятии решений для слабоструктурированных и неструктурированных задач;
- СППР поддерживают, а не заменяют, выработку решений менеджерами;
- цель СППР заключается в повышении эффективности решений.

Требования к СППР зависят от сферы применения, тем не менее, можно сформулировать как минимум три условия, которые инвариантны для любых предметных областей:

1) прежде всего, нельзя выбирать решения, которые противоречат нормативной базе;

2) необходимо учитывать толерантность задачи к неверному решению;

3) система должна уметь классифицировать анализируемые ситуации.

3.1. Классификация систем поддержки принятия решений

На данный момент существует несколько способов классификации СППР. В [таблице 3](#) приведены три наиболее популярных признака классификации. Однако СППР также можно классифицировать по типу пользователей, по назначению, по типу задач и т. д.

Независимо от категории СППР неизменной остается ее главная функция – вывод новой информации (от данных и визуализации до конкретных рекомендаций) на основе анализа исходных данных и моделей.

Принципы создания СППР могут быть сформулированы следующим образом:

– СППР должна быть ориентирована на решение слабоструктурированных задач;

– СППР должна сочетать методы работы с данными и моделями;

– СППР должна легко адаптироваться под конечного пользователя и реализовывать функции актуализации данных о предметной области;

– результаты работы СППР всегда валидируются и используются человеком.

Табл. 3. Классификация СППР [24]

Классификационный признак	Виды СППР
По соотношению данные/модели (методика Стивена Альтера)	<ul style="list-style-type: none"> – FDS (File Drawer Systems) – системы предоставления доступа к нужным данным; – DAS (Data Analysis Systems) – системы для быстрого манипулирования данными; – AIS (Analysis Information Systems) – системы доступа к данным по типу необходимого решения; – AFM(s) (Accounting & Financial models (systems)) – системы расчета финансовых последствий; – RM(s) (Representation models (systems)) – системы симуляции, AnyLogic как пример; – OM(s) (Optimization models (systems)) – системы, решающие задачи оптимизации; – SM(s) (Suggestion models (systems)) – системы построения логических выводов на основе правил
По области применения	<ul style="list-style-type: none"> – Бизнес и менеджмент (рабочая сила, продукты, стратегия и т.п.); – Инжиниринг (дизайн продукта, контроль качества); – Финансы (кредитование и займы); – Медицина (лекарства, виды лечения, диагностика); – Окружающая среда, и др.
По типу используемого инструментария	<ul style="list-style-type: none"> – Model Driven – в основе лежат классические модели (линейные модели, модели управления запасами, транспортные, финансовые и т.п.); – Data Driven – на основе исторических данных; – Communication Driven – системы на основе группового принятия решений экспертами; – Document Driven – проиндексированное (часто – многомерное OLAP) хранилище документов; – Knowledge Driven – хранилище на основе знаний как экспертных, так и машинных

3.2. СППР на основе данных

Основная цель таких систем – помощь пользователям в преобразовании данных в информацию и знания. Пользователи этих систем могут выполнять анализ и запросы данных, обрабатывать их для выявления фактов и делать выводы о моделях данных и тенденциях. Такого рода СППР помогают пользователям извлекать, отображать и анализировать данные.

В работе [25] дано определение СППР на основе данных как системы, состоящей из трех взаимодействующих модулей:

- 1) пользовательский интерфейс (Dialog Management);
- 2) компонент управления данными (управление данными);
- 3) компонент управления моделями (Model Management).

В это определение также заложено четыре основных понятия, которые образуют систему поддержки принятия решений:

- 1) интерфейс – часто считается наиболее важным компонентом;
- 2) система базы данных – включает в себя все базы данных и системы управления базами данных (СУБД) организации;
- 3) модель системы – содержит аналитические, математические и статистические модели;
- 4) коммуникации компонентов – состоит из базовой сети и мобильных устройств.

Архитектуру СППР на основе анализа данных можно также рассмотреть с точки зрения уровня разработки, которая содержит в себе [25]:

1. Нижний уровень, ориентированный на управление данными. Он состоит из данных, метаданных, СУБД (системы управления базами данных), хранилищ данных, словарей данных и метаданных. На этом уровне необходимо интегрировать данные, поступающие из нескольких разных систем. Основными методами, используемыми для этого процесса, являются обработка и загрузка данных. Данные извлекаются из баз данных и внешних источников с помощью приложений интерфейсного типа, известных как шлюзы, работающих в СУБД и позволяющие клиентским приложениям генерировать исполняемый SQL код на стороне сервера. Обработка и преобразование данных сильно зависят от источников данных и их качества. При извлечении и обработке данных могут использоваться различные технологии.

Комплекс методов и процедур, направленных на извлечение данных из различных источников, обеспечение необходимого уровня их информативности и качества, преобразование в единый формат, в котором они могут быть загружены в хранилище данных или аналитическую систему называют *консолидацией*.

Поддержка консолидации данных осуществляется с использованием технологии ETL (от англ. «Extraction, Transformation, Loading») – комплекса методов, реализующих процесс переноса исходных данных из различных источников в аналитическое приложение или поддерживающее его хранилище данных [26]. ETL следует рассматривать не только как процесс переноса данных из одного приложения в другое, но и как инструмент подготовки данных к анализу.

Процесс ETL состоит из трех основных этапов:

- Extraction – непосредственно процесс извлечения информации из источника данных, а также определение состава данных, периодичности выгрузки и правил фильтрации необходимой информации;

- Transformation – очистка и преобразование информации в формат, поддерживаемый целевой системой;

- Loading – загрузка преобразованной информации в целевую систему.

Этот процесс чрезвычайно важен для успеха будущей системы поддержки принятия решений, так как неправильная структура может привести к отказу СППР. Данные целевого хранилища будут использоваться на более высоких уровнях системы. Если выбранный подход заключался в создании нового хранилища данных (индивидуальная разработка) вместо приобретения готового решения, словарей метаданных, используемых компонентами и утилит, то система должны быть построена и адаптирована к решению. При этом интерфейсы связи между пользователем и централизованным словарем метаданных и словари,

используемые каждым компонентом отдельно, также должны быть разработаны и интегрированы. Таким образом, данные и структура словаря будут разработаны в соответствии с логической и физической моделью.

2. Средний уровень, ориентированный на управление или анализ модели. Это уровень, на котором обрабатываются данные, и извлекается необходимая информация для принятия решения. Этот уровень содержит модели анализа данных, моделирования и прогноза, чтобы соответствовать высокому уровню бизнес-требований. На этом уровне основными компонентами являются: основа модели, модель системы управления базами данных, метамоделю, сервер управления и исполнения моделей.

Для создания этого уровня может использоваться технология OLAP (от англ. «On-Line Analytical Processing») – технология комплексного многомерного анализа данных. Концепция OLAP была описана в 1993 году Эдгаром Коддом, известным исследователем баз данных и автором реляционной модели данных. Им же были сформулированы требования, которые позже преобразовали в так называемый тест FASMI (от англ. «Fast Analysis of Shared Multidimensional Information» – быстрый анализ разделяемой многомерной информации), который позволяет определить технологию OLAP только пятью ключевыми словами:

- Fast («быстрый») – анализ должен производиться одинаково быстро по всем аспектам информации, приемлемое время отклика составляет 5 секунд или менее;

- Analysis («анализ») – должна быть реализована возможность осуществлять основные типы числового и статистического анализа, предопределенного разработчиком приложения или произвольно определяемого пользователем;

- Shared («разделяемой») – множество пользователей должно иметь доступ к данным, при этом необходимо контролировать доступ к конфиденциальной информации;

– Multidimensional («многомерной») – ключевое требование OLAP заключается в реализации многомерного представления данных, включая полную поддержку для иерархий и множественных иерархий;

– Information («информации») – приложение должно иметь возможность обращаться к любой нужной информации, независимо от ее объема и места хранения.

Если на этом уровне бизнес-требования предполагают извлечение знаний с использованием интеллектуального анализа данных, то соответствующие алгоритмы могут быть также реализованы. Эти алгоритмы обеспечивают преобразование данных в знания с использованием методов статистического анализа или искусственного интеллекта, а также позволяют выявлять корреляции, правила и знания для поддержки процесса принятия решений [27]. Для интеграции анализа данных и моделей, полученных из разных подсистем, можно использовать несколько технологий интеграции приложений: серверы приложений, которые реализуют модели промежуточного программного обеспечения, сервис-ориентированную архитектуру (SOA), платформы Java.

3. Верхний уровень включает интерфейс и называется также уровнем представления.

На данном уровне происходит взаимодействие с пользователями, где руководители и лица, занимающиеся процессом принятия решений, могут связываться с системой и анализировать полученные результаты. Пользовательский интерфейс должен быть разработан таким образом, чтобы пользователи могли легко взаимодействовать с системой. Этот уровень формируют технологии создания запросов и отчетов, публикации и представления данных в простом, интуитивно понятном виде. В последние несколько лет растущая доля в разработке интерфейсов систем поддержки принятия решений принадлежит веб-технологиям.

4. Четвертый уровень позволяет объединить все предыдущие уровни и содержит веб-серверы, компьютерные сети, устройства связи, распределенные платформы, технологии GRID и платформы мобильной связи.

Один из вариантов архитектуры СППР на основе данных представлен на рисунке 7.

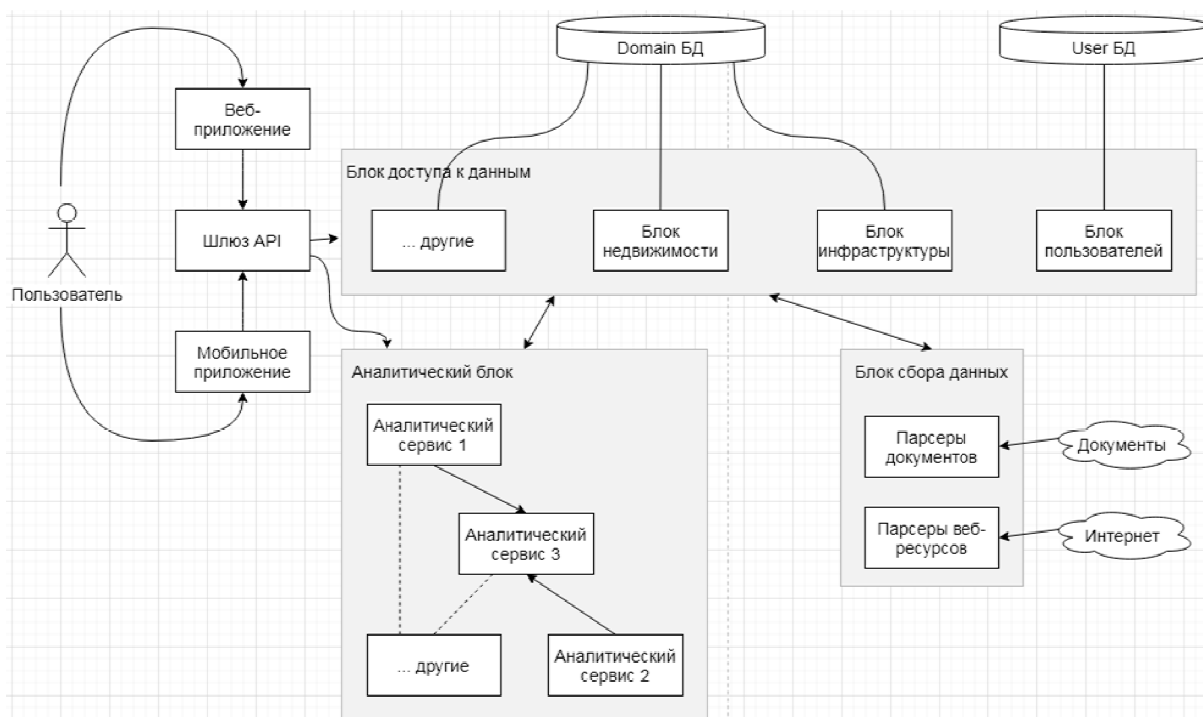


Рис. 7. Архитектура СППР на основе данных

Источник: [28]

Одним из наиболее распространённых СППР на основе данных являются системы бизнес-аналитики (от англ. «Business Intelligence», BI) [29]. Системы бизнес-аналитики помогают организациям принимать решения с использованием современных технологий для подготовки отчетности; доступа к данным; использованию аналитических методов.

В целом, системы BI помогают формулировать решения путем запуска, манипулирования и анализа данных или информации, хранящихся

в исторических базах данных. Основная задача BI и OLAP заключается в повышении качества информации, доступной для принятия решений за счет специальных методов ее обработки и анализа. В этом случае ключевыми требованиями к СППР являются обеспечение доступа к большому объему данных и качество исходных данных.

В последнее время особое значение приобретают технологии связанные с понятием «больших данных» (от англ. «Big Data»), что так или иначе связано с резким ростом количества доступной для анализа информации. В новых условиях традиционные подходы к анализу данных перестали работать. Появилась необходимость в создании новых технологий анализа данных и компьютерные алгоритмы, которые считают значительно быстрее и могут приспособливаться под задачу и самостоятельно обучаться. Кроме того необходимы достаточные вычислительные мощности для обработки и хранения данных, а также простые и доступный способы сбора данных.

Определяя понятие Big Data часто говорят о четырех «V»: «Volume», «Variety», «Velocity» и «Value» (в переводе с англ. «объеме, вариативности, скорости и ценности»).

Big Data – это «технологии и архитектуры нового поколения для экономичного извлечения ценности из разноформатных данных большого объема путем их быстрого захвата, обработки и анализа» [30]. Понятие больших данных подразумевает работу с информацией огромного объема и разнообразного состава, весьма часто обновляемой и находящейся в разных источниках в целях увеличения эффективности работы, создания новых продуктов и повышения конкурентоспособности [31].

Для реализации СППР на основе технологий Big Data необходима специальная инфраструктура, компоненты которой могут быть реализованы с помощью решений, представленных в [таблице 4](#).

Табл. 4. Примерный перечень компонентов инфраструктуры больших данных для реализации СППР

Компонент	Функция	Решение
Сервис получения данных	Интерфейс ввода/вывода	REST/AXIS Web-Server
Пакетная обработка	Распределенная обработка данных	MapReduce
Блок принятия решений	Поддержка прикладных задач и аналитического моделирования	Определяется в соответствии с спецификой прикладных задач
Блок принятия решений в реальном времени	Поддержка задач управления в реальном времени	Определяется в соответствии со спецификой прикладных задач
Сервис работы с неструктурированными данными	Обработка неструктурированных наборов данных	Определяется в соответствии со спецификой прикладных задач
Сервис управления метаданными и индексированием	Создание конфигуратора для обработки метаданных	Hadoop Distributed File System
Сервис хранения метаданных	Хранение метаданных	HBase
Сервис хранения документов	Хранить необработанных данных	MongoDB

3.3. СППР на основе моделей

СППР на основе моделей (от англ. «Model-Driven DSS») – тип системы поддержки принятия решений, которая использует математические модели для поддержки принятия решений. Управляемая моделями СППР использует технологии моделирования и обычно не требуют больших объемов данных. На основе таких моделей можно решать прямые («что будет если?») и обратные («как сделать чтобы?») задачи моделирования.

Управляемые моделью СППР могут помочь в прогнозировании спроса на продукцию, распределении работ, разработке нового программного продукта, выборе места расположения нового объекта и т.д. Такая система может включать сразу несколько моделей:

– объяснительную, например, регрессионную модель для определения взаимосвязи между переменными;

- финансовую модель для отчета о прибылях и убытках;
- оптимизационную модель (например, на основе линейного программирования), и т.д.

На рисунке 7 приведена одна из классификаций видов моделирования [32].



Рис. 7. Виды моделирования

Существует большое количество программных продуктов, реализующих СППР на основе моделей, которые используют классические подходы теории принятия решений. Например, в системах «Criterium DecisionPlus» и «Expert Choice» [33, 34] реализованы методы многокритериальной оптимизации (метод анализа иерархий).

Для решения слабоструктурированных или неструктурированных задач используют когнитивное моделирование. Методология когнитивного моделирования, предназначенная для анализа и принятия решений в плохо определенных ситуациях, была предложена Аксельродом [35]. В основе методологии когнитивного моделирования лежит когнитивная (познавательная-целевая) структуризация знаний об объекте и внешней для него среде, причем объект и внешняя среда разграничиваются «нечётко».

Цель такой структуризации состоит в выявлении наиболее существенных (базисных) факторов, характеризующих «пограничный» слой взаимодействия объекта и внешней среды, и установлении качественных (причинно-следственных) связей.

Цель когнитивной структуризации состоит в формировании и уточнении гипотезы о функционировании исследуемого объекта. Чтобы понять и проанализировать поведение сложной системы с помощью когнитивного подхода, строится структурная схема причинно-следственных связей (*когнитивная карта*).

Когнитивная карта – это субъективное представление эксперта о процессах в сложной динамической ситуации, формально представляемое в виде ориентированного знакового графа [36].

Когнитивное моделирование представляет собой циклический процесс и содержит несколько взаимосвязанных этапов:

- 1) когнитивная структуризация;
- 2) структурный анализ когнитивной модели;
- 3) сценарное моделирование развития ситуации;
- 4) оценка и интерпретация результатов моделирования;
- 5) мониторинг ситуации.

На начальном этапе проводится *когнитивная структуризация* информации о ситуации и процессах, оказывающих влияние на ее развитие. Этап когнитивной структуризации включает в себя сбор, анализ и синтез (структуризацию) информации, т.е. построение когнитивной карты, описывающей механизм и условия развития ситуации. Когнитивная структуризация проводится с целью формирования множества базисных факторов и определения причинно-следственных отношений между ними.

На каждом этапе формирования модели приходится принимать решения, от совокупности которых, в конечном счете, зависит адекватность построенной модели. В число таких задач входят [26]:

- выбор самой модели;
- формирование набора факторов и связей между ними (включая знак связи);
- выбор шкал и весов связей;
- выбор методов вычисления влияний.

Множество базисных факторов, причинно-следственные отношения между ними и параметры факторов и отношений определяются по результатам анализа текстов, содержащихся в информационно-аналитической базе, и анкетирования или интервьюирования экспертов и лиц, принимающих решения (ЛПР).

Из множества базисных факторов ситуации выбираются подмножества целевых и управляющих факторов, а также начальные тенденции базисных факторов. В качестве управляющих выбираются факторы, относящиеся к объекту управления или к внешней среде, на которые субъект управления имеет возможность воздействовать; в качестве целевых – факторы, в наибольшей степени характеризующие состояние объекта управления и его цели.

Моделирование может проводиться в режимах саморазвития и управляемого развития. Значение «тенденции» фактора в каждый момент определяется как сумма значения «тенденции» фактора в предыдущий момент и всех влияний, пришедших от «соседних» факторов. При определении результирующего значения «тенденции» фактора учитываются как собственно тенденции влияющих факторов, так и сила их влияния.

Хотя когнитивные карты в первом приближении можно назвать моделями знания, но к методам искусственного интеллекта их, как правило, не относят. Прежде всего, потому, что они не позволяют реализовать систему вывода новых знаний. В состав СППР на основе

искусственного интеллекта включают не только базы данных и знаний, но и блоки решения и логического вывода, хранилище моделей и т.п.

Основные функции таких СППР: извлечение знаний; верификация знаний; вывод рекомендаций; объяснение рекомендаций. К методам, которые используются в интеллектуальных СППР, можно отнести:

- прямой и обратный индуктивный и дедуктивный вывод;
- вывод по аналогии (абдуктивный вывод);
- нечёткий вывод;
- машинное обучение;
- методы Data Mining;
- онтологическое моделирование;
- обработка естественного языка;
- мультиагентное моделирование.

В самом общем виде функциональная архитектура СППР представлена на [рисунке 8](#).

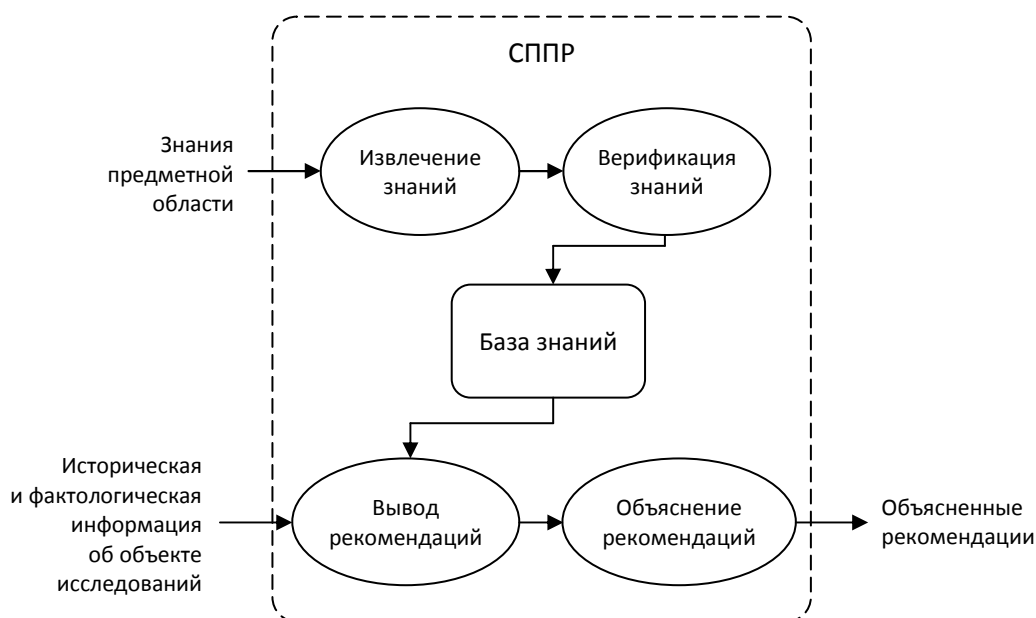


Рис. 8. Функциональная архитектура интеллектуальной СППР

Источник: [37]

3.3.1. СППР на основе онтологии

Преимущество построения СППР на основе онтологической модели состоит, прежде всего, в возможности единообразного представления знаний разных предметных областей и обработки информации на семантическом уровне. Модель знаний на основе онтологии обеспечивает возможность хранения разнородных знаний в единой базе знаний и позволяет реализовывать различные типы рассуждений на знаниях.

Методики онтологического моделирования основываются на формальном описании моделируемой системы при помощи определенного терминологического аппарата. Далее модель преобразуется в машинно-читаемую форму на основе стандартов, принятых консорциумом W3C: формализмов моделирования RDF/RDFS/OWL, языка запросов к онтологическим моделям SPARQL, правил логического вывода SPIN и SWRL и др. [38].

Основные функции СППР на основе онтологии могут быть определены следующим образом [38]:

- сбор информации из разнородных источников (датчики и сенсоры, информационные сообщения от сторонних лиц и организаций, данные исследований и интерпретации их результатов, и др.);
- приведение информации в соответствие структуре онтологической модели;
- применение к полученной информации правил логического вывода для вычисления следствий из имеющихся предпосылок;
- предоставление результатов обработки информации пользователю с возможностью просмотреть логические основания каждого полученного вывода (примененные правила, исходные факты, их происхождение).

Процесс создания онтологической модели изображен на [рисунке 9](#). Это междисциплинарный вид деятельности, который требует знаний

информационных технологий, математики и логики, философии, предметной области.



Рис. 9. Последовательность создания онтологической модели

Источник: [39]

Примеры использования онтологии в системах СППР представлены в работах [38–42].

На рисунке 10 представлена архитектура СППР на основе онтологии для поддержки принятия решений по управлению развитием города.

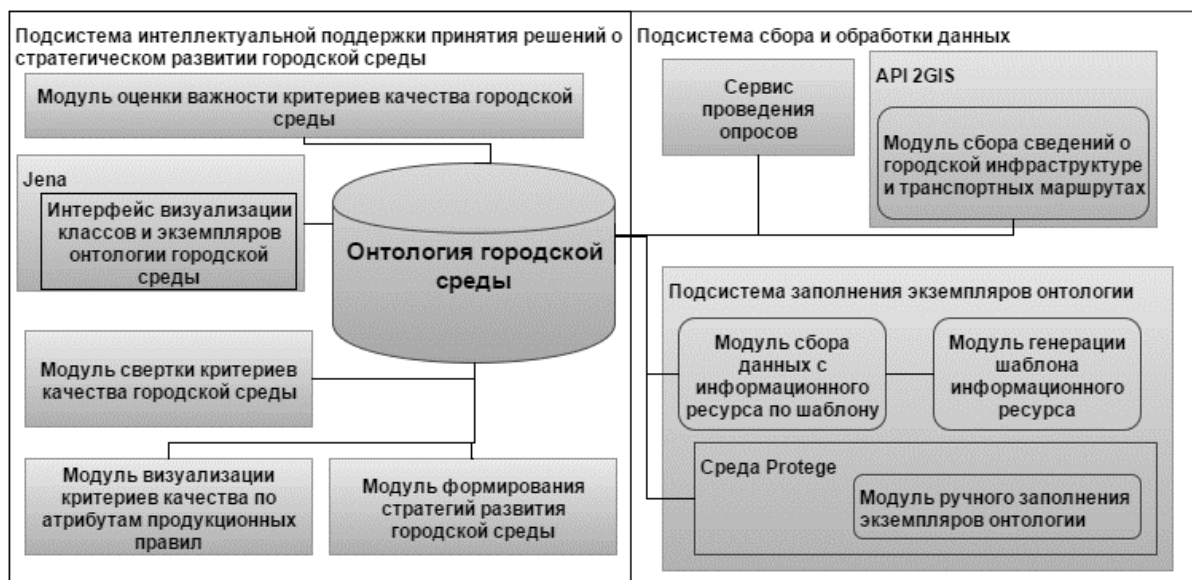


Рис. 10. Пример архитектуры СППР на основе онтологии

Источник: [43]

3.3.2. Мультиагентные модели в СППР

Применение классических методов имитационного моделирования (на основе автоматов, дискретно-событийного моделирования, сетей Петри и пр.) имеет ограниченные возможности для реализации сложного поведения акторов моделируемой системы. Мультиагентный подход решает проблему повышения сложности организации модели для моделирования сложных процессов. Но повышение качества моделирования обеспечивается в данном случае за счет усложнения проектирования таких систем и повышенной требовательностью к вычислительным ресурсам.

Мультиагентные системы (МАС) представляют собой новое направление развития искусственного интеллекта, которое сформировалось на основе результатов исследований в области распределенных компьютерных систем, сетевых технологий решения проблем и параллельных вычислений.

Агент – это аппаратная или программная сущность, способная действовать в интересах достижения целей, поставленных перед ней владельцем и/или пользователем.

С точки зрения программирования, агенты представляют собой программное обеспечение (ПО), которое способно действовать самостоятельно от лица пользователя. При создании МАС может использоваться архитектура «клиент-сервер». В зависимости от поставленной задачи, возможны две ее реализации:

- 1) «толстый клиент – тонкий сервер» – серверная часть реализует доступ к ресурсам, а приложения находятся на компьютерах клиентов;
- 2) «тонкий клиент – толстый сервер» – в клиентской части реализован только интерфейс, а сервер выполняет все остальные задачи ПО.

Мультиагентный подход может быть применен при разработке распределенных СППР. В этом случае каждый узел системы представляет собой программного агента со своими ресурсами. Их кооперация обеспечивает функционирование системы в целом.

Архитектура мультиагентных СППР имеет конструктивные особенности, связанные с использованием принципа децентрализованного управления и объединения в распределённой среде моделирования разнонаправленных процессов. Концептуальные архитектурные решения зависят от назначения СППР и уровня управленческих задач. На [рисунке 11](#) представлена архитектура СППР на основе МАС-технологии для моделирования городских процессов [44].

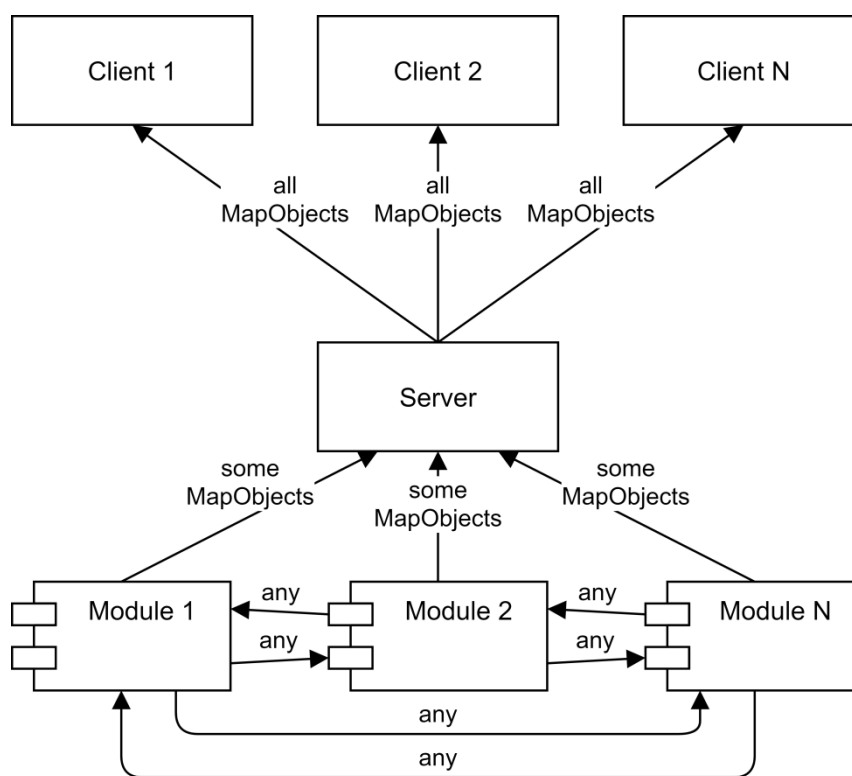


Рис. 11. Пример архитектура СППР на основе МАС-технологии

Агент в данной системе представляет собой модель человека (актера, обладающего свободой воли) или иных сущностей живого и

искусственного происхождения. Все они являются участниками условно зависимого динамического взаимодействия и способны к транспортировке материальных и нематериальных ресурсов. Каждая сфера жизнедеятельности людей или городской процесс, которую можно выделить в качестве обособленной подсистемы, будет представлять собой отдельный модуль. Такой модуль определяет связанные с его спецификой роли, свойства и действия агентов, отвечает за управление и изменение соответствующих параметров акторов и среды, а также накапливает данные об их состоянии в аспекте реализуемой сферы жизнедеятельности. Представленная структура позволяет динамически подключать новые модули к проекту, а также запускать симуляции с различными наборами модулей для более точного нахождения и проверки взаимозависимостей. При этом модули реализуют два типа задач:

- 1) прямое влияние на изменение поведения агентов;
- 2) выполнение служебных функций и обмен данными с другими модулями (например, расчет маршрута перемещения из одной точки в другую) [45].

К преимуществам применения МАС как основы СППР можно отнести возможность построения индивидуальных сценариев действия акторов, поддержки работы в реальном времени с быстрой и гибкой реакцией на события, масштабируемости модельных конструкций и поддержки многозадачности. Агенты способны к обучению, самоорганизации и кооперации для достижения единой цели и решения сложных задач.

Вопросы к главе 3

1. Дайте определение системе поддержки принятия решений.
2. В чем отличие процессов принятия решений и поддержки принятия решений?

3. Какие принципы создания СППР вы знаете?
4. По каким признакам можно классифицировать СППР?
5. Перечислите типы СППР по методике Стивена Альтера
6. Какие компоненты входят в СППР на основе данных?
7. На какие уровни можно разделить процесс разработки СППР на основе данных?
8. Опишите концепцию СППР на основе данных.
9. На основе каких методов моделирования могут быть реализованы СППР?
10. Какие особенности интеллектуальных СППР вы знаете?
11. Перечислите функции СППР на основе онтологии.
12. Какие преимущества дает использование онтологии в СППР?
13. Какие преимущества дает использование мультиагентного моделирования в СППР?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усложнение задач управления приводит к необходимости использования новых подходов к принятию решений [46]. В связи с этим системы поддержки принятия решений все чаще используются в самых разных организациях и позволяют сочетать различные модели принятия решений, основанные как на аналитических методах, так и на субъективных представлениях о решаемой задаче ЛПР. СППР позволяют оценить состояние исследуемой проблемы, цели изменения ситуации, значимость каждого фактора, влияющего на ситуацию.

В соответствии с классификацией получаемых решений Э. А. Трахтенгерца [23], решения могут быть принципиально новыми, сгенерированными человеком и основанными на типовых сценариях. В первом случае компьютер необходим для анализа и оценки решений. Во втором – решение генерируется на основе комбинаций известных частных решений, и использование аналитических методов позволяет ранжировать их и выбирать лучшее.

Наиболее сложными остаются постановка задач принятия решений и согласование полученных решений.

Несмотря на то, что методы компьютерной поддержки принятия решений далеки до совершенства, они во многих случаях обеспечивают принятие правильного и своевременного решения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Системы поддержки принятия решений: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры / под ред. В. Г. Халина, Г. В. Черновой. – М. : Издательство Юрайт, 2016. – 494 с.
2. *Simon, H. A.* Rationality as Process and as Product of Thought / H. A. Simon // *American Economic Review*. – 1978. – Vol. 68. – No. 2. – P. 1–16.
3. *Петровский, А. Б.* Теория принятия решений / А. Б. Петровский. – М. : Академия, 2009. – 400 с.
4. *Андрейчиков, А. В.* Анализ, синтез, планирование решений в экономике : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Информационные системы в экономике» / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2000. – 363 с.
5. Теория измерений [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Теория_измерений
6. *Мещеряков, В. А.* Метрология. Теория измерений : учебник для академического бакалавриата / В. А. Мещеряков, Е. А. Бадеева, Е. В. Шалобаев. – М. : Изд-во Юрайт, 2019. – 167 с.
7. *Kahneman, D.* Prospective theory: An analysis of decision under risk / D. Kahneman, A. Tversky // *Econometrica*. – 1979. – No. 47. – P. 263–291.
8. *Лотов, В. А.* Многокритериальные задачи принятия решений : учебное пособие / В. А. Лотов, И. И. Поспелова. – М. : МАКС Пресс, 2008. – 197 с.
9. *Ногин, В. Д.* Принятие решений при многих критериях : учебно-методическое пособие / В. Д. Ногин. – СПб. : Изд-во ЮТАС, 2007. – 104 с.
10. *Саати, Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 420 с.
11. *Беллман, Р.* Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. – М. : Мир, 1976. – С. 172–215.
12. *Ротштейн, А. П.* Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С. 150–154.

13. *Фоменков, С. А.* Основы системного анализа : учебное пособие / С. А. Фоменков, Ю. А. Орлова. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 230 с.
14. Системный анализ [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Системный_анализ
15. *Оптнер, С. Л.* Системный анализ для решения проблем бизнеса и промышленности / С. Л. Оптнер. – М. : Концепт, 2003. – 205 с.
16. *Акофф, Р. Л.* Вторая промышленная революция. Управление в век систем / Р. Л. Акофф // Проблемы управления в социальных системах. – 2010. – Т. 2. – № 3. – С. 52–77.
17. *Тарасенко, Ф. П.* Прикладной системный анализ : учебное пособие / Ф. П. Тарасенко. – М. : КНОРУС, 2010. – 224 с.
18. Стандарт ISO/IEC 15288:2015 : Системная и программная инженерия : Содержание информационных продуктов процесса жизненного цикла систем и программного обеспечения [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200127275>
19. Управление решениями в SEBoK [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа : <https://habr.com/ru/post/253679/>
20. *Keen, P. G.* Decision Support Systems: An Organizational Perspective / P. G. Keen, M. S. Scott-Morton. – Massachusetts, 1978. – 318 p.
21. *Moore, J. H.* Design of Decision Support Systems / J. H. Moore, M. G. Chang // Data Base. – 1980. – Vol. 12. – No. 1. – P. 43–68.
22. *Turban, E.* Decision Support Systems and Intelligent Systems / E. Turban, J. E. Aronson, T. P. Liang. – New Jersey : Pearson Education Inc, 2005. – 370 p.
23. *Трахтенгерц, Э. А.* Компьютерная поддержка принятия решений / Э. А. Трахтенгерц. – М. : СИНТЕГ, 1998. – 247 с.
24. *Power, D.* Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers / D. Power. – London : Quorum Books, 2002. – 251 с.
25. Improving Decision Support Systems with Data Mining Techniques [Электронный ресурс] // Open access peer-reviewed chapter. – 2020. – Режим доступа : <https://www.intechopen.com/books/advances-in-data-mining-knowledge-discovery-and-applications/improving-decision-support-systems-with-data-mining-techniques>
26. *Садовникова, Н. П.* Методы и модели в аналитических программных средствах : учебное пособие / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Д. М. Коробкин ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 96 с.

27. Analysis Methods of Spatial Structure Metrics for Assessment of Area Development Effectiveness / A. Zuev, D. Parygin, N. Sadovnikova, A. Aleshkevich, D. Boiko // Communications in Computer and Information Science : Proceedings of the 5th International Conference on Digital Transformation and Global Society (DTGS 2020), St. Petersburg, Russia, 17–19 June 2020. – Springer, 2020. – Vol. 1242. – P. 273–288. – DOI : 10.1007/978-3-030-65218-0_21

28. Интеллектуальная поддержка решений по использованию объектов недвижимости для управления урбанизированными территориями [Электронный ресурс] / И. С. Зеленский, Д. С. Парыгин, О. В. Савина, А. А. Финогеев, А. А. Шуклин, А. Ю. Антюфеев // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – № 11. – С. 13–29. – Режим доступа : <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/1036/975>

29. Паклин, Н. Б. Бизнес-аналитика от данных к знаниям / Н. Б. Паклин, В. И. Орешков. – 2-изд., испр. – СПб. : Питер, 2013. – 706 с.

30. Найдич, А. Большие данные: насколько они большие? [Электронный ресурс] / А. Найдич. – 2012. – Режим доступа : <http://compress.ru/article.aspx?id=23469>

31. Тиндал, С. Большие данные: все, что вам необходимо знать [Электронный ресурс] / С. Тиндал. – 2012. – Режим доступа : <http://www.peweek.ru/idea/article/detail.php?ID=141962>

32. Лычкина, Н. Н. Имитационное моделирование экономических процессов : учебное пособие для вузов / Н. Н. Лычкина. – М. : Инфра-М, 2012. – 353 с.

33. Сайт компании Infoharvest [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <http://www.infoharvest.com/ihroot/infoharv/products.asp>

34. Сайт компании expertchoice [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://www.expertchoice.com/2021>

35. Axelrod, R. Structure of Decision: the Cognitive Maps of Political Elites / R. Axelrod. – New York : Priston Univ. Press, 1976. – 254 p.

36. Авдеева, З. К. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) / З. К. Авдеева, С. В. Коврига, Д. И. Макаренко // Управление большими системами. – 2007. – № 16. – С. 26–39.

37. Общая архитектура и принципы построения системы поддержки принятия решений [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://eas.me/dss-architecture/>

38. Онтологическое моделирование предприятий: методы и технологии : монография / под ред. С. В. Горшков. – Екатеринбург, 2019. – 236 с.

39. Горшков, С. В. Введение в онтологическое моделирование [Электронный ресурс] / С. В. Горшков. – 2021. – Режим доступа : <http://trinidata.ru>
40. Application of semantic knowledge management system in selected areas of Polish public administration / A. Wróblewska, A. Zięba, R. Mieñkowska-Norkiene, P. Kapłański, P. Zarzycki // Collegium of Economic Analysis Annals. – Warsaw, 2013. – P. 353–368.
41. The Application of Semantic Web Technologies for Railway Decision Support / J. Lu, C. Roberts, K. Lang, A. Stirling, K. Madelin // Intelligent Decision-Making Support Systems: Foundations, Applications and Challenges. – Springer, 2006. – P. 321–341.
42. Онтология медицинской диагностики для интеллектуальных систем поддержки принятия решений / В. В. Грибова, М. В. Петряева, Д. Б. Окунь, А. Шалфеева // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8. – № 1(27). – С. 58–73.
43. Разработка онтологии для интеллектуальной системы поддержки принятия решений в задачах управления развитием города / А. В. Матохина, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Е. П. Гнедкова // Известия Волгоградского государственного технического университета : серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2015. – № 14(178). – С. 69–74.
44. Development of Scenarios for Modeling the Behavior of People in an Urban Environment / A. Anokhin, S. Burov, D. Parygin, V. Rent, N. Sadovnikova, A. Finogeev // Studies in Systems, Decision and Control : Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. – Springer, 2021. – Vol. 333. – P. 103–114. – DOI : 10.1007/978-3-030-63563-3_9
45. Multi-agent Approach to Modeling the Dynamics of Urban Processes (on the Example of Urban Movements) / D. Parygin, A. Usov, S. Burov, N. Sadovnikova, P. Ostroukhov, A. Pyannikova // Communications in Computer and Information Science : Proceedings of the 6th International Conference on Electronic Governance and Open Society: Challenges in Eurasia (EGOSE 2019), St. Petersburg, Russia, 13–14 November 2019. – Springer, 2020. – Vol. 1135. – P. 243–257. – DOI : 10.1007/978-3-030-39296-3_18
46. Cyber-Social System as a Model of Narrative Management / A. Davtian, O. Shabalina, N. Sadovnikova, D. Parygin // Studies in Systems, Decision and Control : Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. – Springer International Publishing, 2021. – Vol. 333. – P. 3–14. – DOI : 10.1007/978-3-030-63563-3_1

Приложение 1. Лабораторная работа № 1

Постановка задачи принятия решений и экспертное оценивание

Цель работы: освоение методов экспертного анализа и формирование навыков постановки и решения задач принятия решений.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучить теоретический материал по теме;
- 2) сформулировать постановку задачи принятия решений по указанной схеме;
- 3) выбрать алгоритм реализации задания в соответствии с вариантом;
- 4) провести экспертную оценку вариантов решения задачи;
- 5) оформить отчет.

Теоретические положения

Методы экспертных оценок являются частью обширной области теории принятия решений, а само экспертное оценивание – процедура получения оценки проблемы на основе мнения специалистов (экспертов) с целью последующего принятия решения (выбора).

В случаях чрезвычайной сложности проблемы, ее новизны, недостаточности имеющейся информации, невозможности математической формализации процесса решения приходится обращаться к рекомендациям компетентных специалистов, прекрасно знающих проблему, – к экспертам. Их решение задачи, аргументация, формирование количественных оценок, обработка последних формальными методами получили название метода экспертных оценок.

Этапы экспертного оценивания:

1. Формирование групп экспертов, выбор объектов оценивания.

Необходимо сформировать небольшие группы по 3–4 человека, выбрать цель сравнения и объекты (системы) для сравнения. Объекты (3–5) должны быть однородными.

2. Ранжирование систем.

Каждый из членов группы (эксперт) должен проранжировать выбранные системы по предпочтительности. Для эквивалентных систем используются связанные ранги.

Например, пусть эксперт упорядочил объекты x_1, \dots, x_5 следующим образом: $x_3 \succ x_5 \succ x_1 \equiv x_4 \succ x_2$. Тогда ранги объектов получают следующие значения: $r_3 = 1, r_5 = 2, r_1 = r_4 = (3 + 4) / 2 = 3,5, r_2 = 5$.

Затем составляется обобщенная ранжировка. Для каждого объекта ранги, присвоенные экспертами, суммируются. Обобщенные ранги присваиваются в соответствии с увеличением (убыванием) сумм рангов. Результаты оформляются в виде таблицы (см. табл. 1).

Табл. 1. Экспертная ранжировка объектов

	Объект 1	Объект 2	Объект 3	Объект 4	Объект 5
Эксперт 1	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}
Эксперт 2	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{25}
Эксперт 3	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}	r_{35}
Сумма	Σr_{i1}	Σr_{i2}	Σr_{i3}	Σr_{i4}	Σr_{i5}
Обобщенный ранг	r_1^*	r_2^*	r_3^*	r_4^*	r_5^*

Оценка согласованности мнений экспертов выполняется на основе дисперсионного коэффициента конкордации по формуле:

$$K = (12 \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m r_{ij} - \bar{r} \right)^2) / (m^2(n^3 - n) - m \sum_{s=1}^m T_s),$$

где m – количество экспертов; n – количество объектов ранжирования;

\bar{r} – оценка математического ожидания, равная $\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m r_{ij}$;

T_s – показатель связанных рангов в s -й ранжировке, определяемый по формуле $T_s = \sum_{k=1}^{H_s} h_k^3 - h_k$, где H_s – число групп равных рангов в s -й ранжировке; h_k – число равных рангов в k -й группе связанных рангов. Если совпадающих рангов нет, то $T_s = 0$.

На основе вычисленного коэффициента конкордации K дается качественная характеристика согласованности мнений экспертов (табл. 2).

Табл. 2. Качественная характеристика мнений экспертов

Значение K	< 0.3	0.3 – 0.5	0.5 – 0.7	0.7 – 0.9	> 0.9
Согласованность	слабая	умеренная	заметная	высокая	очень высокая

3. Парные сравнения.

Каждый из членов группы составляет матрицу парных сравнений выбранных систем. Значения матрицы определяются по формуле:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \succ x_j \text{ или } x_i \equiv x_j; \\ 0 & \text{если } x_i \prec x_j, \quad i, j = \overline{1, n}. \end{cases}$$

На рисунке 1 приведен пример матрицы парных сравнений с булевыми значениями для объектов, имеющих следующий порядок:

$$x_1 \succ x_5 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_2$$

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
x_1	1	1	1	1	1
x_2	0	1	0	0	0
x_3	0	1	1	1	0
x_4	0	1	0	1	0
x_5	0	1	1	1	1

Рис. 1. Матрица парных сравнений с булевыми значениями для объектов

Матрица должна быть согласована, т. е. для $\forall i, j, k = \overline{1, n}$ должны выполняться условия:

- $w_{ii} = 1$;
- если $w_{ij} = 1$, то $w_{ji} = 0$;
- если $w_{ij} = 1$ и $w_{jk} = 1$, то $w_{ik} = 1$.

Затем составляется обобщенная матрица с помощью метода нахождения медианы. Все элементы медианы определяются по правилу большинства голосов, т.е. элемент обобщенной матрицы равен 1 только в том случае, если половина или больше экспертов посчитали этот элемент равным 1.

Сумма элементов матрицы по строке даст ранг объекта в порядке увеличения предпочтения (самый худший объект получит ранг 1, самый лучший – максимальный ранг), сумма элементов матрицы по столбцу – ранг объекта в порядке убывания предпочтения.

4. Непосредственная оценка.

Необходимо выбрать шкалу для оценки систем, например, действительные числа на отрезке $[0, 1]$, балльная оценка (по 5-, 10-, 100-балльной шкале), лингвистические значения (отлично, хорошо, удовлетворительно, и т.д.). В случае использования лингвистических оценок, нужно определить схему их перевода в балльные оценки, например: «отлично» – 1,0; «очень хорошо» – 0,75; «хорошо» – 0,625; «удовлетворительно» – 0,5; «посредственно» – 0,25; «неудовлетворительно» – 0.

Каждый из членов группы оценивает системы. Затем определяются коэффициенты компетентности экспертов k_i – числа в интервале $[0, 1]$.

Причем сумма коэффициентов должна быть равна 1: $\sum_{i=1}^m k_i = 1$ и

рассчитываются обобщенные оценки систем по формуле $a_j = \sum_{i=1}^m k_i a_{ij}$.

Пример постановки задачи

Задача: выбор конфигурации компьютера.

Начальный этап включает поиск и выбор информации о предметной области и формирование вариантов достижения цели. Цель: компьютер должен работать в сети, позволять выполнять основные функции офисного работника. Цена должна быть доступной. Компьютер должен иметь модем, расширитель памяти, большой «винчестер», стандартный пакет программного обеспечения, а цена должна отвечать требованиям бюджета.

Цели, которые будут иметь численное выражение: максимум цены, предельная частота, объем памяти, емкость винчестера. Оценка критериев и генерация альтернатив показаны в **таблицах 3 и 4**.

Табл. 3. Оценка важности критериев в баллах (например, 0–10)

Характеристика	Баллы
Быстрый модем	10
Полный пакет ПО	10
Оперативная память	9
Внешняя память	8

Табл. 4. Генерация и оценка альтернатив

Альтернатива А (остальные аналогично)	
Характеристика	Баллы
Быстродействие	6 (6x10=60)
2-4 элемента ПО отсутствуют	5 (5x10=50)
Оперативная память	0 (9x0=0)
Внешняя память	8 (8x8=64)
	S=174

Практические задания

Придумайте и опишите этапы решения проблемы (в соответствии с вариантом), опишите участников, выберите лучшее решение, используя процедуру экспертного оценивания.

Приложение 2. Лабораторная работа № 2

СППР на основе анализа данных

Цель работы: ознакомиться с технологией реализации выбора решений на основе анализа данных с использованием системы Deductor.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучить алгоритма построения дерева решений C4.5;
- 2) изучить основы работы с системой Deductor;
- 3) построить дерево решений на примере данных лабораторной работы;
- 4) оценить качество классификации, используя ROC анализ;
- 5) подготовить отчет по лабораторной работе.

Теоретический материал

С помощью системы Deductor могут быть реализованы все функции СППР на основе данных от создания хранилища данных до автоматического подбора моделей и визуализации полученных результатов на основе таких методик анализа, как OLAP, Knowledge Discovery in Databases и Data Mining.

В рамках данной работы предлагается познакомиться с методом классификации на основе алгоритма построения дерева решений C4.5.

Постановка задачи классификации:

X – пространство объектов (например, R^n), Y – классы (например, $Y = \{-1, 1\}$). Дана обучающая выборка: $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$.

Требуется построить функцию (классификатор), сопоставляющий класс y произвольному объекту x :

$$\iint_{X \times Y} L(A(x), y) p(x, y) dx dy \rightarrow \max$$

где $L(A(x), y(x))$ – функция потерь, которая описывает, насколько отличается $A(x)$ от $y(x)$.

$X \times Y$ пространство пар «объект-метка», на котором эти пары распределены с плотностью $p(x, y)$.

Рассмотрим как решается эта задача с использованием алгоритма С4.5. На первом шаге мы имеем пустое дерево (имеется только корень) и обучающую выборку. Требуется разбить исходное множество на подмножества. Это можно сделать, выбрав один из атрибутов в качестве проверки. Тогда в результате разбиения получаются n (по числу значений атрибута) подмножеств и, соответственно, создаются n потомков корня, каждому из которых поставлено в соответствие свое подмножество, полученное при разбиении исходного множества. Затем эта процедура рекурсивно применяется ко всем подмножествам (потомкам корня) и т.д.

Выбор атрибута, по которому должно пойти ветвление осуществляется следующим образом. Очевидно, что в нашем распоряжении m (по числу атрибутов) возможных вариантов, из которых мы должны выбрать самый подходящий. Пусть мы имеем проверку X (в качестве проверки может быть выбран любой атрибут), которая принимает n значений A_1, A_2, \dots, A_n . Тогда разбиение исходного множества T по проверке X даст нам подмножества T_1, T_2, \dots, T_n , при X равном соответственно A_1, A_2, \dots, A_n . Пусть $freq(C_j, S)$ – количество примеров из некоторого множества S , относящихся к одному и тому же классу C_j . Тогда вероятность того, что случайно выбранный пример из множества S будет принадлежать к классу C_j :

$$P = \frac{freq(C_j, S)}{|S|}$$

Согласно теории информации, количество содержащейся в сообщении информации, зависит от ее вероятности

$$\log_2 \left(\frac{1}{P} \right) \quad (1)$$

Поскольку мы используем логарифм с двоичным основанием, то выражение (1) дает количественную оценку в битах.

Выражение

$$Info(T) = - \sum_{j=1}^k \frac{freq(C_j, T)}{|T|} * \log_2 \left(\frac{freq(C_j, T)}{|T|} \right) \log_2 \left(\frac{1}{P} \right) \quad (2)$$

дает оценку среднего количества информации, необходимой для определения класса примера из множества T . В терминологии теории информации выражение (2) называется энтропией множества T .

Ту же оценку, но только уже после разбиения множества T по X , дает следующее выражение:

$$Info_X(T) = \sum_{i=1}^n \frac{|T_i|}{|T|} * Info(T_i) \log_2 \left(\frac{1}{P} \right) \quad (3)$$

Тогда критерием для выбора атрибута будет являться следующая формула:

$$Gain(X) = Info(T) - Info_X(T) \quad (4)$$

Критерий (4) считается для всех атрибутов. Выбирается атрибут, максимизирующий данное выражение. Этот атрибут будет являться проверкой в текущем узле дерева, а затем по этому атрибуту производится дальнейшее построение дерева. Т.е. в узле будет проверяться значение по этому атрибуту и дальнейшее движение по дереву будет производиться в зависимости от полученного ответа.

Такие же рассуждения можно применить к полученным подмножествам T_1, T_2, \dots, T_n и продолжить рекурсивно процесс построения дерева, до тех пор, пока в узле не окажутся примеры из одного класса. Если в процессе работы алгоритма получен узел, ассоциированный с пустым множеством (т.е. ни один пример не попал в данный узел), то он

помечается как лист, и в качестве решения листа выбирается наиболее часто встречающийся класс у непосредственного предка данного листа.

Анализ качества классификации. В качестве метрик для оценки используют следующие:

TP (*True Positives*) – верно классифицированные положительные примеры (так называемые истинно положительные случаи).

TN (*True Negatives*) – верно классифицированные отрицательные примеры (истинно отрицательные случаи).

FN (*False Negatives*) – положительные примеры, классифицированные как отрицательные (ошибка I рода). Это так называемый «ложный пропуск» – когда интересующее нас событие ошибочно не обнаруживается (ложноотрицательные примеры).

FP (*False Positives*) – отрицательные примеры, классифицированные как положительные (ошибка II рода). Это ложное обнаружение, т.к. при отсутствии события ошибочно выносится решение о его присутствии (ложноположительные случаи).

Доля истинно положительных примеров (*True Positives Rate*):

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\% \quad (5)$$

Доля ложноположительных примеров (*False Positives Rate*):

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \cdot 100\% \quad (6)$$

TPR часто называют чувствительностью (*Sensitivity*) алгоритма классификации.

Специфичность (*Specificity*) алгоритма классификации – доля истинно отрицательных случаев, которые были правильно идентифицированы моделью: $1 - FPR$.

ROC-кривая (*Receiver Operator Characteristic*) показывает зависимость TPR от FPR и используется для представления результатов бинарной классификации в машинном обучении. Площадь под ROC-

кривой AUC (*Area Under Curve*) является агрегированной характеристикой качества классификации, не зависящей от соотношения цен ошибок. Чем больше значение AUC, тем «лучше» модель классификации. Данный показатель часто используется для сравнительного анализа нескольких моделей классификации.

Реализация алгоритма C4.5 в системе Deductor

Задача: классифицировать абонентов по тарифным планам. 8 тарифных планов (Москва 2.0, Сочи 2.0, Сочи 3.0, Токио 2.0, Токио 3.0, Токио New, Нью-Йорк 2.0, неактивен) классифицируются по трём критериям – скорость днём, скорость ночью, антивирус. Исходное множество представлено в прилагаемом файле «Тарифы абонентов».

Ход реализации:

1. Создайте новый проект и импортируйте в новый проект прилагаемый к лабораторной работе файл «Тарифы абонентов».

2. Вызываем «Мастер обработки». В открывшемся окне мастера обработки в разделе Data Mining выберем пункт «Дерево решений»

3. Нажимаем далее и сверяем входные и выходные параметры для нашего дерева (см. рис. 1).

4. Нажимаем далее. На третьем шаге мастера параметры не меняем.

5. На шаге 4 мастера установим минимальное значение параметра, при котором будет создан новый узел равным 3.

6. На шаге мастера обработки 5 и 6 значения установленных параметров для нашей задачи остаются без изменений.

7. На седьмом шаге выберем элементы, которые будут отображены как результат решения. Установим галочки возле «Дерево решений», «Правила», «Что-если» (рис. 2).

8. После нажатия на кнопку готово на рабочем поле вкладки дерево мы видим построенное дерево решений (рис. 3).

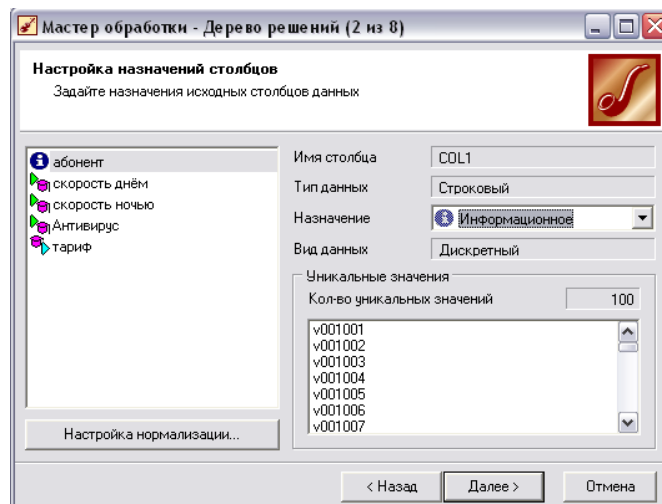


Рис. 1. Выбор входных и выходных параметров

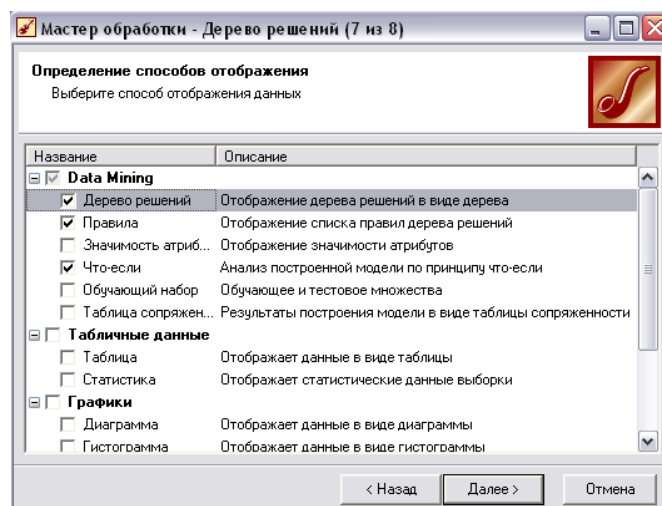


Рис. 2. Определение способа отображения результатов

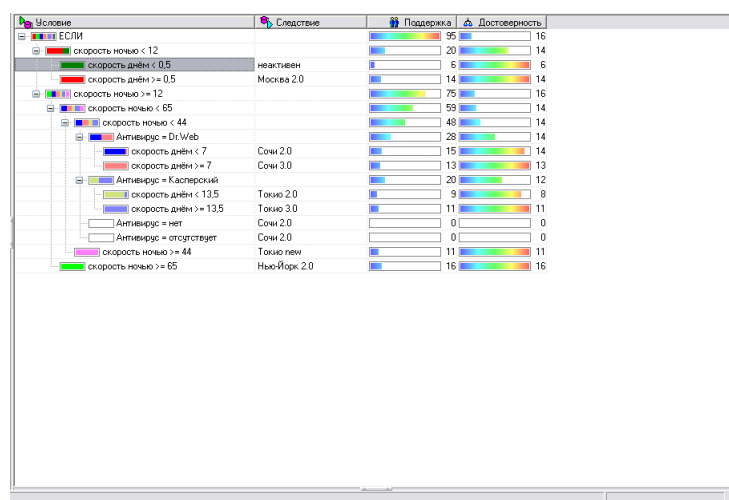


Рис. 3. Результат формирования «Дерева решений» для задачи

9. Выберем один из листов и введем контекстное меню. Выберем пункт «Информация по узлу». Справа у нас появится правило, которое описывает решение. Пример интерпретации правила приведен в [таблице 1](#).

Табл. 1. Пример интерпретации правила

№	Правило	Интерпретация правила
1	ЕСЛИ <u>скорость ночью</u> < 12 И <u>скорость днём</u> < 0,5 ТОГДА <u>тариф</u> = неактивен	Скорость у абонента отсутствует, антивирус не заявлен, значит, абонент не активен
2	ЕСЛИ <u>скорость ночью</u> < 12 И <u>скорость днём</u> >= 0,5 ТОГДА <u>тариф</u> = Москва 2.0	Скорость в ночные часы не превышает 12 мегабит, в дневные часы не опускается до нуля. Значит, скоростные режимы соответствуют заявленным в тарифном плане Москва 2.0

Практические задания

1. Приведите интерпретацию правил для остальных листов дерева. Занесите таблицу в протокол и сделайте выводы.

2. Измените установленное минимальное значение параметра, при котором будет создан новый узел. Проанализируйте как будут изменяться правила. Напишите вывод в протокол.

3. Оцените качество классификации для разных вариантов классификации.

Рекомендуемая литература

1. Deductor [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://basegroup.ru/deductor/download>

Приложение 3. Лабораторная работа № 3

Реализация сценариев поведения в СППР (когнитивные карты)

Цель работы: ознакомиться с технологиями построения когнитивных карт и сценариев развития ситуации.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучить технологию когнитивного моделирования;
- 2) изучить основы работы с системой Mental modeler;
- 3) построить когнитивную карту исследуемой ситуации;
- 4) построить сценарии изменения ситуации при различных стратегиях;
- 5) оценить сценарии и обосновать выбранное решение;
- 6) подготовить отчет по лабораторной работе.

Теоретический материал

Mental Modeler является свободно распространяемым программным обеспечением, с помощью которого можно строить нечеткие когнитивные карты сложноструктурированных ситуаций и сценарные прогнозы. Для этого должны быть реализованы следующие этапы:

1. Определение основных компонентов изучаемой системы.
2. Определение взаимосвязей между этими компонентами.
3. Построение сценариев «что, если» для определения реакций системы на возможные изменения.

Реализация сценарного прогнозирования

Для примера рассмотрим построение когнитивной модели развития произвольного региона. Будем рассматривать набор следующих факторов:

- инвестиции;
- доходы бюджета области;

- расходы бюджета области;
- экспорт продуктов с/х и добывающей промышленности;
- импорт продуктов с/х и добывающей промышленности;
- инвестиционная привлекательность;
- уровень доверия населения областной власти;
- зависимость области от Федерального центра;
- преференции области;
- приток населения;
- отток населения;
- численность населения;
- социальное благополучие;
- смертность;
- рождаемость;
- развитие производственной инфраструктуры;
- уровень безработицы;
- количество крупных и средних предприятий;
- ресурсный потенциал области;
- трудовой потенциал.

Для добавления факторов в систему нажмите на кнопку ADD COMPONENT и укажите название этих факторов (см. рис. 1).

Следующий шаг построения когнитивной модели предусматривает определение связей, характеризующих причинно-следственные отношения между выделенными факторами. Такие связи еще называют взаимовлияниями между факторами. Взаимовлияние между факторами может быть положительным, когда увеличение (уменьшение) одного фактора приводит к увеличению (уменьшению) другого фактора, и отрицательным, когда увеличение (уменьшение) одного фактора приводит к уменьшению (увеличению) другого фактора. Для отображения степени (веса) влияния используется совокупность лингвистических переменных типа «сильно»,

«умеренно», «слабо» и т. п.; такой совокупности лингвистических переменных сопоставляются числовые значения из интервала $[0, 1]$:

- «очень слабое» – 0,1;
- «умеренное» – 0,3;
- «существенное» – 0,5;
- «сильное» – 0,7;
- «очень сильное» – 1,0.

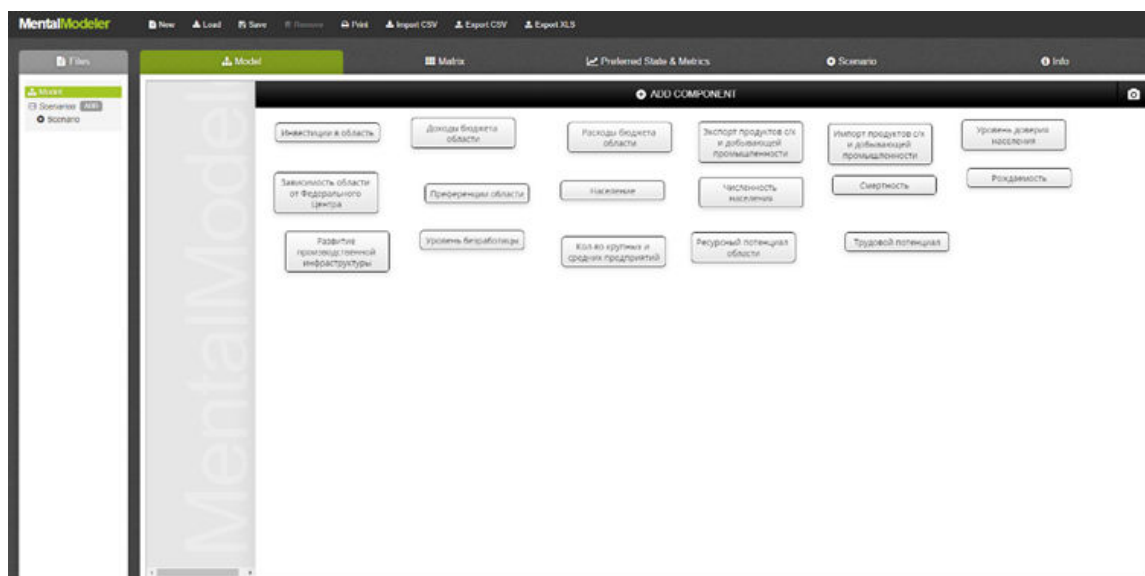


Рис. 1. Окно добавления факторов в систему

В матрице взаимовлияний строкам и столбцам сопоставляются факторы модели, а значение на пересечении i -ой строки и j -го столбца указывает вес и направление влияния i -го фактора на j -ый фактор.

При моделировании исходная ситуация описывается матрицей взаимовлияний и совокупностью начальных условий (тенденций), характеризующих исследуемую ситуацию на начало моделирования (начальных значений факторов модели).

Начальные тенденции задаются лингвистическими переменными типа «сильно», «умеренно», «слабо» и т. п.; такой совокупности

лингвистических переменных сопоставляются числовые значения из интервала $[0, 1]$. Например, для фактора «Доходы населения области» начальная тенденция равна $0,1$ (т.е. доходы слабо растут).

Если по какому-то фактору не задана тенденция, то это означает, что, либо не просматриваются заметные изменения по рассматриваемому фактору, либо недостаточно информации, чтобы оценить по нему существующую тенденцию. При моделировании считается, что значение данного фактора равно 0 (т.е. он не изменяется).

Пример начальных тенденций для нескольких факторов приведен в [таблице 1](#).

Табл. 1. Задание начальных тенденций

№	Фактор	Начальная тенденция
3	Спрос на продукцию, произведенную в области	$-0,2$ (слабо падает)
4	Доходы бюджета области	$-0,1$ (слабо падают)
5	Расходы бюджета области	$0,1$ (слабо растут)
6	Дефицит бюджета области	$0,1$ (слабо растет)
7	Экспорт продуктов с/х и добывающей промышленности	$0,2$ (слабо растет)
8	Импорт продуктов с/х и добывающей промышленности	$-0,1$ (слабо уменьшается)

Далее, руководствуясь описанными ранее критериями оценки (веса) каждого фактора, составьте граф. Для этого расставьте связи между факторами и задайте их вес ([см. рис. 2](#)).

Общая информация о модели выводится, если нажать на вкладку «Preferred State and Metrics» ([рис. 3](#)).

Полученную модель можно представить в виде матрицы взаимовлияний на вкладке «Matrix» ([рис. 4](#)).

Для моделирования динамики развития перейдите на вкладку «Scenario» ([рис. 5](#)) и измените параметры влияния. Например, если задать следующие значения: сильное увеличение инвестиций (на 1); увеличение

экспорта (на 0,7); небольшое уменьшение импорта (на $-0,4$); сильное уменьшение уровня безработицы (на -1); небольшое уменьшение оттока населения (на $-0,4$); небольшое увеличение притока населения (на 0,4) – то получим небольшой рост отслеживаемых параметров, таких как доверие населения, инвестиционная привлекательность и др.

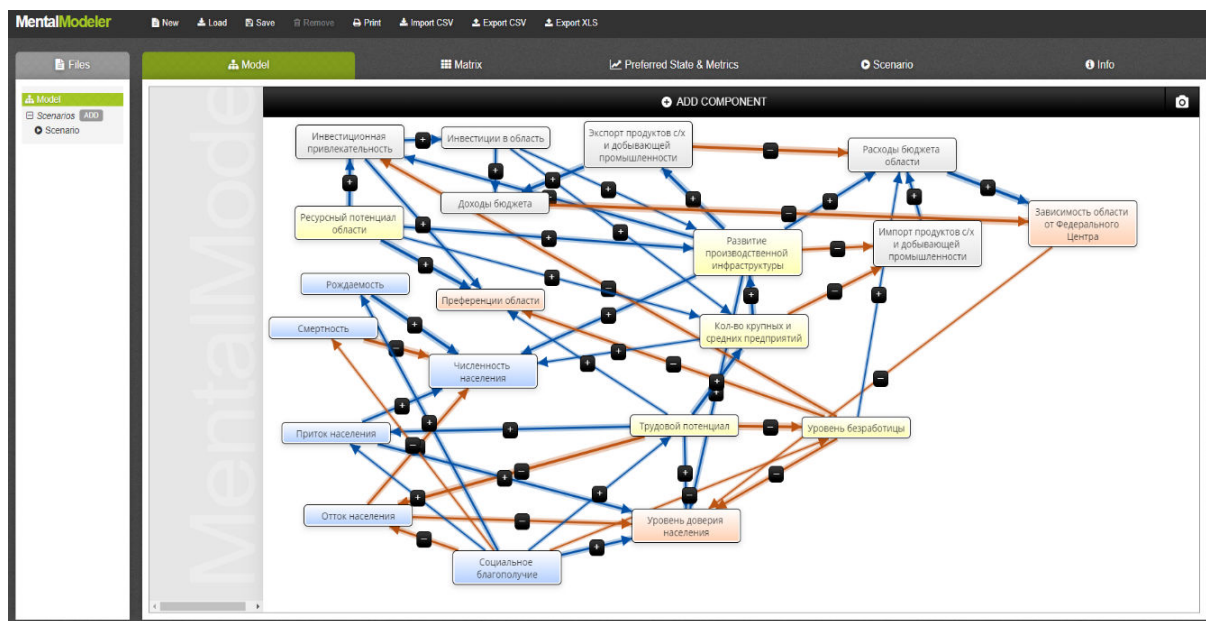


Рис. 2. Представление модели в виде когнитивной карты (графа)

Component	Indegree	Outdegree	Centrality	Preferred State	Type
Инвестиции в область	0.7	1.3	2		ordinary
Экспорт товаров с/х и добывающей промышленности	1	2	3		ordinary
Расходы бюджета области	2.6	1	3.6		ordinary
Импорт товаров с/х и добывающей промышленности	1.4	0.7	2.0999999999999999		ordinary
Уровень доверия населения	4.6000000000000005	0	4.6000000000000005		receiver
Рождаемость	0.7	1	1.7		ordinary
Численность населения	4.5	0	4.5		receiver
Смертность	0.4	1	1.4		ordinary
Зависимость области от Федерального Центра	2	0.4	2.4		ordinary
Преференции области	2.8	0	2.8		receiver
Развитие производственной инфраструктуры	2.0999999999999999	4.3000000000000001	6.4		ordinary
Уровень безработицы	1.4	2.5	3.9		ordinary
Кол-во крупных и средних предприятий	1.8	2.0999999999999999	3.8999999999999999		ordinary
Ресурсы области	0	3.1	3.1		driver
Трудовой потенциал	0.4	4.8000000000000001	5.2000000000000001		ordinary
Доходы бюджета	1.5	1	2.5		ordinary
Инвестиционная привлекательность	2.4	1.4	3.8		ordinary
Отток населения	1.7	1.4	3.0999999999999999		ordinary
Приток населения	1.1	1.4	2.5		ordinary
Социальное благополучие	0	3.7	3.7		driver

Рис. 3. Отображение общей информации о модели

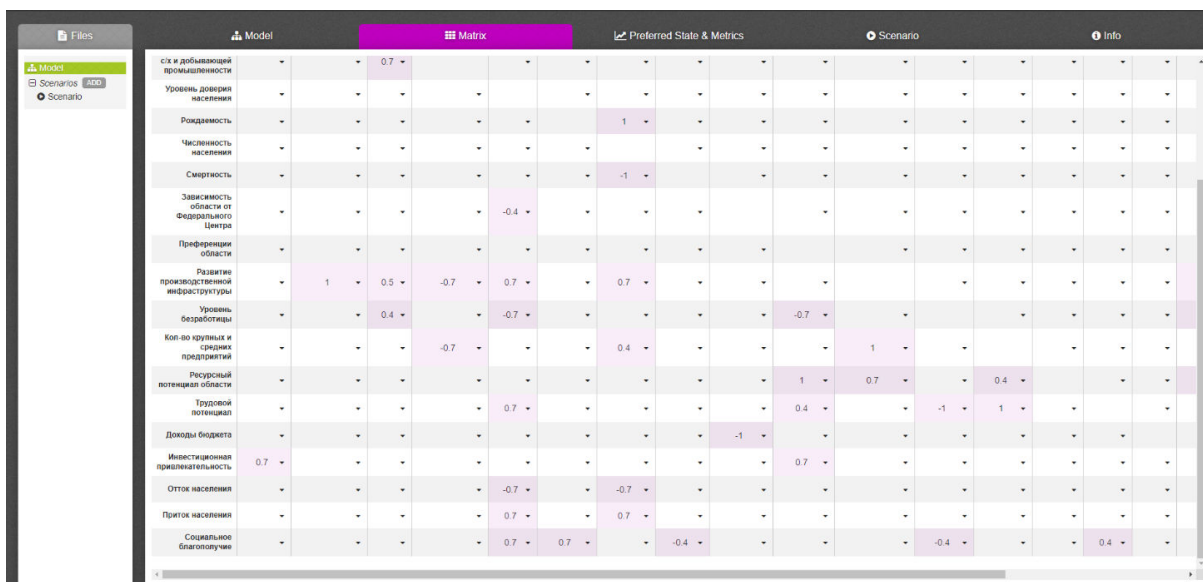


Рис. 4. Представление модели в виде матрицы взаимовлияний

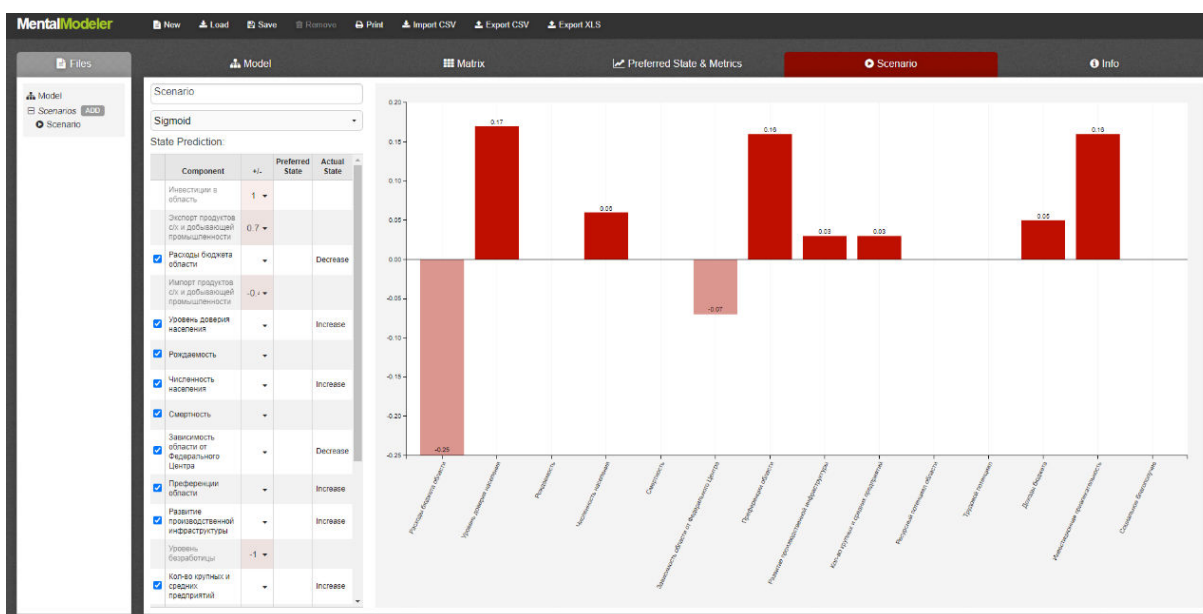


Рис. 5. Изменения параметров влияния для моделирования различных сценариев развития ситуации

Практические задания

1. Постройте когнитивную карту для произвольной предметной области (по согласованию с преподавателем).
2. Задайте начальные тенденции и оцените сценарий развития при их сохранении.

3. Выделите управляющие факторы и задайте улучшающее воздействие.

4. Постройте сценарии развития ситуации при различных стратегиях.

5. Оцените построенные сценарии и сделайте выводы.

Рекомендуемая литература

1. MentalModeler [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <http://www.mentalmodeler.org>

Приложение 4. Лабораторная работа № 4

Задачи принятия решений в условиях риска

Цель работы: ознакомиться с технологией реализации выбора решений в условиях стохастической неопределенности и риска.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучить алгоритмы расчета критериев оценки альтернатив в условиях риска и неопределенности;
- 2) написать программу реализации алгоритмов в соответствии с вариантом;
- 3) сформулировать задачу принятия решений;
- 4) провести оценку альтернатив и сделать выводы;
- 5) подготовить отчет по лабораторной работе.

Теоретический материал

Выбор решения в условиях риска может быть реализован, если задана матрица исходов для каждой из альтернатив в описанных ситуациях. Оценка исходов альтернатив в конкретной ситуации может быть проведена по одному и совокупности критериев достижения целей получения рассмотренных в первой главе пособия.

Пусть $P = |p_{ij}|$ – матрица значений вероятностей наступления исхода y_{ij} либо $P = |p_j|$ – вектор-строка распределения вероятностей появления каждого из состояний среды, если $p_{ij} = p_j(e_j)$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.

Распределение вероятностей P определяется на основе статистических оценок либо аналитическими методами, основанными на формулировке гипотез о поведении среды с использованием аксиом, теорем и методов теории вероятности. Полученное таким образом

распределение P называют *объективным распределением вероятности*.

Если множество E образует полную группу событий, то $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, i = \overline{1, m}$.

Пример расчета критериев

Необходимо оценить один из трех программных продуктов a_i для борьбы с одним из четырех программных воздействий k_j . Матрица эффективности выглядит таким образом, как показано на **рисунке 1**.

	k_1	k_2	k_3	k_4
a_1	0,8	0,5	0,1	0,2
a_2	0,2	0,3	0,5	0,6
a_3	0,7	0,2	0,3	0,9

Рис. 1. Матрица эффективности рассматриваемого примера

1. Предположим, что вероятность применения противником программных воздействий $P_1 = 0,4; P_2 = 0,2; P_3 = 0,1; P_4 = 0,3$.

Тогда по *критерию Байеса*:

$$K(a_1) = 0,4*0,8+0,2*0,5+0,1*0,1+0,3*0,2 = 0,49$$

$$K(a_2) = 0,4*0,2+0,2*0,3+0,1*0,5+0,3*0,6 = 0,37$$

$$K(a_3) = 0,4*0,7+0,2*0,2+0,1*0,3+0,3*0,9 = 0,62$$

$$K^{opt} = \max(0,49; 0,37; 0,62) = 0,62$$

Оптимальное решение по данному критерию – программный продукт a_3 .

2. Если нет оснований утверждать, что вероятность применения противником программных воздействий различны, то можно допустить, что они одинаковы. В этом случае используем *критерий Лапласа*.

Оптимальному решению будет соответствовать такое решение, которому сопоставляется максимальное значение этого среднего арифметического:

$$K(a_i) = \sum_{j=1}^l P_j k_{ij}$$

$$K^{\text{опт}} = \max_i \sum_{j=1}^l P_j k_{ij}$$

$$K(a_1) = 0,25*(0,8+0,5+0,1+0,2) = 0,4$$

$$K(a_2) = 0,25*(0,2+0,3+0,5+0,6) = 0,4$$

$$K(a_3) = 0,25*(0,7+0,2+0,3+0,9) = 0,525$$

$$K^{\text{опт}} = \max(0,4; 0,4; 0,525) = 0,525$$

Оптимальное решение по данному критерию – программный продукт a_3 .

3. Стратегия, максимизирующая максимальные выигрыши для каждого состояния природы реализуется с помощью *критерия максимакса*. Это критерий крайнего оптимизма. Наилучшим признается решение, при котором достигается максимальный выигрыш. При этом риск максимальный:

$$K(a_i) = \max_j k_{ij}$$

и тогда оптимальной системе будет соответствовать эффективность

$$K^{\text{опт}} = \max_i (\max_j k_{ij})$$

Решение будет выглядеть следующим образом (рис. 2):

$$K^{\text{опт}} = \max(0,8; 0,6; 0,9) = 0,9$$

Оптимальное решение по данному критерию – программный продукт a_3 .

4. *Критерий Вальда (максимина)* является диаметральной противоположностью критерия «максимакса». В каждой строчке матрицы

выбираем минимальную оценку. Оптимальному решению соответствует такое решение, которому соответствует максимум этого минимума, т. е.

$$K(a_i) = \min_j k_{ij}$$

и тогда оптимальной системе будет соответствовать эффективность

$$K^{\text{опт}} = \max_i (\min_j k_{ij})$$

	k_1	k_2	k_3	k_4	$K(a_i)$
a_1	0,8	0,5	0,1	0,2	0,8
a_2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,6
a_3	0,7	0,2	0,3	0,9	0,9

Рис. 2. Матрица решения для стратегии на основе критерия *максимакса*

Решение будет выглядеть следующим образом (**рис. 3**):

$$K^{\text{опт}} = \max(0,1; 0,2; 0,2) = 0,2$$

Оптимальное решение по данному критерию – программные продукты a_2 и a_3 .

	k_1	k_2	k_3	k_4	$K(a_i)$
a_1	0,8	0,5	0,1	0,2	0,1
a_2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,2
a_3	0,7	0,2	0,3	0,9	0,2

Рис. 3. Матрица решения для стратегии на основе критерия *максимина*

5. Решение, при котором минимизируются максимальные потери, может быть получено на основе *Критерий Сэвиджа (минимакса)*. Выбор стратегии по принципу Сэвиджа отличается от других тем, что используется не матрица выигрышей, а матрицей рисков. В каждом столбце матрицы выигрышей находится максимальная оценка и

составляется новая матрица, элементы которой определяются соотношением

$$\Delta k_{ij} = \max_i k_{ij} - k_{ij}$$

Далее из матрицы рисков выбирают такое решение, при котором величина риска принимает наименьшее значение в самой неблагоприятной ситуации

$$K(a_i) = \max_j \Delta k_{ij}$$

и тогда оптимальной системе будет соответствовать эффективность

$$K^{\text{опт}} = \min_i (\max_j \Delta k_{ij})$$

Матрицу рисков Δk выглядит так, как показано на [рисунке 4](#). Решение будет выглядеть следующим образом ([рис. 5](#)):

$$K^{\text{опт}} = \min(0,7; 0,6; 0,3) = 0,3$$

	k_1	k_2	k_3	k_4
a_1	0,8 – 0,8	0,5 – 0,5	0,5 – 0,1	0,9 – 0,2
a_2	0,8 – 0,2	0,5 – 0,3	0,5 – 0,5	0,9 – 0,6
a_3	0,8 – 0,7	0,5 – 0,2	0,5 – 0,3	0,9 – 0,9

Рис. 4. Матрица рисков Δk

	k_1	k_2	k_3	k_4	$K(a_i)$
a_1	0	0	0,4	0,7	0,7
a_2	0,6	0,2	0	0,3	0,6
a_3	0,1	0,3	0,2	0	0,3

Рис. 5. Матрица решения для стратегии на основе критерия *минимакса*

Оптимальное решение по данному критерию – программный продукт a_3 .

Практические задания

1. Напишите программу, реализующую расчет численных выше критериев (в соответствии с вариантом).
2. Сформулируйте задачу принятия решения для произвольной проблемной ситуации в условиях риска. Определите вероятности реализации возможных исходов.
3. Рассчитайте оптимальное решение по критерию.

Приложение 5. Лабораторная работа № 5
Задачи выбора альтернатив с использованием
метода анализа иерархий (МАИ)

Цель работы: получение навыков применения метода анализа иерархий для выбора альтернативных решений.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучить теоретический материал по теме;
- 2) изучить систему Super Decisions;
- 3) разобрать пример реализации;
- 4) разработать алгоритм реализации задания в соответствии с вариантом;
- 5) получить и проанализировать результаты решения задачи;
- 6) оформить отчет о проделанной работе в соответствии с требованиями.

Теоретический материал

Основные положения теории многокритериальной оптимизации изложены в первой главе пособия. Порядок применения МАИ:

1. Построение качественной модели проблемы в виде иерархии, включающей цель, альтернативные варианты достижения цели и критерии для оценки качества альтернатив.
2. Определение приоритетов всех элементов иерархии с использованием метода парных сравнений.
3. Синтез глобальных приоритетов альтернатив путем линейной свертки приоритетов элементов на иерархии.
4. Проверка суждений на согласованность.
5. Принятие решения на основе полученных результатов.

Пример реализации МАИ

Постановка задачи: выбрать средство защиты информации (СЗИ).

Альтернативы: Dallas Lock 8С, Dallas Lock 8К, Secret Net, Secret Net (touch memory), Secret Net (Соболь), АМДЗ Аккорд, ПАК Аккорд, ПАК Соболь, Страж NT.

Критерии:

- 1) использование средств аппаратной поддержки;
- 2) шифрование пользовательской информации;
- 3) осуществление аудита событий;
- 4) контроль целостности ресурсов;
- 5) настройки замкнутой программной среды;
- 6) стоимость средств защиты;
- 7) предпочтения администраторов безопасности;
- 8) наличие механизма дискреционного контроля доступа к объектам файловой структуры и устройствам;
- 9) затирание информации;
- 10) поддержка аутентификации.

Для решения поставленной задачи используется свободно распространяемое программное обеспечение Super Decisions.

При создании модели задаются кластеры, описываются узлы и указываются связи между узлами для каждого уровня иерархии (рис. 1).

Далее необходимо указать приоритеты критериев и подкритериев. Видно, что основным критерием является стоимость выбираемого СЗИ (рис. 2).

Следующим шагом является попарное сравнение альтернатив. Результат заполнения матрицы попарного сравнения для критерия «Стоимость средств защиты» приведен на рисунке 3. Аналогично заполняются таблицы попарных сравнений для остальных критериев.

Результат сравнения альтернатив является ответом на поставленную задачу принятия решений (рис. 4).

Наилучшим СЗИ по заданным критериям является Dallas Lock 8К.

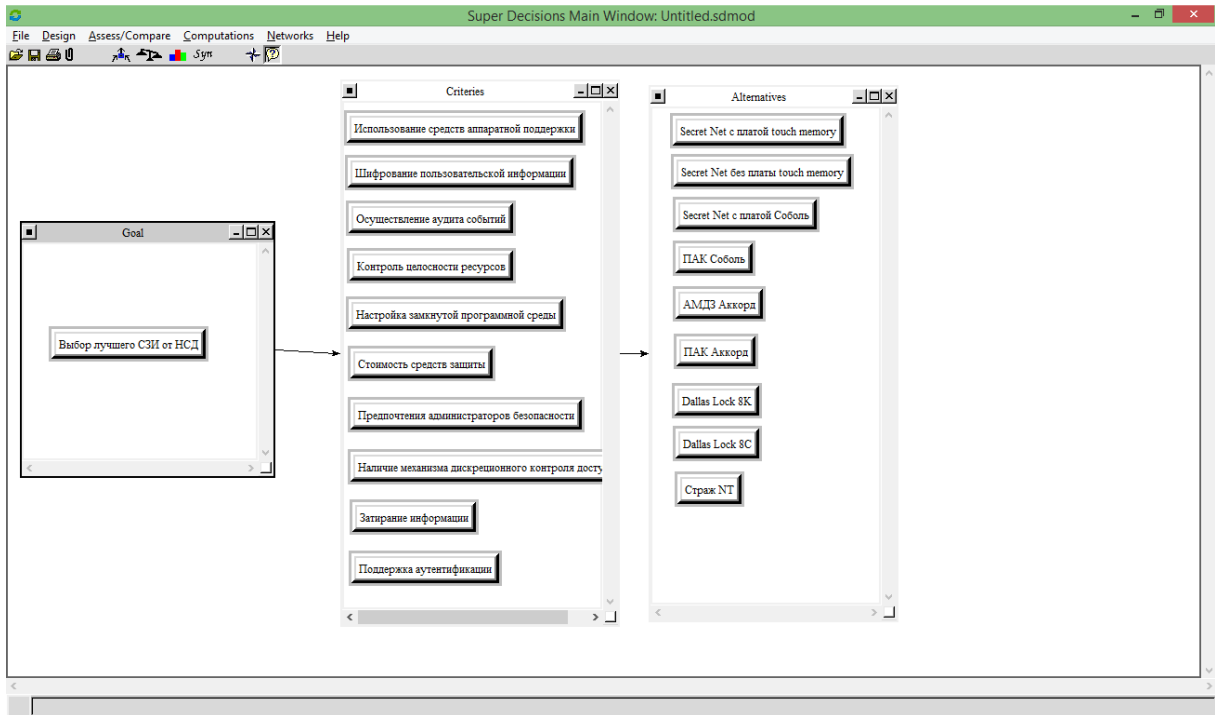


Рис. 1. Стартовая настройка узлов и связей

Comparisons for Super Decisions Main Window: Untitled.sdmod

1. Choose 2. Node comparisons with respect to Выбор лучшего СЗИ от НСД 3. Results

Node Cluster: Choose Node, Cluster: Goal, Choose Cluster, Criteria

Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct

Comparisons wrt "Выбор лучшего СЗИ от НСД" node in "Criteria" cluster
 Затирание информации is moderately more important than Использование средств аппаратн

Priority	Criterion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.					
2.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Использование с-				
3.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Контроль целосн-				
4.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Наличие механиз-				
5.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Настройка замкн-				
6.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Осуществление а-				
7.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Поддержка аутен-				
8.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Предпочтения ад-				
9.	Затирание инфор-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Стоимость средс-				
10.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Шифрование поль-				
11.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Контроль целосн-				
12.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Наличие механиз-				
13.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Настройка замкн-				
14.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Осуществление а-				
15.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Поддержка аутен-				
16.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Предпочтения ад-				
17.	Использование с-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Стоимость средс-				
18.	Контроль целосн-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Шифрование поль-				
19.	Контроль целосн-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Наличие механиз-				
20.	Контроль целосн-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Настройка замкн-				
21.	Контроль целосн-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Осуществление а-				
22.	Контроль целосн-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Поддержка аутен-				
23.	Контроль целосн-	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Предпочтения ад-				

3. Results

Inconsistency: 0.26952

Criterion	Value
Затирание инфор-	0.04305
Использовани-	0.06171
Контроль целосн-	0.06366
Наличие механиз-	0.05678
Настройка замкн-	0.12005
Осуществвл-	0.05394
Поддержка аутен-	0.16423
Предпочте-	0.04547
Стоимость средс-	0.32803
Шифровани-	0.06307

Completed Comparison

Copy to clipboard

Рис. 2. Указание приоритетов критериев и подкритериев

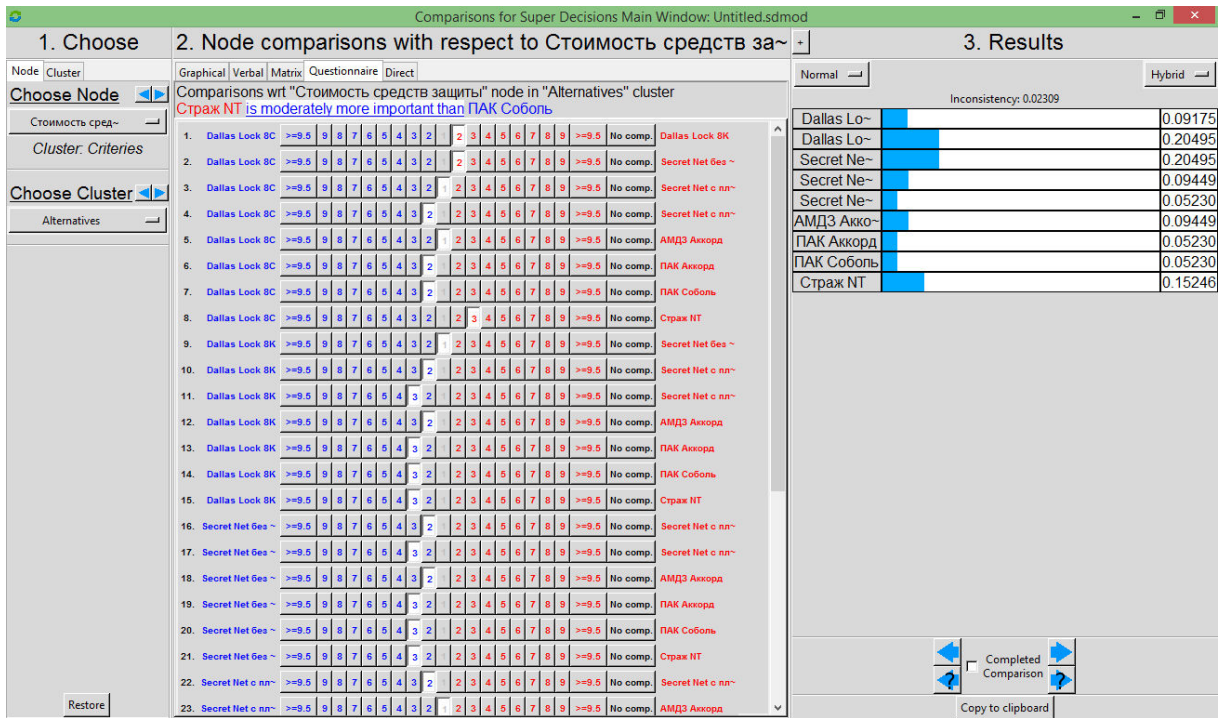


Рис. 3. Матрица попарного сравнения для критерия «Стоимость средств защиты»

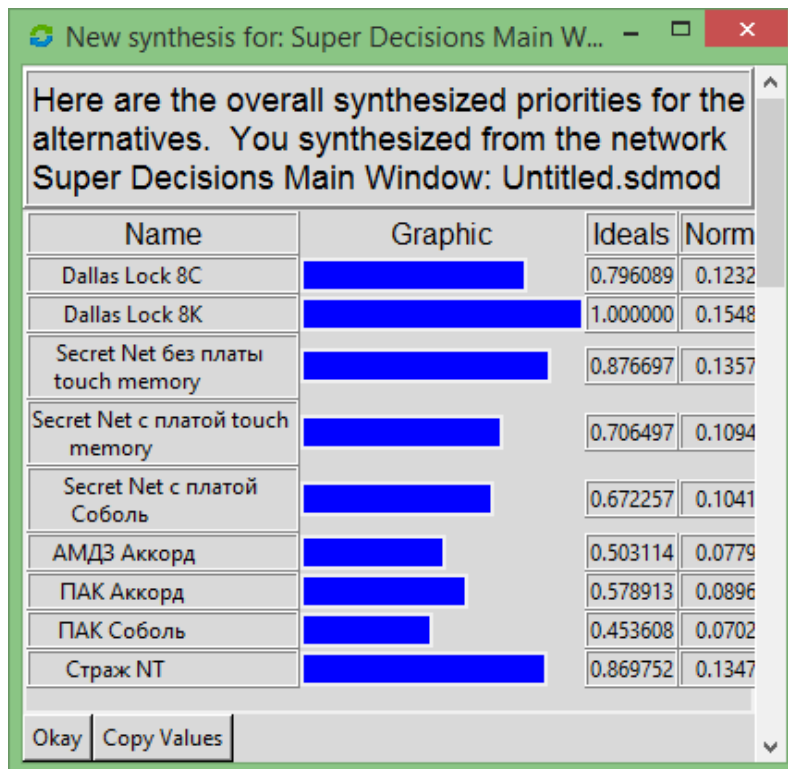


Рис. 4. Результат сравнения альтернатив

Практические задания

Во всех задачах лучший вариант выбирается из 5 альтернатив, количество критериев оценки 6–8, задается 2 уровня иерархии критериев:

1. Выбрать оператора сотовой связи.
2. Выбрать подходящий смартфон для покупки.
3. Выбрать гостиницу.
4. Выбрать место работы.
5. Выбрать подарок другу на день рождения.
6. Выбрать сотрудника на замещение вакантной должности.
7. Выбрать тему выпускной работы.
8. Выбрать курсы для повышения квалификации.

Рекомендуемая литература

1. Super Decisions [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа : <https://www.superdecisions.com/>

Приложение 6. Лабораторная работа № 6

Методы генерации идей

Цель работы: освоение методов генерации идей.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучить теоретический материал по теме;
- 2) сформулировать постановку задачи принятия решений по указанной схеме;
- 3) выбрать алгоритм реализации задания в соответствии с вариантом;
- 4) провести экспертную оценку вариантов решения задачи;
- 5) оформить отчет.

Теоретический материал

Для стимулирования процессов генерации идей существуют различные методы:

- метод аналогий (синектика);
- списки контрольных вопросов;
- метод «мозгового штурма»;
- ТРИЗ (*теория решения изобретательских задач* Г. Альтшуллера);
- метод морфологического анализа (*морфологический ящик* Ф. Цвикки);
- метод «шесть шляп»;
- метод фокальных объектов, и др.

Контрольные списки для генерирования идей действуют так: вам задается вопрос о том, каким будет результат, если вы будете манипулировать информацией определенным образом. Их можно применять к идеям или объектам, т.к. они были разработаны для различных целей. Один из хорошо известных примеров – Контрольный список для новых идей (Check List for New Ideas), разработанный Алексом Осборном, – состоит из серии «стимулирующих» вопросов под следую-

щими рубриками: Использовать для других целей? Адаптировать? Модифицировать? Увеличить? Уменьшить? Заменить? Переделать? Полностью изменить? Объединить?

Мозговой штурм (*мозговая атака*, от англ. «brainstorming») – оперативный метод решения проблемы на основе стимулирования творческой активности, при котором участникам обсуждения предлагают высказывать как можно большее количество вариантов решения, в том числе самых фантастичных. Затем из общего числа высказанных идей отбирают наиболее удачные, которые могут быть использованы на практике. Является методом экспертного оценивания.

Синектика (от англ. «Synectics») – метод коллективной творческой деятельности, основанный на целенаправленном использовании интуитивно-образного, метафорического мышления участников. Разработанная в конце 50–60-х годов американским психологом У. Гордоном на основе «мозгового штурма», синектика развивалась как совместная поисковая деятельность экспертных групп с использованием догадок, смелых гипотез, «сумасшедших идей» и интуитивных решений. В отличие от «мозгового штурма» синектика представляет собой спокойную умозрительную деятельность, целенаправленно получающую идеи и предполагающую оценку полученных результатов в период сессии. В организации творческой активности группы внимание уделяется отказу от стандартных подходов. Синекторы должны обладать не только различными знаниями, но и различными эмоциональными типами. Аналогии бывают разных типов:

1. При *прямой аналогии* рассматриваемый объект сравнивается с более или менее похожим аналогичным объектом в природе или технике.

2. *Символическая аналогия* требует в парадоксальной форме сформулировать фразу, буквально в двух словах отражающую суть явления.

3. В *фантастической аналогии* нужно представить изменяемый объект таким, каким мы хотели бы его видеть в идеальном случае, без учета существующих ограничений и возможностей (наличия источников энергии, необходимых условий, физических законов и пр.). После формулировки фантастической аналогии необходимо выяснить, что мешает перенести найденное решение в реальные условия и попробовать обойти эту помеху.

4. *Личная аналогия (эмпатия)* позволяет представить себя тем предметом или частью предмета, о котором идёт речь в задаче. Синектор представляет себя техническим объектом (например, самолетом, луноходом) и пытается осознать, как бы он действовал в данных обстоятельствах.

Морфологический анализ – пример системного подхода в области изобретательства. Метод разработан известным швейцарским астрономом Ф. Цвикки в 1942 году. Благодаря этому методу ему удалось за короткое время получить значительное количество оригинальных технических решений в ракетостроении. Цель – создать условия, расширяющие область поиска новых идей и решений проблемы, исходя из особенности строения (морфологии) совершенствуемого объекта. Этапы анализа:

- 1) формулировка проблемы;
- 2) постановка задачи;
- 3) составление списка всех характеристик обследуемого (предполагаемого) продукта или операции;
- 4) составление перечня возможных вариантов решения по каждой характеристике (перечень называется морфологической картой или таблицей, если характеристик продукта – 2, или «морфологическим ящиком (гиперящиком)», если характеристик – 3 и более);
- 5) анализ сочетаний;
- 6) выбор наилучшего сочетания.

Пример реализации метода генерации идей

Воспользуемся методом морфологического анализа для генерации альтернатив комбинаторным способом. Для примера возьмем задачу формирования решения по разработке информационной системы мониторинга состояния сложно технического оборудования. Система включает в себя следующие основные компоненты, которые могут быть реализованы различным способом (рис. 1). Компоненты архитектуры объединены в подсистемы (уровни), в соответствии с их функциональным назначением:

1) подсистема сбора данных о состоянии оборудования (газотурбинной установки), данных обеспечивающих систем и данных систем в операционном окружении;

2) подсистема передачи данных, предназначенная для отказоустойчивой передачи данных по защищённым каналам связи и реализующая прикладной программный интерфейс для доступа к потокам данных;

3) подсистема обработки потоков данных, предназначенная для опроса подсистемы передачи данных, получения и предварительной обработки потоков данных в режиме реального времени в целях генерации метаданных и записи в хранилище данных;

4) подсистема хранения данных и метаданных, реализующая прикладной программный интерфейс для доступа к данным и сохранения результатов вычислений;

5) подсистема бизнес-логики, включающая программные пакеты математико-статистических методов анализа данных и машинного обучения для предиктивного анализа генерирующего оборудования;

6) подсистема представления (графического пользовательского интерфейса), предназначенная для взаимодействия с пользователями прототипа системы.

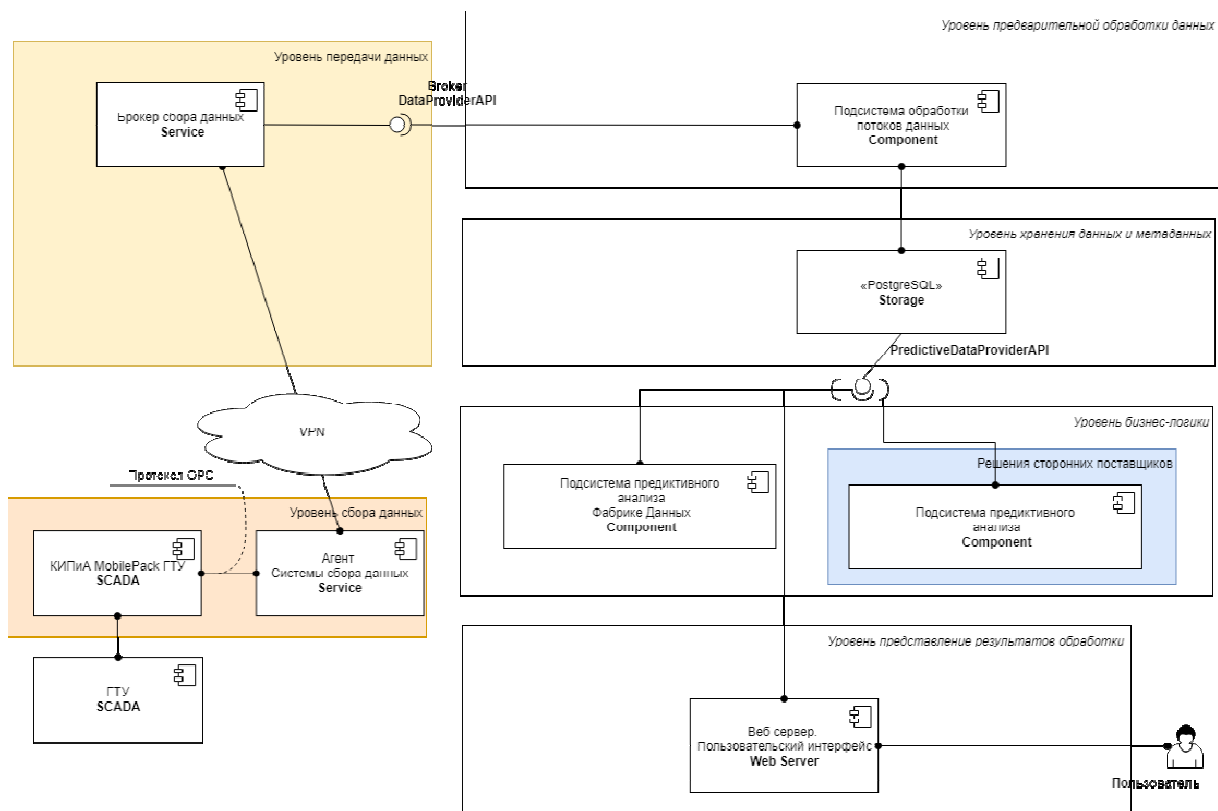


Рис. 1. Компонентная диаграмма предлагаемой архитектуры прототипа системы предиктивного анализа работы генерирующего оборудования

Выделим альтернативные варианты реализации подсистем:

1. Подсистема сбора данных:

- а) протокол OPC;
- б) протокол МЭК;
- в) протокол СІТЕСТ.

2) Подсистема передачи данных:

- а) брокер как микросервис;
- б) брокер MQTT;
- в) без брокера очередей.

3. Подсистема обработки потоков данных:

- а) без обработки потоков данных;
- б) Spark Streaming.

4. Подсистема хранения данных и метаданных:

а) СУБД PostgreSQL;

б) СУБД ClickHouse;

в) СУБД MS SQL;

г) СУБД Oracle.

5. Подсистема бизнес-логики (язык реализации):

а) C#;

б) Python;

в) Java.

6. Подсистема представления:

а) Javascript + css;

б) React JS.

Сведем альтернативы в морфологическую таблицу (см. рис. 2). Далее генерация осуществляется выбором той или иной альтернативы для подсистемы. Например, мы можем получить новое решение:

1.a – 2.b – 3.a – 4.a – 5.c – 6.a

С				
П1	1.a	1.b	1.c	
П2	2.a	2.b	2.c	
П3	3.a	3.b		
П4	4.a	4.b	4.c	4.d
П5	5.a	5.b	5.c	
П6	6.a	6.b		

Рис. 2. Морфологическая таблица альтернатив

Практические задания

В рамках выполнения практического задания необходимо:

- 1) выбрать систему из перечня вариантов;
- 2) сформировать для выбранной системы компоненты;
- 3) предложить альтернативные варианты реализации компонент;
- 4) построить морфологическую матрицу;

- 5) сгенерировать три альтернативных решения системы;
- 6) дать сравнительный анализ полученных решений.

Перечень вариантов задания:

1. Система «турникет».
2. Система «Автоматическая теплица».
3. Система «Автомобиль с автопилотом».
4. Система «Электронные часы».
5. Система «Смартфон».
6. Система «Персональный компьютер».
7. Система «Зоопарк».
8. Система видеонаблюдения.
9. Система автоматизированного управления складом.

Приложение 7. Методические указания к контрольной работе «Разработка СППР»

Цель работы: получить навыки применения систем поддержки принятия решений для решения прикладных задач.

Практическое задание:

Разработать концепцию СППР и реализовать прототип системы в конкретной предметной области (определяется по согласованию с преподавателем и научным руководителем магистранта).

Основные этапы выполнения задания:

1. Постановка задачи. Формализация процесса принятия решений в выбранной предметной области:

– описание предметной области, основных проблем принятия решений, их классификации, особенностей, ограничений, требований к результатам;

– формализация процесса принятия решений (с использованием известных нотаций).

2. Формулирование требований ЛПР к СППР.

– определить требования ЛПР;

– определить требования к продукту и процессу;

– разработать функциональные требования.

– разработать нефункциональные требования – внешние интерфейсы (External Interfaces), атрибуты качества (Quality Attributes), ограничения (Constraints).

3. Выбор технологий поддержки принятия решений (анализ, сравнение и выбор математического обеспечения и типа СППР).

4. Разработка архитектуры СППР.

5. Реализация прототипа СППР.

Учебное издание

Наталья Петровна **Садовникова**
Данила Сергеевич **Парыгин**
Максим Владимирович **Щербаков**

**СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

Учебное пособие

Редактор *Л. Н. Рыжих*

Темплан 2021 г. (учебники и учебные пособия). Поз. № 89.
Подписано в печать 09.03.2021. Формат 60x84 1/16. Бумага газетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,28. Уч.-изд. л. 4,70.
Тираж 50 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии издательства ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.