

Принципы и методы математического моделирования интеллектуальных систем

А.В. Чечкин

Математическая информатика [1] – основа интеллектуальных технологий и в первую очередь моделирования интеллектуальных систем. Последнее время развивается новый подход к интеллектуальным системам, перспективное направление в информатике, новая парадигма искусственного интеллекта. Направление возникло как обобщение идеи гипермедиа на базе понятий математической информатики. Предполагается, что интеллектуальная система – это самообучающаяся и самоорганизующаяся среда оперативных структурных единиц, РАДИКАЛЫ, имеющих два вида состояний, пассивное и активное. В процессе обучения и развития радикалы изменяются, рождаются и уничтожаются. При решении задач интеллектуальной системой радикалы самоорганизуются в АКТИВНУЮ РАБОЧУЮ СЕТЬ.

Введение

В начале рассмотрим следующую классификацию систем, рис. 1.
ПРЕДМЕТНАЯ ОБЛАСТЬ (ПО) – произвольная система как множество элементов (объектов) со связями (отношениями) между элементами.
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА (ИФС) – система хранения и преобразования семантической информации о некоторой ПО. Таким образом ИФС всегда имеет свою ПО внешнюю по отношению к ИФС. Основными понятиями теории ИФС являются **ИНФОРМАЦИЯ О ТОЧКЕ**,

ДАнные О ТОЧКЕ, РЕШЕТКИ и ШКАЛЫ ПОНЯТИЙ и ДОВЕРНОСТЕЙ, УЛЬТРАОПЕРАТОР, КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ О ТОЧКЕ, ИНФОРМАЦИОННАЯ ПРОИЗВОДНАЯ УЛЬТРАОПЕРАТОРА и др. [1].

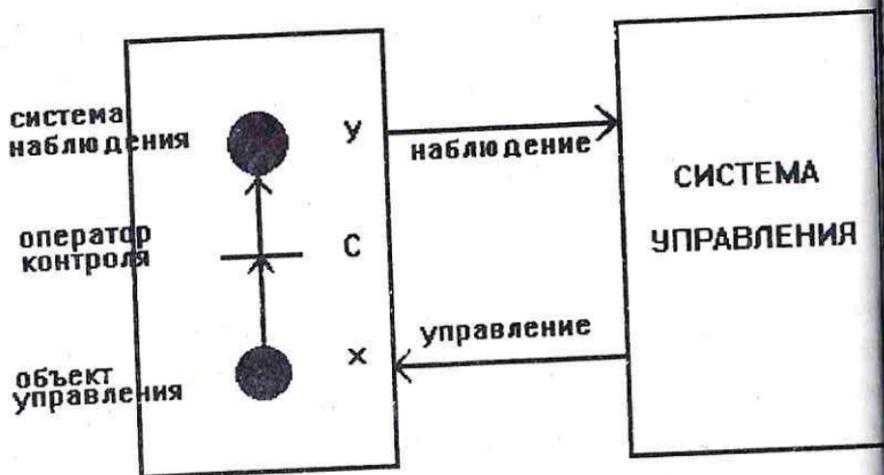


Рис. 1. Кибернетическая система.

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА (ЭС) – система сбора, хранения, образования семантической информации о некоторой ПО. Всякая ЭС имеет свою внешнюю ПО, свою ИФС как информационную область, свою МОДЕЛИРУЮЩУЮ ОБЛАСТЬ (МО) как внутреннюю информационную область, аналог внешней ПО ЭС и, наконец, всякая ЭС имеет МИНАЛЬНУЮ ОБЛАСТЬ (ТО), где датчики ЭС осуществляют сбор семантической информации о ПО и МО в ИФС.

УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА (УС) – это целенаправленная система, то есть система управления некоторыми объектами из ПО с заданной целью, рис. 1. При этом цель фиксированная, ОДНА для данной системы, определяющая специализацию УС. Тем самым всякая УС имеет свою внешнюю ПО. Часть объектов ПО является управляемыми. В процессе управления УС выступает как контрольная (координатная) система, в рамках которой УС оценивает управляемые объекты. Имеющуюся зависимость между управляемыми объектами и контрольной системой определяет оператор контроля (условия и ограничения управления). Всякая УС имеет ИФС и МО. В ИФС осуществляется хранение семантической информации.

о ПО и МО и преобразование такой информации при решении физической для данной УС задачи управления. В МО происходит движение (внутреннее экспериментирование) ПО. В ТО датчики УС осуществляют сбор информации о ПО для наблюдения за управляемыми объектами, а исполнители УС осуществляют управляющие воздействия органы УС на управляемые объекты ПО.

ИФС, ЭС, УС относят к кибернетике. КИБЕРНЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА (КС), тем самым, всегда решает ОДНУ фиксированную ЗАДАЧУ. Для УС – это ее специализация. Для ИФС, ЭС – это ЗАПРОС. Основными понятиями математической кибернетики являются МОДЕЛЬ, ЗАДАЧА, МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ, АЛГОРИТМ, АВТОМАТ и др..

Интеллектуальные системы

Вначале коротко обсудим функциональные и структурные особенности интеллектуальных систем.

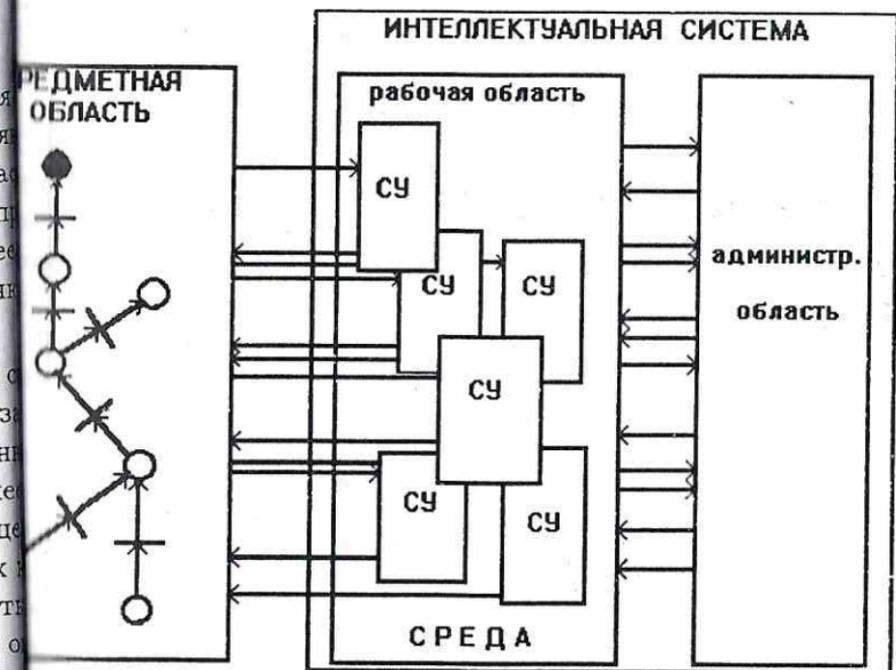


Рис. 2. Интеллектуальная система.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА (ИС), рис. 2, – это система постановки (выбора) ЗАДАЧИ из допустимого для данной ИС КЛАССА, определяющего специализацию ИС, решение такой задачи, закрепление опыта решения и, если необходимо, изменение допустимого класса задач. Тем самым в ИС происходят следующие четыре взаимодействия процесса:

- МОТИВАЦИЯ ИС – постановка задачи из допустимого класса, анализ этой задачи,
- САМООРГАНИЗАЦИЯ ИС – решение этой задачи,
- САМООБУЧЕНИЕ ИС – закрепление опыта такого решения,
- РАЗВИТИЕ ИС – изменение допустимого класса задач.

Гипотеза. С информационной точки зрения все ИС функционально и устроены ОДИНАКОВО. Отличия ИС только в специализации, которая есть в КЛАССАХ допустимых ЗАДАЧ и соответственно ВНЕШНИХ ПО этих ИС.

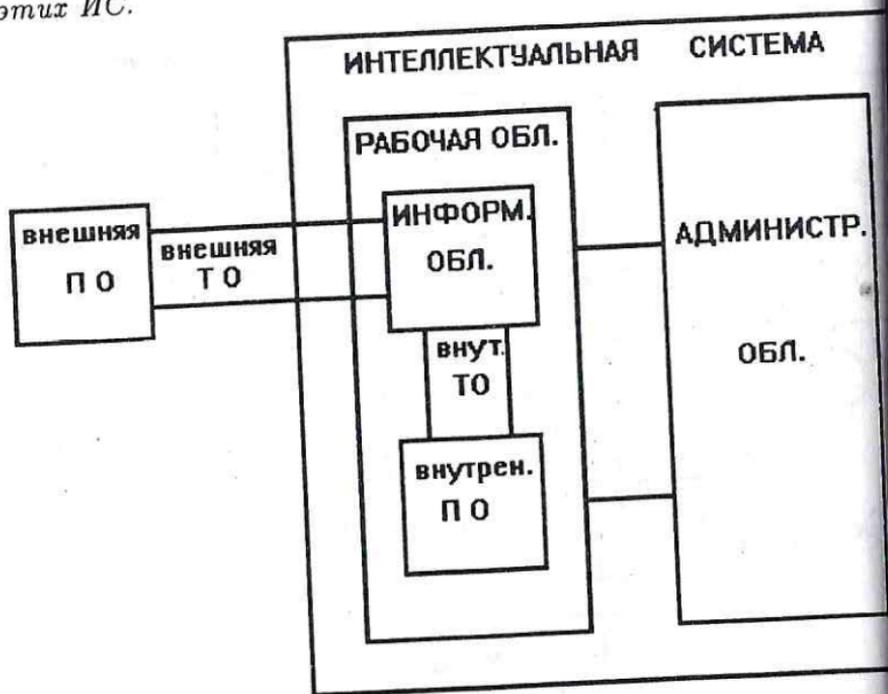


Рис. 3. Структура ИС.

Принцип многоуровневого управления. **ПРОСТЕЙШАЯ ИС** – это схема двухуровневого управления, рис. 3. Первый уровень управления – это **РАБОЧАЯ ОБЛАСТЬ ИС**. Она управляет только объектами **ВНЕШНЕЙ** и **ВНУТРЕННЕЙ ПО**. Второй уровень управления – это **МИНИСТРАТИВНАЯ (ЭМОЦИОНАЛЬНАЯ) область ИС**. Ее область управления только в рабочей области ИС.

С в общем случае является многоуровневой (вложенной) системой управления, которая получается из **ПРОСТЕЙШЕЙ ИС** заменой **КС** внешней и административной областей на соответствующие ИС.

Основные типы интеллектуальных систем

СОЦИАЛЬНАЯ ИС. Естественный интеллект коллектива.

ФИРМА как ИС. Организационная система.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИС. Человеко – машинная система.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ИС. Естественный интеллект индивидуума. Человек или высшее животное.

СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА. Техническая информационная система, основанная на знаниях и моделях. В настоящее время в информатике наметилась тенденция организации интеллектуальных сред на основе глобальных информационных сетей. Такие среды включают в себя большое число профессионально ориентированных экспертных систем и многочисленные модели разнообразных предметных областей.

Принцип среды радикалов. **РАБОЧАЯ ОБЛАСТЬ ИС** представляет собой сеть **БАЗОВЫХ функциональных ЭЛЕМЕНТОВ**, связями которыми имеют **РАЗНУЮ** силу, **РАЗНЫЙ** вес активности. **ЭЛЕМЕНТЫ** из **БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ** со связями **РАВНОГО** веса активности называются **РАДИКАЛАМИ**. **РАДИКАЛЫ** могут находиться в двух состояниях, **ПАССИВНОМ** и **АКТИВНОМ**. **БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** одного **РАДИКАЛА** либо все пассивны, либо все активны, то есть они составляют **СХЕМУ**. Таким образом **РАБОЧАЯ**

ОБЛАСТЬ ИС есть **СРЕДА РАДИКАЛОВ**. Из активных **РАДИКАЛОВ** образуется временная **АКТИВНАЯ РАБОЧАЯ СЕТЬ** для решения очередной задачи. Такая **АКТИВНАЯ СЕТЬ** представляется временную рабочую **КИБЕРНЕТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ**, которая является тактической **КС**. Процесс образования **АКТИВНОЙ СЕТИ** решением ею своей задачи называется **САМООРГАНИЗАЦИЕЙ ИС**. **АДМИНИСТРАТИВНАЯ ОБЛАСТЬ** выделяет задачу (**МОТИВ ИС**) из допустимого **КЛАССА**, в **СРЕДЕ РАДИКАЛОВ** эта задача решается (**САМООРГАНИЗАЦИЯ ИС**). После решения задачи **РАДИКАЛОВ** переходит в пассивное состояние, а результат работы оценивается в **АДМИНИСТРАТИВНОЙ ОБЛАСТИ**. По результатам такого оценивания **АДМИНИСТРАТИВНАЯ ОБЛАСТЬ** изменяется (**САМООБУЧЕНИЕ** и **РАЗВИТИЕ ИС**).

СРЕДА РАДИКАЛОВ распадается на три части, рис. 3.

- **УЛЬТРА СРЕДА** – это **ИНФОРМАЦИОННАЯ** область, где хранится (**БД**) и преобразуется (**БЗ**) семантическая информация.
- **ТЕРМИНАЛЬНАЯ СРЕДА** – это область, где происходит **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ** семантической информации.
- **ОПОРНАЯ СРЕДА** – это область моделей внешней **ПО** для внутреннего экспериментирования, то есть внутренняя **ПО**.

О(опорная)- СРЕДА ИС – это область моделей, аналогов **ПО**. Она предназначена для внутренней эмпирической деятельности. Базовые элементы **О- СРЕДЫ** можно себе представить в виде видео записей, аналоговых и имитационных моделей, математических компьютерных моделей, различного рода экспериментальных установок (аэродинамических труб, испытательных стендов, тренажеров эталонных и тестовых примеров (образцов, предметов, систем, сов и т.д.).

У(ультра)- СРЕДА ИС или информационная область предназначена для хранения и преобразования информации. Базовые элементы **СРЕДЫ** можно себе представлять в виде локальных баз данных и узко специализированных локальных баз знаний (**ЛБЗ**), ориентированных на соответствующие части внешней **ПО** и **О-СРЕДЫ**.

Т(терминальная)- СРЕДА (ВНЕШНЯЯ и ВНУТРЕННЯЯ) – это среда, которая предназначена для взаимодействия **У-СРЕДЫ** с **О-СРЕДОЙ**.

ней ПО и О-СРЕДОЙ. Базовые элементы Т-СРЕДЫ можно себе представлять в виде датчиков и исполнителей (сенсорных элементов). Они снимают показания (данные) с объектов ПО для соответствующих локальных баз данных У-СРЕДЫ. Исполнители обеспечивают выделение объектов и отношений внешней ПО или конкретизацию моделей О-СРЕДЫ для проведения внутренних экспериментов по запросам из У-СРЕДЫ.

Выделяются три типа радикалов О-, У-, Т-радикалы соответственно объектной, ультра и терминальной средах.

О-РАДИКАЛ является оперативной схемой из базовых элементов О-СРЕДЫ и представляет модель некоторой части внешней ПО для проведения оперативных внутренних экспериментов. С точки зрения семантики О-радикал соответствует семантической сети. О-радикал имеет осуществлять во внешней ПО принцип "гештальта", т.е. решать задачу выбора "объект-фон" и "отношение-фон". При таком выборе осуществляется слежение за частью объектов и отношений во внешней среде, остальное является как бы фоном. О-радикал часто позволяет неоднократно повторять внутренний эксперимент в обычном, ускоренном, замедленном, обратном времени или делать стоп-кадр с целью получения информации для решения информационных задач в У-СРЕДЕ и получения информации в режиме развития ИС.

У-РАДИКАЛ является оперативной ЭС, предметно ориентированной в определенной базой данных и знаний в форме сети накопителей образователей данных. Накопитель - это ЛБД. Преобразователь образователей - это ЛБЗ.

Т-РАДИКАЛ является оперативной контрольно - измерительной системой в форме сети интеллектуальных датчиков и исполнительных элементов.

Активация ИС происходит следующим образом. Каждый радикал среды может находиться в одном из двух состояний, пассивном или активном. Активное состояние означает готовность элемента к выполнению работы. Например, активный У-радикал означает состояние готовности к выполнению запроса. Активный О-радикал означает состояние готовности соответствующей части О-СРЕДЫ к проведению внутренних экспериментов, имитационного моделирования и т.д. Активный Т-радикал означает состояние готовности к проведению контрольно-измерительных работ и управлению определенной частью объектов О-СРЕДЫ.

Активизацию в СРЕДЕ РАДИКАЛОВ ИС вызывает ЗАДАЧА ставленная АДМИНИСТРАЦИЕЙ ИС в форме запроса или про В СРЕДЕ появляется начальный активный участок. Будем наз такой активный участок начальной АКТИВНОЙ СЕТЬЮ ради среды. В АКТИВНОЙ СЕТИ происходит процесс решения эт дачи, т.е. процесс подготовки ответа на запрос или выполнени каза. В случае невозможности решения задачи эта начальная А НАЯ СЕТЬ наращивается радикалами из пассивных по определ правилам. Таким образом каждая новая попытка решения зада зана с тактом расширения АКТИВНОЙ СЕТИ и процессом реше задачи. Происходит процесс САМООРГАНИЗАЦИИ ИС, проце пространства активности в среде.

САМООРГАНИЗАЦИЯ – это режим поиска решения постав перед ИС задачи. Без задачи ИС находится в пассивном состоянии поступлении запроса в рабочую область в ней происходит орган АКТИВНОЙ СЕТИ, где происходит решение задачи.

После завершения решения задачи происходит ОЦЕНИВАН зультата в АДМИНИСТРАЦИИ ИС и вырабатывается установка МООБУЧЕНИЕ ИС. В рабочей области происходит пересчет активности связей между функциональными элементами АКТИ СЕТИ (учет опыта). Затем ИС переходит в пассивное состоя случае, если АКТИВНАЯ СЕТЬ охватит все функциональные э ИС, т.е. появится максимально большой активный участок и не будет решена, то АДМИНИСТРАЦИЯ ИС вырабатывает ус на РАЗВИТИЕ ИС. После чего ИС переходит в режим РАЗВИ котором происходит изменение базисных элементов, тем самым ние КЛАССА допустимых задач. Затем процесс решения зада возобновляется. И так далее.

САМООБУЧЕНИЕ ИС – это режим изменения РАДИКАЛО тором не появляются новые и не уничтожаются старые функцио элементы. Тем самым происходит закрепление ОПЫТА, приви ВЫКОВ, получение ЭВРИСТИК, которые используются в дал при САМООРГАНИЗАЦИИ ИС, то есть при организации про шения задач, при реализации стратегии выбора в поисковом п стве. Здесь наблюдается внешнее сходство с биологическим ме выработки условных рефлексов по И.П. Павлову в естественн лекте индивидуума.

РАЗВИТИЕ ИС – это режим эволюции ИС, изменения ПО, пополнение старых и получение новых знаний и данных, создание новых и изменение старых функциональных элементов ИС.

Базовые понятия математической информатики

Перейдем к обзору основных понятий математической информатики, необходимых для математического моделирования функциональных элементов ИС.

Рассмотрим некоторое множество однотипных объектов внешней ИС. Пусть в ИС этим объектам соответствуют аналоги, некоторые элементы внутренней ПО ИС, которые мы будем называть МОДЕЛЯМИ этих объектов. Все вместе такие объекты (или модели) образуют множество, которое мы будем называть ОПОРНЫМ МНОЖЕСТВОМ.

Определение 1. Семейство L подмножеств опорного множества X называется **КООРДИНАТНОЙ РЕШЕТКОЙ ДЛЯ X** или **РЕШЕТКОЙ ПОНЯТИЙ ДЛЯ X** , если $X, \emptyset \in L$ и $(a, b \in L) \Rightarrow ((a \vee b), (a \wedge b), (a - b) \in L)$.

Таким образом координатная решетка является булевой решеткой. Обозначим $a' = X - a$. Частичный порядок в L определяется отношением включения множеств, то есть $(a, b \in L) \Rightarrow (sup\{a, b\} = (a \vee b), inf\{a, b\} = (a \wedge b))$.

Подмножество $\Pi = \{a_1, a_2, \dots\} \subset L$ называется **ШКАЛОЙ** координатной решетки или **СЛОВАРЕМ** решетки понятий, если любой элемент $l \in L$ выражается через элементы шкалы и их дополнения

$(a_1, a'_1, a_2, a'_2, \dots)$ при помощи операций \vee, \wedge . В случае атомарной шкалы $\Pi_{ат}$ любой элемент из L может быть выражен только через элементы атомарной шкалы и только при помощи операции объединения

элементов. Отметим, что всякий элемент $l \in L$ соответствует некоторому подмножеству объектов внешней ПО и следовательно определяет специфическое свойство таких объектов. Таким образом, мы будем решетку L называть еще **РЕШЕТКОЙ СВОЙСТВ ДЛЯ X** или **АТТРИБУТОМ X** , а атомарную шкалу **ДОМЕНОМ АТТРИБУТА**.

Обозначим мощность шкалы через $|\Pi|$. Имеет место

Лемма 1 (о минимальной шкале). Для любой конечной координатной решетки существует шкала из атомов $\Pi_{ат}$ и минимальная

шкала \mathbb{I}_{min} , при этом

$$|\mathbb{I}_{min}| = [\log |\mathbb{I}_{at}|] + 1.$$

Определение 2. Гейтингову решетку P с максимальным и минимальными элементами назовем **РЕШЕТКОЙ ДОСТОВЕРНОСТЕЙ**. При этом будем трактовать p_{max} = ИСТИНА, p_{min} = ЛОЖЬ. Обозначим для любых двух достоверностей $p, q \in P$

$$\sup\{p, q\} = (p \vee q), \quad \inf\{p, q\} = (p \wedge q).$$

Дополнительный элемент к $p \in P$ обозначим через p' . Он может делиться неоднозначно из условий $\sup\{p, p'\} = p_{max}$, $\inf\{p, p'\} = p_{min}$.

Подмножество $S = \{s_1, s_2, \dots\} \subset P$ называется **ШКАЛОЙ ДОСТОВЕРНОСТЕЙ**, если любая достоверность выражается через элементы дополнения $p = g(s_1, s'_1, s_2, s'_2, \dots)$ при помощи операций \vee, \wedge . В атомарной шкале S_{at} любой элемент из L может быть выражен через элементы атомарной шкалы и только при помощи операций \vee, \wedge .

Определение 3. Пусть X - опорное множество, L - координатная решетка для X с атомарной шкалой $\mathbb{I}_{at} = \{a_1, a_2, \dots\}$, P - решетка достоверностей с атомарной шкалой $S_{at} = \{s_1, s_2, \dots\}$. Тогда декартово произведение

$$[U - X] = P \times L \times X$$

назовем **УЛЬТРАМНОЖЕСТВОМ НАД X** или **УЛЬТРАОСНОВНЫМ X** . Если про точку $x \in X$ известно, что "она принадлежит атому a_1 с достоверностью p_1 или атому a_2 с достоверностью p_2 и так далее для всех атомов шкалы \mathbb{I}_{at} ", то будем говорить, что имеется **СВЕДЕНИЕ О ТОЧКЕ $x \in X$** и записывать

$$\{(p_1)a_1 \vee (p_2)a_2 \vee \dots\}(x) = u(x),$$

где $u : \mathbb{I}_{at} \rightarrow P$ - отображение, задающее **НЕЧЕТКОЕ МНОЖЕСТВО**.

Договоримся, что в (4) будем опускать члены с минимальной достоверностью p_{min} = ЛОЖЬ, подразумевая их по умолчанию. Если все достоверности отличные от p_{min} совпадают $p_1 = p_2 = \dots$, то такое сведение

$$(p)l(x) = (p)\{a_1 \vee a_2 \vee \dots\}(x) \in [U - X], \quad l = a_1 \vee a_2 \vee \dots$$

называть ТИПОВЫМ СВЕДЕНИЕМ О ТОЧКЕ. Типовое сведение $(p_{max})l(x) = l(x)$ называется ЭЛЕМЕНТАРНЫМ (БИНАРНЫМ) СВЕДЕНИЕМ О ТОЧКЕ [1]. Типовое сведение вида $(s)a(x)$, где $s \in \Pi_{ат}$ называется АТОМАРНЫМ.

Лемма 4. Для любых двух сведений об одной точке

$$(p_1)a_1 \vee (p_2)a_2 \vee \dots(x) = u(x), \quad \{(q_1)a_1 \vee (q_2)a_2 \vee \dots\}(x) = v(x),$$

определен операции ДИЗЪЮНКЦИЮ, КОНЪЮНКЦИЮ и ОТРИЦАНИЕ по формулам

$$\begin{aligned} u \vee v(x) &= \{(r_1)a_1 \vee (r_2)a_2 \vee \dots\}(x), \quad r_i = \sup\{p_i, q_i\}, \\ u \wedge v(x) &= \{(r_1)a_1 \wedge (r_2)a_2 \wedge \dots\}(x), \quad r_i = \inf\{p_i, q_i\}, \\ \bar{u}(x) &= \{(p'_1)a_1 \vee (p'_2)a_2 \vee \dots\}(x), \quad p' - \text{дополнительный к } p \end{aligned} \quad (6)$$

СВЕДЕНИЕ НА ОБЩНОСТЬ. Будем говорить, что сведение $u(x)$ ОБЩЕЕ, ЧЕМ $v(x)$ и писать $u(x) > v(x)$, если $p_1 > q_1, p_2 > q_2, \dots$

Лемма 2 (о разложении сведения). Всякое сведение (4) может однозначно представлено в виде дизъюнкции атомарных сведений

$$u(x) = \{(p_1)a_1 \vee (p_2)a_2 \vee \dots\}(x) = \bigvee_i \bigvee_j (s_{ij})a_i(x), \quad p_i = \bigvee_j s_j. \quad (7)$$

Лемма 5. В случае линейной упорядоченности решетки достоверности P ее можно считать числовой, в частности, $p_{max} = 1, p_{min} = 0$. В этом случае можно определить количество информации в произвольном сообщении при условии его невырожденности

$$u(x) = \{(p_1)a_1 \vee (p_2)a_2 \vee \dots\}(x), \quad p_1 + p_2 + \dots \neq 0 \quad (8)$$

следующим образом. Пусть решетка L состоит из измеримых множеств X конечна

$$\text{mes } X = \text{mes } a_1 + \text{mes } a_2 + \dots \quad (9)$$

тогда мы можем определить вероятность гипотезы $\Gamma_i =$ "Точка $x \in X$ принадлежит атому a_i " как

$$P(\Gamma_i) = p_i \text{mes } a_i / (p_1 \text{mes } a_1 + p_2 \text{mes } a_2 + \dots) \quad (10)$$

и энтропию H сведения (8)

$$H[u(x)] = -P(\Gamma_1) \log P(\Gamma_1) - P(\Gamma_2) \log P(\Gamma_2) - \dots$$

Тогда КОЛИЧЕСТВО ИНФОРМАЦИИ I В СВЕДЕНИИ $u(x)$ СИТЕЛЬНО СВЕДЕНИЯ $v(x)$ определим как приращение энтропии

$$I[u(x)/v(x)] = H[v(x)] - H[u(x) \wedge v(x)].$$

Определение 6. Пусть задан оператор $C : X \rightarrow Y$, который называть **ОПОРНЫМ ОПЕРАТОРОМ** и пусть $[U - X], [U - Y]$ ультраоснащения опорных множеств X, Y . Тогда отображение $\check{C} : [U - X] \rightarrow [U - Y]$ называется **УЛЬТРАОПЕРАТОРОМ** если коммутативна диаграмма

$$\begin{array}{ccc} \check{C} : [U - X] & \longrightarrow & [U - Y] \\ & \downarrow & \downarrow \\ C : X & \longrightarrow & Y, \end{array}$$

где отображение $[U - X] \rightarrow X$ - это проектирование на координату. Ультраоператор, сохраняющий операции дизъюнкцию сведений называется **КАНОНИЧЕСКИМ**. Ультраоператор $\check{E} : [U - X]_{np} \rightarrow [U - X]_{кл}$ над тождественным $E : X \rightarrow X$ называется **КЛАССИФИКАТОРОМ**, при этом $[U - X]_{np}$ называется ультраоснащением **ПРИЗНАКОВ**, а $[U - X]_{кл}$ - ультрамножеством **КЛАССОВ**.

Теорема 3 (о таблице ультраоператора). Пусть $\check{C} : [U - X] \rightarrow [U - Y]$ - ультраоператор над $C : X \rightarrow Y$, $[U - X] = P \times L$, $[U - Y] = Q \times M \times Y$ - ультраоснащения X, Y . Тогда \check{C} задается таблицей отображений

$$\begin{cases} A(l, x) : P \rightarrow Q \\ B(p, x) : L \rightarrow M \\ C : X \rightarrow Y, \end{cases} \quad p \in P, l \in L, x \in X.$$

В случае канонического ультраоператора отображения $A(l, x)$ в (14) являются гомоморфизмами решеток и таблица отображений упрощается

$$\begin{cases} A(l, x) : S \rightarrow Q \\ B(p, x) : \Pi \rightarrow M \\ C : X \rightarrow Y, \end{cases} \quad p \in S, l \in \Pi, x \in X,$$

где S, Π - шкалы решеток P, L .

ствие. Если $S = S_{am}$, $\Pi = \Pi_{am}$ - атомарные шкалы решеток P, L , действие ультраоператора на произвольное сведение (7) определяется формуле

$$\check{C}[u(x)] = \check{C}[\bigvee_i \bigvee_j (s_{ij})a_i(x)] = \bigvee_i \bigvee_j \check{C}[(s_{ij})a_i(x)] \quad (15)$$

деление 7. Если $\check{C} : [U - X] \rightarrow [U - Y]$ - ультраоператор над $U \rightarrow Y$ и для ультрамножеств $[U - X], [U - Y]$ определено количественное отношение для их сведений, то ИНФОРМАЦИОННОЙ ПРОИЗВОДНОЙ УЛЬТРАОПЕРАТОРА В ТОЧКЕ назовем

$$[\check{C}[u(x)]/Y(Cx)]/I[u(x)/X(x)] = Dx[\check{C}], \quad I[u(x)/X(x)] \neq 0 \quad (16)$$

предел берется по направленному множеству всех сведений из $[U - X]$ с $x \in X$ с частичным порядком сравнения сведений на общность, предел при $u(x) \rightarrow x$.

определение. В случае ультраоператоров классификаторов \check{E} условие производную $Dx[\check{E}] = 1$ является необходимым для НАБЛЮДАЕМОСТИ, а $Dx[\check{E}] \geq 1$ - достаточным для НАБЛЮДАЕМОСТИ

р 1. Рассмотрим семейство опорных множеств $X_k, k \in K$ и семейство опорных операторов $C_{kn} : X_k \rightarrow X_n, (k, n) \in R \subset K \times K$. Тогда оба семейства определяют СЕМАНТИЧЕСКУЮ СЕТЬ или СЕТЬ ССЫЛКИ

$$\{X_k, k \in K, C_{kn} : X_k \rightarrow X_n, (k, n) \in R\}. \quad (17)$$

множествам X_k соответствуют ОПОРНЫЕ ПОНЯТИЯ. Соединим все X_k . Пусть $[U - X_k] = P_k \times L_k \times X_k$. Тогда сеть

$$\{[U - X_k], k \in K, C_{kn} : X_k \rightarrow X_n, (k, n) \in R\} \quad (18)$$

называется ПРАФРЕЙМ или РАСПРЕДЕЛЕННУЮ БАЗУ ДАННЫХ, элементами которой C_{kn} - это ССЫЛКИ. Если рассмотреть в различных $[U - X_k]$ сведения $u(x_k)$ таких, для которых точки связаны ссылками, то сеть T будет

$$T = \{u(x_k), k \in K, C_{kn} : x_k \rightarrow x_n, (k, n) \in R\} \quad (19)$$

определяет ФРЕЙМ или ГИПЕРТЕКСТ. КОЛИЧЕСТВО
 ПИИ В ГИПЕРТЕКСТЕ определим формулой

$$I[T] = \sum_k I[u(x_k)].$$

Если теперь ультраоснастим опорные операторы C_{kn} в (18), \check{C}_{kn}
 $X_k] \rightarrow [U - X_n]$, то будем иметь математическую модель РАСП
 ЛЕННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

$$\{[U - X_k], k \in K, \check{C}_{kn} : [U - X_k] \rightarrow [U - X_n], (k, n) \in R\}.$$

Введем понятие УЛЬТРАТЕКСТА ОТНОСИТЕЛЬНО ГИПЕ
 СТА как результат обработки гипертекста (19) экспертной си
 (21)

$$U - T = \{u(x_n) \& \check{C}_{kn}[u(x_k)], n \in K, \check{C}_{kn} : [U - X_k] \rightarrow [U - X_n], (k, n) \in R\}.$$

Ультратекст - это тоже гипертекст, в котором каждое сведение
 нено логическими следствиями ультраоператоров экспертной си
 Далее можно сделать очередную обработку нового гипертекста
 экспертной системой и получить новый ультратекст $U - U - T =$
 и так далее $nU - T$. Введем ПОКАЗАТЕЛЬ ГЛУБИНЫ Э
 ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ (21) ОТНОСИТЕЛЬНО ГИПЕРТ
 T , (19),

$$\Delta I[T] = \lim_{n \rightarrow \infty} I[nU - T] - I[T].$$

Можно ввести еще НИЖНИЙ и ВЕРХНИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ГЛ
 ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ (21)

$$m = \inf_T \Delta I[T], \quad M = \sup_T \Delta I[T].$$

4. Сетевое моделирование интеллектуальных систем

Предложим сетевое моделирование ИС, которое позво
 ПРОТОКОЛЫ регистрационной информации функционир
 УПРАВЛЕНИЕ ИС, проводить АНАЛИЗ и СИНТЕЗ ИС. Сн
 посмотрим математические модели радикалов ИС.

О-радикал будем моделировать О(опорной)-СЕТЬЮ, специальным приемом сети Петри [1]. Математическими нагрузками позиций будут ОПОРНЫЕ множества объектов (опорные понятия), а педов сети – ОПОРНЫЕ операторы (отношения) между объектами. Размеченная О-СЕТЬ будет моделировать ПАССИВНЫЙ О-радикал. Размеченная О-СЕТЬ будет моделировать АКТИВНЫЙ О-радикал. В этом маркеры сети будут окрашены. Цветом маркера является идентификатор выделенной точки ОПОРНОГО множества. Например, α является математическая модель или индивидуальное имя объекта. Смена разметки в сети (функционирование сети) определяется этими операторами сети и моделирует режим изменения состояний объекта, т.е. аналог некоторого процесса в предметной области.

С точки зрения лингвистики неразмеченная О-СЕТЬ совпадает с СЕМИОТИЧЕСКОЙ СЕТЬЮ понятий. Отношения между понятиями могут быть любыми: целое – часть, причина – следствие, глагольное отношение и т.д. С точки зрения классической математики неразмеченная О-СЕТЬ соответствует категории, в которой объектам категории соответствуют ОПОРНЫЕ множества вместе с их математическими структурами морфизмам – ОПОРНЫЕ операторы.

У-радикал будем моделировать У(ультра)-СЕТЬЮ, специальным приемом опорной сети [1]. Неразмеченная У-СЕТЬ моделирует пассивный У-радикал. Размеченная У-СЕТЬ моделирует активный У-радикал. Два вида разметок такой сети описывают процессы распространения в У-радикале запросов и ответов на эти запросы. Вершины сети нагружаются их математическими моделями. Моделью нагружения (ЛБД) является УЛЬТРАМНОЖЕСТВО, обобщающее реляционную модель базы данных. Моделью преобразователя (ЛБЗ) является УЛЬТРАОПЕРАТОР, обобщающий продукционную модель базы данных. Оба вида разметок в У-СЕТИ являются раскрашенными. Цветом является для ЗАПРОСОВ идентификаторы неизвестных, а для ОТВЕТОВ – идентификаторы известных сведений ультрамножества. Смена разметок в У-СЕТИ определяется ультраоператорами и моделирует логические производные и прямого выводов в У-радикале.

Т-радикал будем моделировать Т-СЕТЬЮ [1]. В простейшем случае Т-СЕТЬ имеет две позиции и один переход. Математической нагрузкой первой позиции Т-радикала является ОПОРНОЕ множество, а второй – УЛЬТРАМНОЖЕСТВО над этим опорным множеством. Математической нагрузкой перехода Т-СЕТИ является СИНГУЛЯРНЫЙ

ультраоператор [1]. Для Т-СЕТИ датчика опорное множество – грузка входной позиции, а ультрамножество над этим опорным множеством – нагрузка выходной позиции перехода. Для исполнительного борота. Неразмеченная Т-СЕТЬ моделирует ПАССИВНЫЙ Т-радикал, а размеченная сеть моделирует АКТИВНЫЙ Т-радикал. Размеры просов и ответов в Т-СЕТИ раскрашены. Смена разметки определена сингулярным оператором.

Определение 7. О-радикал и У-радикал называются ДУАЛЬНЫМИ, если их сетевые модели можно поставить во взаимно однозначное соответствие так, что каждой позиции, переходу и дуге О-СЕТИ соответствует позиция, переход и дуга У-СЕТИ и наоборот. При этом нагрузка позиции О-СЕТИ опорное множество X , то нагрузка соответствующей позиции У-СЕТИ ультрамножество [1] над X и наоборот. Если нагрузка перехода О-СЕТИ опорный оператор C , то нагрузка соответствующего перехода У-СЕТИ ультраоператор [1] над C и наоборот.

Определение 8. Те радикалы, в сетевых моделях которых одинаковые позиции с совпадающими нагрузками называются РАДИКАЛАМИ или СОСЕДНИМИ радикалами.

Принцип мотивации ИС. В АДМИНИСТРАЦИИ ИС происходит постановка задачи для рабочей области ИС. В общем случае это происходит путем ДЕКОМПОЗИЦИИ СТРАТЕГИЧЕСКОЙ ЦЕЛИ (установка ИС на ТАКТИЧЕСКИЕ задачи с учетом оценивания внешней обстановки) в первоочередной подзадачи или нескольких подзадач для их решения в рабочей области ИС является результатом МОТИВАЦИИ этой постановки задачи. Далее, в администрации происходит постановка задачи с тем чтобы настроить рабочую область на специфические РАДИКАЛЫ для этого типа задач.

Принципы самоорганизации ИС. В зависимости от типа ЗАДАЧИ рабочей области ИС происходит самоорганизация радикалов в РАБОЧУЮ СЕТЬ (РС) с целью решения этой задачи. Те и те радикалы, которые участвуют в РС являются активными. В качестве примера приведем следующие семь принципов САМООРГАНИЗАЦИИ:

- 1) ЗАДАЧА определяет РАДИКАЛЫ ИС и начальную рабочую область (РС) из некоторых радикалов.
- 2) Все радикалы РС являются активизированными и объединены в единую рабочую область.
- 3) РС функционирует согласно формализму О-СЕТЕЙ и [1] от начальной разметки до полной остановки РС.

Если РС остановилась и решена та задача, которая вызвала активизацию ИС, то АДМИНИСТРАЦИЯ ИС оценивает решение и ИС переходит в режим САМООБУЧЕНИЯ для пересчета уровней активности связей. То есть реструктуризации РАДИКАЛОВ и далее переходит в пассивное состояние.

Если РС остановилась и задача не решена, то РС наращивается по следующему правилу. Если в РС есть некоторый У-радикал, не имеющий дуального к нему О-радикала, то такой О-радикал с наибольшим уровнем активности активизируется и присоединяется к РС. Новая РС возобновляет свою работу.

Если РС остановилась и задача не решена, то РС наращивается по следующему правилу. Если в РС есть некоторый О-радикал, не имеющий дуального к нему У-радикала, то такой У-радикал с наибольшим уровнем активности активизируется и присоединяется к РС. Новая РС возобновляет свою работу.

Если РС остановилась и задача не решена, то РС наращивается по следующему правилу. Если все О- и У-радикалы имеют дуальные им радикалы в РС, тогда к РС присоединяется новый радикал смежных пассивных У- и Т-радикалов с наибольшим уровнем активности. Новая РС возобновляет свою работу. При этом наращивание РС происходит со стороны тех и только тех позиций РС, которые возбуждены (имеют ненулевую разметку запросов). Наращивание состоит в активизации и присоединении к РС такого радикала или Т-радикала из пассивных, в сетевой модели которого имеется одинаковая позиция с возбужденной позицией РС. Если наращивание РС невозможно, то ИС не может решить с помощью имеющихся у нее знаний задачу, и система переходит в режим (состояние) РАЗВИТИЯ ИС.

Принцип самообучения ИС. Общий принцип САМООБУЧЕНИЯ ИС. ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ оценка решения со стороны АДМИНИСТРАЦИИ ИС ведет к увеличению уровня активности связей тех элементов рабочей области ИС, которые непосредственно способствовали получению ответа. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ оценка наоборот ведет к уменьшению уровня активности связей у тех элементов. Самообучение приводит к изменению радикалов. Эти изменения происходят на базе допустимых алгебраических операций над

радикалами. Радикалы ИС образуют алгебру. Основные операции радикалами – ОБЪЕДИНЕНИЕ и УДАЛЕНИЕ радикалов.

Определение 9. Операция ОБЪЕДИНЕНИЕ радикалов определяется для любых двух радикалов, в результате образуется третий радикал. В терминах сетевых моделей радикалов ОБЪЕДИНЕНИЕ определяется как объединение множеств позиций переходов и дуг исходных моделей и отождествлением (склеиванием) тех вершин и дуг этих моделей, которые имеют одинаковые нагрузки (опорные множества, опорные множества, ультрамножества, ультраоператоры). При склеивании опорных множеств их математические структуры сохраняются. Например, линейное пространство и топологическое пространство над одним и тем же множеством после склеивания дают линейное топологическое пространство. Операция РАЗНОСТЬ радикалов определяется как операция обратная к ОБЪЕДИНЕНИЮ.

Из этого определения следует, что алгебра радикалов распадается на три подалгебры: О-, У- и Т-радикалов.

Принципы развития ИС. ИС является открытой системой, может наращиваться. При этом изменяется ПО и рабочая область. Процесс РАЗВИТИЯ ИС много сложнее самоорганизации и саморазвития. Отметим здесь лишь основные моменты. Одной из целей РАЗВИТИЯ ИС является появление дуального радикала для каждого радикала. Кстати, такое соответствие определяет предметную область У-радикала. РАЗВИТИЕ ИС происходит в семи принципиальных ситуациях.

- 1) Изменение внешней ПС или создание нового О-радикала, для которого нет дуального ему У-радикала.
- 2) Создание нового датчика (Т-радикала).
- 3) Создание нового У-радикала, для которого нет части ПС, дуального ему О-радикала.
- 4) Создание нового исполнителя (Т-радикала).
- 5) Изменение внешней ПС и создание нового О-радикала, для которого есть дуальный ему У-радикал.
- 6) Создание нового У-радикала, для которого есть часть ПС, дуальный ему О-радикал.

Оптимизация имеющихся радикалов, то есть изменение радикалов с целью их упрощения, минимизации сложности радикалов.

ая сетевая модель ИС. Теперь можно определить математическую модель всей ИС в целом. Будем моделировать ИС иерархической ИЮ, являющейся композицией сетевых моделей радикалов и иерархических сетей и У-СЕТЕЙ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ ИС и АДМИНИСТРАЦИИ ИС. Все связи базовых элементов той части ПОЛНОЙ СЕТИ, которая относится к рабочей области ИС снабжены весами активности. В той части ПОЛНОЙ СЕТИ с одинаковыми весами активности используются модели соответствующих радикалов ИС. В ПОЛНОЙ СЕТИ используются четыре взаимодействующих процесса, МОТИВАЦИЯ, САМООРГАНИЗАЦИЯ, САМООБУЧЕНИЕ и РАЗВИТИЕ. Все они подчинены своим принципам функционирования. В случае пассивного состояния ПОЛНОЙ СЕТИ все ее элементы и связи заблокированы. По мере активизации РАБОЧЕЙ СЕТИ в процессе САМООРГАНИЗАЦИИ связана активизацией (активизацией) части ПОЛНОЙ СЕТИ. Принципы САМООРГАНИЗАЦИИ определяют динамику активизации ПОЛНОЙ СЕТИ, принципы САМООБУЧЕНИЯ определяют адаптацию ПОЛНОЙ СЕТИ к изменяющимся условиям, а принципы РАЗВИТИЯ определяют эволюцию ПОЛНОЙ СЕТИ.

р 2. Рассмотрим ФИРМУ, например, научно-исследовательскую организацию как пример ИС (рис. 3). Здесь каждый узкий специалист является локальной базой знаний (ультраоператором). Такой специалист активизируется заданием (запросом) к нему. Для выработки ответа специалисту нужны исходные данные. Эти данные хранятся в ЛБД (ультебазе) на бумажных или электронных носителях, куда они попадают, например, через измерительные устройства (датчики). В свою очередь, результат работы, ответ специалиста поступает в свою ЛБД. Таким образом, в ФИРМЕ выделяется часть, которая является распределенной базой знаний и данных, то есть У-СРЕДОЙ.

Связи между элементами У-СРЕДЫ определяются профессиональной компетенцией ЛБЗ и ЛБД. Эти связи имеют различные веса активности, которые позволяют выделить РАДИКАЛЫ У-СРЕДЫ, то есть различные рабочие группы специалистов. В зависимости от успехов в решении определенного класса задач, такие группы переформируются в зависимости от изменений активности связей. В активном радикале (рабочей группе над заданием) сначала происходит распространение запросов. Это приводит к ответственности за распределение (декомпозиции) задания по участникам рабочей группы. Затем происходит принятие решений и получение

ответов.

О-СРЕДОЙ в **ФИРМЕ** является сеть моделей, образцов и т.д. внешней ПС, которая является объектной (профессиональной) организацией **ФИРМЫ**. Внешней ПС могут быть любые (технические, технические, гуманитарные и т.д.) системы различного назначения вместе узлами и элементами. При этом базовыми элементами **О-СРЕДЫ** являются математические, компьютерные, имитационные модели, чертежи, видео и аудио записи и т.д..

Базовые элементы **О-СРЕДЫ** имеют связи между собой, существующие отношениям объектов во внешней ПС. Например, для внешнего аппарата – это связи между узлами и элементами аппарата, свою очередь такие связи между элементами **О-СРЕДЫ** имеют различные активности, которые отражают степень их важности (существенности) при решении данного круга задач. Тем самым в **О-СРЕДЕ** раз выделяются **РАДИКАЛЫ**, своего рода оперативные контрольные модели. Активный **О-радикал** – это работающая модель, с которой проводится внутренний эксперимент. Такой эксперимент может быть повторен, ускорен, замедлен, остановлен и т.п..

Т-СРЕДОЙ в **ФИРМЕ** является сеть датчиков и исполнительных механизмов – это средства обработки результатов внутреннего эксперимента. Данные обработки поступают в соответствующие **ЛБД У-СРЕДЫ**. Исполнительные механизмы – это средства настройки моделей перед внутренним экспериментом и их изменения во время эксперимента. **Т-радикалы** отличаются весами активности связей, которые учитывают опыт предыдущих экспериментов.

Процесс **МОТИВАЦИИ ИС** – это выработка **ТАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ** администрацией **ФИРМЫ**, исходя из **СТРАТЕГИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ** интересов **ФИРМЫ**. Далее в администрации проводится анализ задачи с целью определения той структуры (**РАДИКАЛОВ**) рабочей области, которая соответствует типу задания.

Процесс **САМООРГАНИЗАЦИИ ИС** – это процесс выполнения задания служащими **ФИРМЫ**. Первоначально задание активизируется в виде **РАБОЧЕЙ СЕТИ**. Затем РС наращивается, в нее включаются наиболее эффективная рабочая группа (**У-радикал**) и делаются попытки завершить задание. Если ответ не получен, то РС снова активизируется, например, подключаются средства обработки результатов эксперимента. Если задание выполнено, то РС останавливается. Если задание не выполнено, то РС расширяется РС и т.д..

процесс САМООБУЧЕНИЯ ИС – это закрепление опыта решения
на будущее. Для этого АДМИНИСТРАЦИЯ ФИРМЫ проводит
у решения задачи и в зависимости от нее проводит реорганизацию
тивных рабочих групп и сопутствующих им технических средств,
ть изменяет РАДИКАЛЫ.

случае необходимости АДМИНИСТРАЦИЯ принимает решение о
ИТИИ ФИРМЫ, то есть о рождении, изменении, уничтожении
их функциональных элементов. АДМИНИСТРАЦИЯ ФИРМЫ по-
но проводит учет и контроль работы рабочей области. Используя
нения и наказания (финансовые, административные, моральные и
АДМИНИСТРАЦИЯ изменяет веса активности между элементами
ем самым изменяет радикалы, вплоть до зачисления новых или
нения прежних специалистов, приобретения новых или списания
них моделей и инструментальных средств к ним и т.д.

д. Полная сетевая модель ИС является математической моделью
на позволяет получать ПРОТОКОЛЫ функционирования ИС в
свособразного ВИДЕО ФИЛЬМА из кадров, каждый из которых
ся размеченной сетью на соответствующий такт работы ИС. Та-
ОТОКОЛ можно вести в реальном режиме времени с целью учета
роля ИС. Можно ПРГНОЗИРОВАТЬ работу ИС, проводить все-
ний АНАЛИЗ и СИНТЕЗ ИС. Полная сетевая модель ИС позво-
проводить ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ над ИС подобно тем
проводятся над динамическими системами в естествознании.

сок литературы

СКИН А.В. Математическая информатика. - М.: Наука, 1991.