УДК 681.82:519.81

З. А. Алисейко, В. И. Булкин, О. В. Канищева, Н. В. Шаронова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГЕБРЫ ПРЕДИКАТОВ И ПРЕДИКАТНЫХ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ДЕКЛАРАТИВНОЙ И ПРОЦЕДУРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЗНАНИЙ

1. Введение

Дальнейшее развитие информатизации и компьютеризации немыслимо без создания новых и усовершенствования существующих интеллектуальных информационных систем, как на базе традиционных компьютеров, так и на базе разрабатываемых в настоящее время прогрессивных компьютеров параллельной обработки данных. Ядром любой интеллектуальной информационной системы является база знаний. Формализацией знаний и наполнением ими базы знаний занимаются так называемые инженеры по знаниям. Их задачей является преобразование знаний, представленных в естественном для человека виде, в вид, удобный для хранения и обработки их в машинной базе знаний. Человек в своей практической и познавательной деятельности использует однородные и комплексные формы представления знаний.

2. Постановка задачи

В данной статье представлены возможности использования предикатов и предикатных операций для формализации декларативной и процедурной составляющих знаний. Рассматриваются современные формы представления знаний, проводится их сравнительный анализ, а также подробно рассматриваются возможности предикатов и предикатных операций для представления знаний.

3. Формы представления знаний

Множество однородных форм представления знаний можно формально определить в следующем виде:

$$M_1 = \{t, s, v, g\},$$

где t — текстовая форма представления знаний (книги, газеты, журналы и т. д.); s — аудиальная форма представления знаний (речь, звуки, музыка); v — визуальная форма представления знаний (анимация, балет, пантомима, жесты, мимика); g — графическая форма представления знаний (картины, рисунки, схемы, графики и т. д.) [1].

Множества комплексных форм представления знаний задаются на декартовых степенях множества M_1. Декартов квадрат M_1^2 множества M_1 задает множество бинарных комплексных форм представления знаний. Декартов куб M_1^3 множества M_1 задает множество тернарных комплексных форм представления знаний и т. д. Очевидно, что представление знаний с помощью комплексных форм является более эффективным и полным по сравнению с однородными.

Однако наиболее удобными для человека и широко распространенными являются текстовая и речевая формы представления знаний на естественном языке, как в составе однородных, так и в составе комплексных форм. Поскольку современные компьютеры не «понимают» естественного языка, для машинного представления знаний используются специально разработанные модели представления знаний (МПЗ). К ним относятся логические, продукционные, фреймовые и сетевые МПЗ. Каждая из этих моделей имеет свои преимущества и недостатки, однако главным недостатком всех этих моделей является то, что они используют разные формальные средства для представления знаний. Так, *логические модели* для представления знаний используют кортеж вида:

$$M = \langle T, P, A, B \rangle,$$

где T — множество объектов предметной области; P — множество синтаксических правил для построения синтаксически правильных конструкций; A — множество аксиом предметной области; B — множество правил вывода. Основой базы знаний в логических системах является множество A аксиом предметной области. Все остальные знания выводятся из аксиом на основе правил вывода B.

Сетевые модели характеризуются набором:

$$H = \langle I, C_1, C_2, ..., C_n, \Gamma \rangle,$$

где I — множество информационных единиц; C_1, C_2, ..., C_n — множество типов связей между информационными единицами; Γ — отображение, устанавливающее связи между информационными единицами из заданного множества типов связей. Выделяются *классифицирующие сети*, *функциональные сети* и *сценарии*. Классифицирующие сети используют отношения структуризации. Функциональные сети вычисляют значения одних информационных единиц по значениям других и называются *вычислительными моделями*. Сценарии описывают каузальные отношения, отношения типов «орудие — действие», «средство — результат». Если в сети используются различные типы связей, то она называется *семантической сетью*.

Продукционные модели — это гибрид сетевых и логических моделей. Декларативная составляющая знаний в них представляется в виде сети, а процедурная — в виде множества правил вывода, которые называются *продукциями*. В результате применения правил вывода сеть может трансформироваться. Появляется *вывод на знаниях* вместо логического вывода. Процедурная составляющая знаний здесь явно выделена и описывается иными средствами, чем декларативная составляющая.

Фреймовые модели используют жесткую структуру информационных единиц, представляемых в виде *протофреймов*, которые выглядят следующим образом:

(*Имя фрейма*:
Слот 1 (*Значение слота* 1)
Слот 2 (*Значение слота* 2)
. . . .
Слот N (*Значение слота N*)).

В качестве значений слотов может использоваться все что угодно, в том числе и другие фреймы. Таким образом обеспечивается создание иерархических структур. Если в качестве значений слотов подставить конкретные данные, то получим экземпляр фрейма. Некоторые исследователи не выделяют фреймовые модели в отдельный вид, а рассматривают их в общем контексте с сетевыми моделями.

Сам термин «знания» в компьютерной литературе определяется весьма нестрого. Большинство авторов определяют знания как данные, имеющие некоторые особенности. Среди особенностей знаний выделяются различные наборы. В работе [2] утверждается, что знания отличаются от данных интерпретируемостью, наличием классифицирующих связей и ситуативных отношений. В работе [3] выделяются следующие особенности знаний по сравнению с данными: внутренняя интерпретируемость, структурированность, связность, семантическая метрика, активность. Еще одно определение знаний гласит следующее: знания — это данные, которые необходимо передать по каналу связи, чтобы на приемной стороне получить сообщение, пусть не во всех деталях, но вполне понятно его общее содержание [4]. Более конкретным и строгим является следующее определение: знания — это данные об объектах, отношениях и процессах [2]. Последнее определение является наиболее близким к формальному определению понятия знаний, которое предлагает теория интеллекта. Знание о факте — это отношение, выраженное некоторым высказыванием. Факт — это действительное состояние всех интересующих нас мест некоторого предметного пространства. Знание не такое определенное понятие, как факт. Оно лишь ограничивает множество возможных состояний мест предметного пространства [5].

Под предметным пространством в данном случае понимается декартово произведение $S = A_1 \times A_2 \times \ldots \times A_m$ произвольных непустых не обязательно различных множеств $A_1, A_2, \ldots, A_m$, которые являются подмножествами некоторого универсума предметов U. Множества $A_1, A_2, \ldots, A_m$ являются координатными осями пространства S. Число m называется размерностью пространства S. На данном пространстве задается множество предметных переменных $V = \{x_1, x_2, \ldots, x_m\}$. Множество V называется универсумом переменных пространства S. Значениями переменной x_i $(i = \overline{1, m})$ являются элементы множества A_i $(x_1 \in A_1, x_2 \in A_2, \ldots, x_m \in A_m)$. Множества A_1, $A_2, \ldots, A_m$ являются областями задания переменных $x_1, x_2, \ldots, x_m$. Каждой переменной x_i $(i = \overline{1, m})$ ставится в соответствие фиксированная область задания A_i. Переменные $x_1, x_2, \ldots, x_m$ содержательно интерпретируются как места пространства S, а их значения (предметы) — как состояния этих мест. Любое подмножество P пространства S называется отношением, заданным на пространстве S. Отношение имеет размерность m. Все отношения, заданные на пространстве S, являются однотипными. Тип отношения задается множеством предметных переменных V и набором $A_1, A_2, \ldots, A_m$ областей их задания. Над однотипными отношениями можно выполнять операции объединения, пересечения и дополнения. Объединение отношений P и Q — это такое отношение $P \cup Q$, которому соответствуют все наборы отношения P и все наборы отношения Q. Пресечение отношений P и Q — это такое отношение $P \cap Q$, которому соответствуют все наборы как отношения P, так и отношения Q. Дополнением отношения P называется отношение $\sim P = \tilde{P}$, состоящее из тех наборов предметного пространства S, которые не принадлежат отношению P. Операциям над отношениями соответствуют операции над высказываниями. Объединению отношений $P_A \cup Q_B$ соответствует высказывание $A \vee B$, называемое *дизъюнкцией высказываний A и B*. Оно образуется с помощью союза «или», соединяющего высказывания A и B. Пересечению отношений $P_A \cup Q_B$ соответствует высказывание $A \wedge B$, называемое *конъюнкцией высказываний A и B*. Оно образуется соединением высказываний A и B с помощью союза «и». Дополнению $\tilde{P}_A$ отношения P_A соответствует высказывание $\neg A = \bar{A}$, которое называется *отрицанием высказывания A*. Оно образуется присоединением к исходному высказыванию частицы «не».

Отношения задаются различными способами: в явном виде как множество упорядоченных наборов предметов, в табличном виде, в виде графов и графиков. Однако ни один из этих способов не позволяет представлять отношения в формульном виде. Как известно, язык формул является наиболее удобным и выразительным средством для присвоения имен объектам и описания их характеристик и связей с другими объектами. Кроме того, формульному описанию поддается только один вид отношений — функциональные отношения. Бинарное отношение R, заданное на множествах X и Y, называется функциональным, если из xRy_1 и xRy_2 следует, что $y_1 = y_2$, поэтому можно сказать, что для каждого значения $x \in X$ существует единственное значение $y \in Y$. Любое n-местное отношение R_n, заданное на множествах $X_1, X_2, ..., X_{n-1}, Y$, называется функциональным, если из того, что $(x_1, x_2, ..., x_{n-1}, y_1) \in R_n$ и $(x_1, x_2, ..., x_{n-1}, y_2) \in R_n$ следует, что $y_1 = y_2$. Это значит, что для каждого фиксированного набора $(x_1, x_2, ..., x_{n-1})$ существует единственное значение y такое, что $(x_1, x_2, ..., x_{n-1}, y) \in R_n$. Отношения общего вида, которые не являются функциональными, можно отнести к классу многозначных функций, когда для каждого набора предметов $(x_1, x_2, ..., x_{n-1})$, где $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, ..., x_{n-1} \in X_{n-1}$, может существовать несколько значений $y_1, y_2, ..., y_k \in Y$ таких, что $y_1 \neq y_2 \neq ... \neq y_k$. Описать такие отношения с помощью формул не представляется возможным, поэтому воспользуемся методом перевода, когда решение одной задачи заменяется решением другой взаимно однозначно связанной с ней задачи. Для этого заданному отношению во взаимно однозначное соответствие ставится высказывание, а высказыванию — функция, которая принимает значение из множества $B = \{0, 1\}$, где 0 и 1 — булевы элементы «ложь» и «истина» соответственно. Такие функции называются предикатами. Предикат — это любая функция $P(x_1, x_2, ..., x_m)$, заданная на предметном пространстве $S = A_1 \times A_2 \times ... \times A_m$, которая отображает пространство S в множество $B = \{0, 1\}$, где 0 и 1 — булевы элементы.

Формально операцию замены отношения предикатом можно записать следующим образом:

$$P(x_1, x_2, ..., x_m) = \begin{cases} 1, \text{ если } x_1, x_2, ..., x_m \in P; \\ 0, \text{ если } x_1, x_2, ..., x_m \notin P. \end{cases}$$

Символом $B = \{0, 1\}$ в данном случае обозначается отношение, а символом P — предикат. Обратный переход от предиката к отношению формально записывается так:

$$\text{если } P(x_1, x_2, ..., x_m) = 1, \text{ то } x_1, x_2, ..., x_m \in P;$$

$$\text{если } P(x_1, x_2, ..., x_m) = 0, \text{ то } x_1, x_2, ..., x_m \notin P.$$

Переход от произвольного отношения P к предикату P и обратно можно представить в виде схемы (рис. 1).

Таким образом, любому отношению P во взаимно однозначное соответствие ставится предикат, который на языке алгебры предикатов можно записать в формульном виде, используя базисные предикаты 0, 1 и предикат узнавания предмета x_i^a, а также базисные операции конъюнкции $\wedge$ и дизъюнкции $\vee$. Предикат узнавания предмета a, находящегося на месте x_i, определяется следующей формулой:

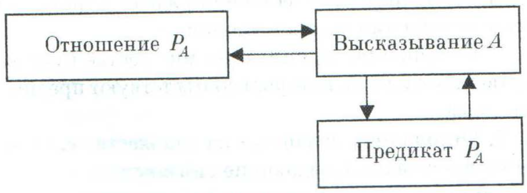

Рис. 1. Схема перехода от произвольного отношения к предикату

$$x_i^a = \begin{cases} 1, \text{ если } x_i = a; \\ 0, \text{ если } x_i \neq a. \end{cases}$$

На языке формул алгебры предикатов очень просто записать любые отношения. Отдельный факт, представленный набором $(a_1, a_2, ..., a_m)$ состояний $a_1, a_2, ..., a_m$ мест $x_1, x_2, ..., x_m$, можно выразить высказыванием «$x_1 = a_1$ *и* $x_2 = a_2$ *и* ... *и* $x_m = a_m$», которому соответствует формула алгебры предикатов $x_1^{a_1}, x_2^{a_2}, ..., x_m^{a_m}$. Формулы такого вида называются *конституентами единицы предиката*. Произвольное знание о факте можно представить отношением $\{(a_{11}, a_{21}, ..., a_{m1}), (a_{12}, a_{22}, ..., a_{m2}), ..., (a_{1r}, a_{2r}, ..., a_{mr})\}$, где r — число наборов в отношении. Это знание выражается высказыванием:

$$x_1 = a_{11} \text{ и } x_1 = a_{21} \text{ и } ... \text{ и } x_1 = a_{m1} \text{ или}$$

$$x_1 = a_{12} \text{ и } x_1 = a_{22} \text{ и } ... \text{ и } x_1 = a_{m2} \text{ или } ...$$

$$\text{или } x_1 = a_{1r} \text{ и } x_1 = a_{2r} \text{ и } ... \text{ и } x_1 = a_{mr}.$$

На языке алгебры предикатов это знание запишется в виде формулы:

$$x_1^{a_{11}}, x_2^{a_{21}}, ..., x_m^{a_{m1}} \vee x_1^{a_{12}}, x_2^{a_{22}}, ..., x_m^{a_{m2}} \vee$$

$$\vee ... \vee x_1^{a_{1r}}, x_2^{a_{2r}}, ..., x_m^{a_{mr}},$$

которая называется совершенной дизъюнктивной нормальной формой (СДНФ) предиката.

Поскольку при переходе от отношений к предикатам в виде промежуточного звена используются высказывания, то операциям над высказываниями будут соответствовать операции над предикатами. Высказыванию $A \vee B$, называемому дизъюнкцией высказываний A и B, соответствует предикат

$$(P_A \vee Q_B)(x_1, x_2, ..., x_m) =$$
$$= P_A(x_1, x_2, ..., x_m) \vee Q_B(x_1, x_2, ..., x_m).$$

Высказыванию $A \wedge B$, называемому конъюнкцией высказываний A и B, соответствует предикат

$$(P_A \wedge Q_B)(x_1, x_2, ..., x_m) =$$
$$= P_A(x_1, x_2, ..., x_m) \wedge Q_B(x_1, x_2, ..., x_m).$$

Высказыванию $\neg A = \overline{A}$, которое называется отрицанием высказывания A соответствует предикат

$$(\neg P_A)(x_1, x_2, ..., x_m) = \neg(P_A(x_1, x_2, ..., x_m)).$$

Символы $\vee$, $\wedge$, $\neg$, стоящие слева от знака равенства, обозначают операции над предикатами, а те же символы, стоящие справа от знака равенства, — операции над значениями предикатов. Итак, мы убедились, что кроме предикатов существуют еще и операции над предикатами, а значит, должна существовать некоторая алгебра операций над предикатами.

Алгебра предикатов описывает только знания о фактах. Она формирует лишь то, что называется высказыванием, суждением. Алгебра операций над предикатами, или алгебра предикатных операций, должна «оживлять» эти знания. Она должна формализовать операции над знаниями, представленными в виде отношений на некотором предметном пространстве S. Алгебра предикатов описывает декларативную составляющую знаний, а алгебра предикатных операций — процедурную составляющую знаний. Алгебра предикатных операций служит для осуществления вывода на знаниях, получения новых знаний на основе множества аксиом или первичных знаний, хранящихся в базе знаний интеллектуальной информационной системы. Машина должна не только иметь какие-то знания, но и обладать способностью оперировать ими, получать новые знания.

Приведем общие сведения об алгебрах предикатных операций. Пусть U — универсум предметов теории T, $x_1, x_2, ..., x_m$ — предметные переменные теории T, M — множество предикатов $P(x_1, x_2, ..., x_m) = 0$, заданных на пространстве U^m. Множество M называется универсумом предикатов. Переменные X_1, X_2, ..., X_n, заданные на множестве M, называются предикатными переменными. Их значениями служат предикаты, заданные на U^m. Множество M^n — это пространство предикатов размерностью n. Элементы множества M^n называются предикатными векторами. Любая функция $F(X_1, X_2, ..., X_n) = Y$, отображающая M^n в M $(F{:}M^n \to M)$, называется предикатной операцией. Пусть R — множество предикатных операций. *Алгеброй предикатных операций над R* называется любая алгебра на носителе R. Существует несколько алгебр предикатных операций на носителе R.

Булевой алгеброй предикатных операций называется любая алгебра предикатных операций с базисом операций отрицания $\bar{X}$, дизъюнкции $X \vee Y$, конъюнкции $X \wedge Y$ для любых предикатных операций X и Y. Различают несколько булевых алгебр предикатных операций в зависимости от того, какие базисные элементы выбираются для каждой конкретной алгебры предикатных операций.

Алгеброй предикатных операций с константами и переменными называется булева алгебра предикатных операций с базисными элементами, состоящими из всевозможных тождественных и константных предикатных операций. Тождественной предикатной операцией по переменной X_j $(j = \overline{1, n})$ называется операция $F(X_1, X_2, ..., X_j, ..., X_n) = X_j$ при любых $X_1, X_2, ..., X_j, ..., X_n \in M$. Эта операция называется операцией выбора аргумента. Существует n таких операций. Константной предикатной операцией называется операция $F(X_1, X_2, ..., X_j, ..., X_n) = P$ при любых $X_1, X_2, ..., X_j, ..., X_n \in M$, где P — предикат на множестве M. Каждому предикату $P \in M$ соответствует своя константная предикатная операция. Всего существует $|M|$ константных предикатных операций, где $|M|$ — мощность множества M. Алгебра предикатных операций с константами и переменными при заданных m, n и универсуме предметов U, содержащем более одного элемента, неполна. Средствами этой алгебры невозможно выразить операцию

$$F(X) = \begin{cases} 1, \textit{если } X = P; \\ 0, \textit{если } X \neq P. \end{cases}$$

С этой операцией X_j^P алгебра предикатных операций с константами и переменными становится полной.

Дизъюнктивно-конъюнктивной алгеброй предикатных операций называется такая алгебра предикатных операций, базисными операциями которой являются операции дизъюнкции $X \vee Y$, конъюнкции $X \wedge Y$ для любых предикатных операций X и Y, а базисными элементами являются всевозможные константы $P \in M$ и предикаты узнавания предикатов X_j^P $(j = \overline{1, n}), P \in M$. При любых m, n и U дизъюнктивно-конъюнктивная алгебра предикатных операций полна. Любая предикатная операция в ней выражается формулой:

$$F(X_1, X_2, ..., X_n) = \vee F(P_1, P_2, ..., P_n) X_1^{P_1} X_2^{P_2}, ..., X_n^{P_n},$$

$$P_1, P_2, ..., P_n \in M,$$

и называется совершенной дизъюнктивной нормальной формой (СДНФ) предикатной операции.

Фундаментальной алгеброй предикатных операций называется любая алгебра, у которой базисными операциями являются операции дизъюнкции $X \vee Y$, конъюнкции $X \wedge Y$ для любых предикатных операций X и Y, а базисными элементами являются предикаты 0 и 1, всевозможные предикаты узнавания предмета x_i^a $(j = \overline{1, n};\ a, x_i \in A_i)$ и всевозможные предикаты узнавания предиката X_j^P $(j = \overline{1, n}, P, X_j \in B_j)$. При любом носителе N алгебра предикатных операций полна. Дизъюнктивно-конъюнктивная алгебра предикатов на носителе M является подалгеброй алгебры предикатных операций на носителе N. Алгебра предикатных операций вместе с ее подалгеброй, являющейся алгеброй предикатов, называется *алгеброй предикатов и предикатных операций.*

Алгебра предикатов и предикатных операций в теории интеллекта может использоваться для описания законов поведения испытуемого, для описания баз данных и баз знаний, а также для описания структуры предложений и текста. Текст — это формула, записанная на языке некоторой лингвистической алгебры предикатных операций. Наиболее удобным для человека было бы представление знаний в базах знаний в виде текстов естественного языка. В этом случае отпадает необходимость в инженерах по знаниям, которые занимаются формализацией знаний, представленных на естественных языках. В высказывании на естественном языке зафиксированы отношения на трех уровнях:

1. Отношения, заданные на множестве букв естественного языка, которым соответствуют предикаты-слова.

2. Отношения, заданные на множестве слов естественного языка, задающие синтаксис языка, которым соответствуют операции над словами-предикатами.

3. Отношения, заданные на множестве семантических значений текстовых единиц. Они включают:

- отношения, заданные на множестве семантических значений морфем, которым соответствуют семантические предикаты слов;
- отношения, заданные на множестве семантических значений слов, которым соответствуют операции над семантическими предикатами слов — алгебра семантических операций;
- отношения, заданные на множестве семантических значений предложений, которым соответствуют семантические операции над семантическими операциями.

В качестве иллюстрации можно привести небольшой пример. Пусть высказывание на естественном языке выглядит следующим образом: «Я пишу статью». Слова, входящие в состав предложения, можно рассматривать как факты, а предложение — как знание о фактах. Первый факт называет имя субъекта «Я». Второй факт называет имя действия «писать». Третий факт говорит о том, что имя объекта «статья». На языке лингвистической алгебры операций предложение записывается следующим образом:

$$F(X_1, X_2, X_3) = X_1 \wedge X_2 \wedge X_3,$$

где X_1, X_2, X_3 — предикаты, соответствующие словам рассматриваемого предложения. На языке алгебры предикатов предикаты-слова выражаются в виде следующих формул: $X_1 = x_{11}^{я}$, $X_2 = x_{21}^{п} x_{22}^{и} x_{23}^{ш} x_{24}^{у}$, $X_3 = x_{31}^{с} x_{31}^{т} x_{31}^{а} x_{31}^{т} x_{31}^{ь} x_{31}^{ю}$. Операция $\wedge$, соединяющая слова-предикаты в предложении, получила название «конъюнкция». Отношения, зафиксированные в данном предложении, соответствующие первым двум уровням, записываются в формульном виде следующим образом:

$$x_{11}^{я} \wedge x_{21}^{п} x_{22}^{и} x_{23}^{ш} x_{24}^{у} \wedge x_{31}^{с} x_{31}^{т} x_{31}^{а} x_{31}^{т} x_{31}^{ь} x_{31}^{ю} = 1. \quad (1)$$

Полученное лингвистическое уравнение можно решить программным путем с помощью соответствующего решателя лингвистических уравнений, либо представить в виде лингвистической переключательной цепи, которую можно реализовать аппаратно, используя разработанные в последнее время микроэлектронной промышленностью программируемые логические интегральные микросхемы (ПЛИС). Переключательная цепь, соответствующая лингвистическому уравнению (1), представлена на рис. 2.

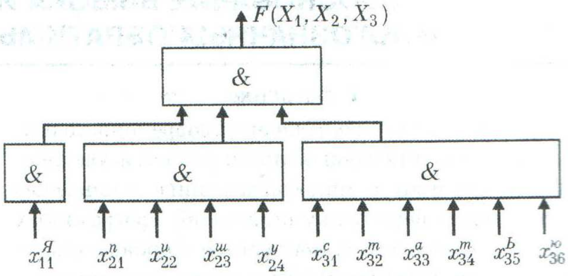

Рис. 2. Переключательная цепь

4. Основные результаты и выводы

Выводы. Используя алгебру предикатов и предикатных операций, можно создать интегрированную модель представления знаний (ИМПЗ), основанную на традиционных моделях представления знаний, а также на моделях представления знаний на естественном языке. В интеллектуальных информационных системах эти знания можно обрабатывать с помощью метода компараторной идентификации, а также современных методов Text Mining, которые позволяют эффективнее получать и обрабатывать информацию. Алгебрологические уравнения теории интеллекта используются для разработки лингвистических сопроцессоров в составе современных компьютеров. Кроме того, полученные предикатные уравнения и переключательные цепи становятся основой для создания компьютерных систем параллельной обработки данных.

Список литературы: 1. Перспективы развития вычислительной техники: В 11 кн.: Справ. пособие / Под ред. Ю. М. Смирнова. Кн. 1: Информационные семантические системы / Н. М. Соломатин.– М.: Высшая школа, 1989.– 127 с. 2. *Кокорева Л. В., Перевозчикова О. Л., Ющенко К. Л.* Диалоговые системы и представление знаний.– Киев: Наук. думка, 1992.– 448 с. 3. Искусственный интеллект: В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы: Справочник / Под ред. Д. А. Поспелова.– М.: Радио и связь, 1990.– 304 с. 4. *Рафаэл Б.* Думающий компьютер.– М.: Мир, 1979.– 400 с. 5. *Бондаренко М. Ф., Дударь З. В., Ефимова И. А. и др.* О мозгоподобных ЭВМ // Радиоэлектроника и информатика.– 2004.– № 2. С.

Поступила в редколлегию 06.04.2006