

## **ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКОЙ**

**Д.А. ЗУБОВ**

На базе экспертной системы поддержки принятия решений для управления углеобогатительной фабрикой предложены методы интенсификации взаимодействия человека и ЭВМ, повышения качества и оперативности производственных решений операторов. Рассматриваются визуализация экспертных знаний с помощью диаграммной техники Чена, адаптация фреймовой базы знаний к конечному пользователю на основе динамического интерфейса, ввод речевой информации в рамках системы «Комбат» с последующим распознаванием лингвистических единиц с применением алгоритма компараторной идентификации. Описано программно-аппаратное обеспечение реализации этих функций.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Технологические процессы (ТП) углеобогатительной фабрики (УОФ) характеризуются стохастичностью протекающих внутри установок сложных физико-химических процессов; значительным уровнем случайных возмущений; слабой взаимосвязью основных переменных; многомерностью, зашумленностью, большим запаздыванием и неполнотой информации о выходных координатах; большим количеством разнотипного оборудования; отсутствием надежных средств контроля некоторых технологических параметров (например, уровня пульпы во флотомашине, классификации по крупности угольных частиц в отходах, зольности концентрата и т. д.) [1]. Данные особенности в совокупности усложняют задачу управления комплексом ТП УОФ. Это на практике часто приводит к тому, что квалификация работников оказывается недостаточной для обслуживания высокотехнологичного оборудования и средств автоматизации. В результате обычной практикой на действующих украинских УОФ становится выключенное или неработоспособное состояние аппаратуры автоматизации. Поэтому повышение оперативности и качества принимаемых операторами ТП производственных решений с помощью динамической экспертной системы (ЭС) на базе эффективных современных методов и алгоритмов интеллектуального анализа экспертной информации является актуальной задачей.

Анализ проведенных исследований [1–4] показал, что в настоящее время еще не создан промышленный образец ЭС поддержки принятия решений операторов, инвариантных ТП. Однако разработаны и эксплуатируются образцы ЭС отдельных ТП, например, флотации углей [1]. Практика эксплуатации интеллектуальных систем показывает преимущество оригинальных, ориентированных на конкретную предметную область, ЭС.

В данной работе предлагается использовать диаграммную технику Чена для визуализации экспертных знаний, динамический интерфейс программного обеспечения (ПО) для адаптации фреймовой базы знаний (БЗ) к конечному пользователю, систему «Комбат» для ввода русской речи, алгоритм компараторной идентификации для распознавания лингвистических единиц.

Анализ экспертной информации комплексной системы управления УОФ проводится в рамках решения задачи синтеза фреймовой динамической ЭС поддержки принятия решений операторов ТП, которая реализуется на базе трех принципов.

1. Дружественность пользовательского интерфейса. Достигается визуализацией экспертных знаний, естественно-языкового пользовательского интерфейса, технологии Drag-and-Drop взаимодействия элементов ПО ЭС.

2. Использование БЗ ЭС. Ее структура адекватна модели предметной области.

3. Построение трассы логического вывода рекомендаций по управлению на основе математического аппарата, адекватного модели представления знаний.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CASE-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ**

Традиционно один из наиболее распространенных способов представления БЗ ЭС — таблицы или графики [1–4]. Для повышения наглядности и компактности визуального представления БЗ ЭС предлагается использовать диаграммы сущность/связь Чена (ERD — Entity-Relationship Diagrams), которые являются составной частью CASE-технологии [5]. Проиллюстрируем это на примере одного правила БЗ ЭС поддержки принятия решений операторов флотационного отделения УОФ [6]:

ЕСЛИ в отходах появляется значительное количество угля флотационной крупности вследствие неполадок в системе классификации материала перед флотацией,

ТО — улучшить работу классификационной системы.

На рис. 1. каждый тип сущности показан в виде отдельного прямоугольника с его именем внутри. Зависимые типы сущностей изображаются в двойной рамке. Атрибуты сущностей показаны в виде эллипсов с названием атрибутов, соединенных сплошной линией с соответствующей сущностью или отношением. Каждый тип отношения показан в виде ромба с названием отношения внутри. Ромб окружается двойной линией, если отношение задано между зависимым типом сущности и типом сущности, от которой он находится в зависимости. Отдельные элементы диаграммы соединяются сплошными линиями.

Использование данного подхода позволяет на одной диаграмме располагать три исходных множества: факты и рекомендации, а также правила для получения рекомендаций по управлению, запросы пользовательского интерфейса. Таким образом, повышается наглядность и компактность представления БЗ. Внедрение CASE-технологии в процесс разработки ПО также

ускоряет процесс его создания за счет автоматизации процесса синтеза крупномасштабных БЗ большими группами разработчиков и позволяет уже на ранних этапах проектирования представлять компьютерные данные в соответствии с выбранной моделью предметной области.



Рис. 1. Пример диаграммы сущность/связь

### ФРЕЙМОВАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ЭС ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ОПЕРАТОРА ТП УОФ

Один из основных факторов методологии синтеза ПО ЭС — выбор структуры модели представления знаний [2–4]. Выбор фреймовой модели обусловлен:

- использованием более естественных с точки зрения обычной повседневной практики понятий, простотой введения новых понятий;
- упрощением разработки многократно используемых компонентов приложений;
- сокращением размера ПО за счет того, что повторяющиеся (наследуемые) свойства и действия многократно не описываются;
- сравнительно простой возможностью внесения изменений в ПО без модификации уже написанных и уже скомпилированных частей, а в ряде случаев без их перекомпиляции;
- более четкой локализацией свойств и поведения объектов конкретного класса в одном месте (используя свойство инкапсуляции), позволяющей проще разбираться со структурой ПО, отлаживать его, находить ошибки;

- возможностью разделения доступа к различным объектам ПО. Формально динамическую фреймовую ЭС представим тройкой [3]

$$\langle R_3, B_3, I_3 \rangle,$$

где  $R_3$  — рабочая память системы, содержащая текущие данные;  $B_3$  — база знаний, включающая множество фреймов;  $I_3$  — интерпретатор, синтезирующий трассу вывода.

Пусть  $S$  — множество логических переменных со строками символов;  $Z$  — множество целых чисел. Файл БЗ представляется линейным массивом строк в следующем формате ( $j = 1, \dots, N_\Phi$ ):

$N_\Phi$  (количество фреймов,  $N_\Phi \in Z | N_\Phi \geq 0$ );

• • •

$j$  (номер фрейма;  $j \in Z | 1 \leq j \leq N_\Phi$ );

$R_j$  (ранг фрейма  $j$ ;  $R_j \in Z | R_j \geq 0$ );

$K_{1,j}$  (количество конъюнктов 1-го уровня фрейма  $j$ ;  $K_{1,j} \in Z | K_{1,j} \geq 0$ );

$S_{1,1,j}$  (1-й конъюнкт 1-го уровня фрейма  $j$ ;  $S_{1,1,j} \in S$ );

• • •

$S_{K_{1,j},1,j}$  ( $K_{1,j}$ -й конъюнкт 1-го уровня фрейма  $j$ ;  $S_{K_{1,j},1,j} \in S$ );

• • •

$K_{7,j}$  (количество конъюнктов 7-го уровня фрейма  $j$ ;  $K_{7,j} \in Z | K_{7,j} \geq 0$ );

$S_{1,7,j}$  (1-й конъюнкт 7-го уровня фрейма  $j$ ;  $S_{1,7,j} \in S$ );

• • •

$S_{K_{7,j},7,j}$  ( $K_{7,j}$ -й конъюнкт 7-го уровня фрейма  $j$ ;  $S_{K_{7,j},7,j} \in S$ );

$I_j$  (интерпретация условной части фрейма  $j$ ;  $I_j \in S$ );

$C_j$  (комментарий фрейма  $j$ ;  $C_j \in S$ ).

• • •

Как видно из структуры файла БЗ, в фрейме выделяется семь уровней, число которых определяется максимальным количеством конъюнктов в условной части решающего правила и рекомендациями системного структурного анализа [5]. Причем последующий уровень представления знаний содержит сведения о знаниях предыдущего. Этот метод структурирования данных обусловлен иерархическим разделением информационных потоков указанной предметной области и позволяет рассматривать знания с различным уровнем подробности. Для предметной области поддержки принятия решений оператора УОФ в ЭС построены тезаурус из 209 элементов и 98 правил. Тестирование продукций показало 89,8% правильных и 10,2% альтернативно возможных выводов.

В работах [7, 8] описана процедура синтеза трассы вывода на основе классического исчисления высказываний. Синтез осуществляется в рабочей памяти и заключается в построении линейного массива строк (конъюнктов),

выбранных пользователем, заканчивается при равенстве логической единице выражения

$$S_{1,1,j} \& \dots \& S_{K_{1,j},1,j} \& \dots \& S_{1,7,j} \& \dots \& S_{K_{7,j},7,j} \cdot \quad (1)$$

При инсталляции ПО ранги всех фреймов инициализируются значением 0, т.е. имеют одинаковый приоритет. При выполнении условия (1) ранг фрейма  $j$  увеличивается на единицу и, таким образом, при следующем выводе в соответствующем окне программы он будет занимать позицию, которая старше, чем фрейм с меньшим рангом. Пример фрагмента БЗ приведен в таблице.

Пример базы знаний фреймовой ЭС

Наименование слота	Значение слота	Аналитическое выражение
$N_{\Phi}$	7	
• • •		
$N_1$	4	$S_{1,1,4} \&$ $\& S_{1,2,4} \& S_{1,3,4}$
$R_4$	2	
$K_{1,4}$	1	
$S_{1,1,4}$	158 Неполомки в работе грохотов	
$K_{2,4}$	1	
$S_{1,2,4}$	91 Низкая эффективность грохочения	
$K_{3,4}$	1	
$S_{1,3,4}$	92 Залипание отверстий сит или колосников	
$K_{4,4}$	0	
$K_{5,4}$	0	
$K_{6,4}$	0	
$K_{7,4}$	0	
$I_4$	99 Освободить грохот от материала и очистить сито или колосники	
$C_4$	54-е правило	
• • •		

## СИНТЕЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭС

Для моделирования ЭС на ЭВМ синтезировано ПО [7, 8], функционирующее в среде Delphi. Код ПО для повышения удобочитаемости и сокращения объема оптимизирован на базе унификации программных модулей с помощью принципа делегирования и анализа событий в Delphi. Иерархия меню показана на рис. 2.

Проведено случайное и выборочное тестирование динамических потоков данных ЭС с помощью следующих основных процедур:

- анализ аномальных ситуаций, связанных с описанием, использованием и уничтожением записей фреймов и тезауруса;

- генерирование различных ситуаций для прохождения разных ветвей программы;
- анализ фреймов на противоречивость и наличие некорректных значений слотов.



Рис. 2. Иерархия меню ПО динамической ЭС

Анализ тестирования показывает работоспособность ЭС, которая обеспечивается отдельным хранением данных фреймов и тезауруса, адекватным представлением знаний предметной области углеобогащения (семь уровней конъюнктов), дружелюбностью пользовательского интерфейса (наличие встроенных программных средств отладки и корректировки БЗ).

## ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВЫЙ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС

Один из основных элементов рассматриваемой системы — ПО ввода и анализа естественно-языковой информации. Для повышения качества распознавания введенной лингвистической информации предлагается использовать алгоритм компараторной идентификации лингвистических единиц ограниченного словаря терминов [11]. Развитие технического и алгоритмического обеспечения речевого ввода информации в промышленных компьютерных системах достигло уровня, позволяющего эффективно их использовать для организации качественного естественно-языкового интерфейса. В данной работе используется SCADA-система на базе Iconics Genesis 32 (SCADA — Supervisory Control and Data Acquisition — дистанционное управление и сбор данных), которая повышает эргономическую организацию рабочих мест, интенсифицирует взаимодействие человека и ЭВМ. Она имеет большое значение для углеобогащающего производства с высоким уровнем шума, где необходимо передавать информационные сообщения из центральной диспетчерской операторам локальных ТП с использованием преобразования речь/текст.

В работе [9] проведен анализ двух подходов линейного дихотомического разделения лингвистических единиц: вычисление коэффициентов полинома, описывающего гиперплоскость по методу наименьших квадратов и итерационное построение аналитического выражения разделяющей гиперповерхности методом потенциальных функций. Показана невозможность их реализации для естественных языков из-за многомерности и высокой пере-

секаемости образов. В этом случае предлагается для повышения качества распознавания речи использовать ограниченный словарь терминов конкретной предметной области, что уменьшает количество обрабатываемых данных и, соответственно, пересекаемость образов.

Для решения задачи синтеза естественно-языкового интерфейса предлагается такая структура программно-аппаратных средств (рис.3).

Функционально SCADA-система выступает в роли OPC-сервера (передача данных), а терминал оператора ТП — OPC-клиента (прием данных). Выбор элементов обусловлен следующими факторами: гарнитура обеспечивает постоянство расстояния до микрофона, процессор с низким энергопотреблением VIA C3 позволяет строить «безвентиляторный» компьютер (в критических ситуациях отказа вентиляторов блока питания или процессора компьютер может продолжать работу при низком энергопотреблении и тепловыделении), все системы распознавания речи совместимы с 16-разрядными звуковыми картами Sound Blaster, освоение SCADA Iconics Genesis32 на базе полнофункциональной бесплатной демо-версии, операторские терминалы серии WebOIT фирмы Advantech содержат Intranet-средства связи. При исследованиях использовался персональный компьютер среднего уровня с процессором AMD K6-2 500 MHz, звуковой картой ESS 1868, обычной гарнитурой наушники+микрофон (наушники: частотный диапазон 20...20000Гц, максимальная мощность 100 мВт; микрофон: частотный диапазон 20...16000 Гц, максимальный ток нагрузки 0,4 мА).

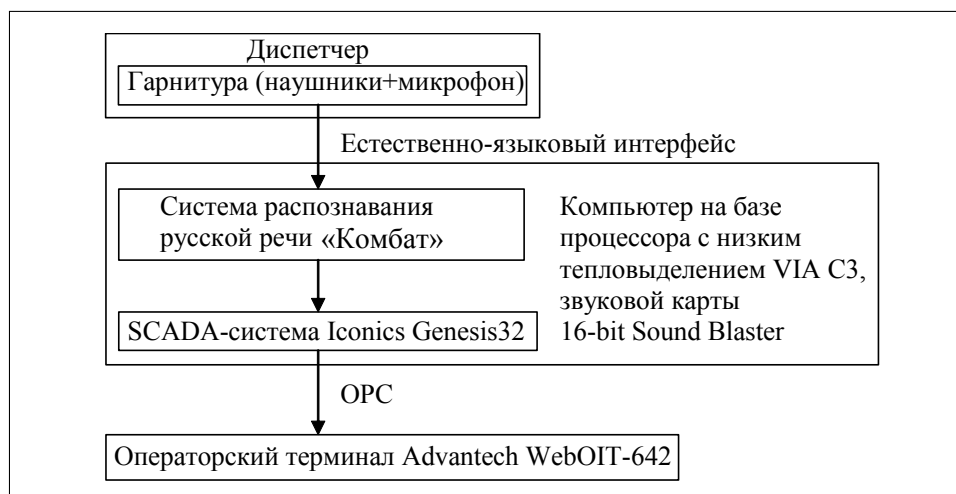


Рис. 3. Пример комплекса средств ввода и передачи естественно-языковой информации

Недостаточное внимание уделяется разработке и внедрению промышленных речевых интерфейсов. Необходимо формирование критериев выбора конкретной программы ввода речи: стоимость, качество распознавания, работа с русским языком, способ обучения новым словам. Для экономических условий действующих предприятий предлагается использовать систему распознавания русской речи «Комбат» [10], которая при ограниченном словаре терминов распознает лингвистические единицы с точностью до

100%. В контексте рассматриваемых критериев «Комбат» имеет лучший показатель соотношения цена/качество по сравнению с другими известными системами ввода речи («Dragon NaturallySpeaking», «Горыныч», «Philips FreeSpeech», «iVoice», «Voice Xpress Professional», «Сакрамент», «IBM Voicetype Simply Speaking Gold», «Voice for Windows Release 2.5», «IBM Via Voice»).

Для отработки ситуации неполно набранных или некорректно сформулированных сообщений предлагается использовать модифицированный алгоритм компараторной идентификации [11] для сравнения введенных лингвистических данных  $V_{л}$  с эталонными  $E_{i,л}$  ( $i = 1, \dots, n_{л}$ ;  $n_{л}$  — количество лингвистических эталонов) с последующей их передачей на терминал оператора ТП. Алгоритм имеет вид:

1. Для двух множеств слов (текстов)  $V_{л}$  и  $E_{i,л}$  мощностью соответственно  $v_{л}$  и  $e_{i,л}$  вычисляются мощность их пересечения  $n_{i,л} = |V_{л} \cap E_{i,л}|$  и средняя мощность  $m_{i,л} = (v_{л} + e_{i,л})/2$ .

2. Вычисляется мера пословного совпадения  $r_{i,л} = n_{i,л}/m_{i,л}$ , где  $r_{i,л}$  меняется от 0 при  $V_{л} \cap E_{i,л} = \emptyset$  до 1 при  $V_{л} = E_{i,л}$ .

3. Определяется максимальная мера совпадения  $r_{i,л}$  и, соответственно, индекс  $i$ , который указывает номер лингвистического эталона.

Предложенный алгоритм организации естественно-языкового интерфейса был использован для синтеза прототипа SCADA поточно-транспортной системы сушильного отделения УОФ «Луганская». Анализ словаря лингвистических единиц операторской станции № 1 показал, что он с достаточной для практики точностью описывается множеством словоформ мощностью 78 слов. В словарь вошли такие словоформы: агрегата, аппарат, барабана, барабанный, вентилятор и др. Построенный тезаурус вводится в доступную для всех текстовых процессоров словарную группу «System/Global Commands» системы «Комбат». ПО реализовано на базе встроенного языка программирования Visual Basic for Application в SCADA-системе Iconics Genesis 32. Отличительной особенностью разработки является хранение базы данных лингвистических эталонов в формате файла электронной таблицы Microsoft Excel, что обеспечивает доступ для других программ. На рис.4 показан фрагмент работы ПО в режиме передачи нового информационного сообщения от OPC-сервера OPC-клиенту по тэгу «TagNew1» OPC-Simulator с описанием окон приложений. Тестирование разработанного ПО показало, что качество распознавания лингвистических эталонов и речи при настройке системы на конечных пользователей достигает 100%.

В настоящее время разработчики современных компьютерных устройств во всем мире уделяют значительное внимание развитию лингвистического ПО, которое позволяет строить интеллектуальные автоматизированные комплексы. Мы же рассмотрели лишь один из вариантов синтеза речевого человеко-машинного интерфейса (система «Комбат») с обработкой лингвистической информации на базе алгоритма компараторной идентификации.



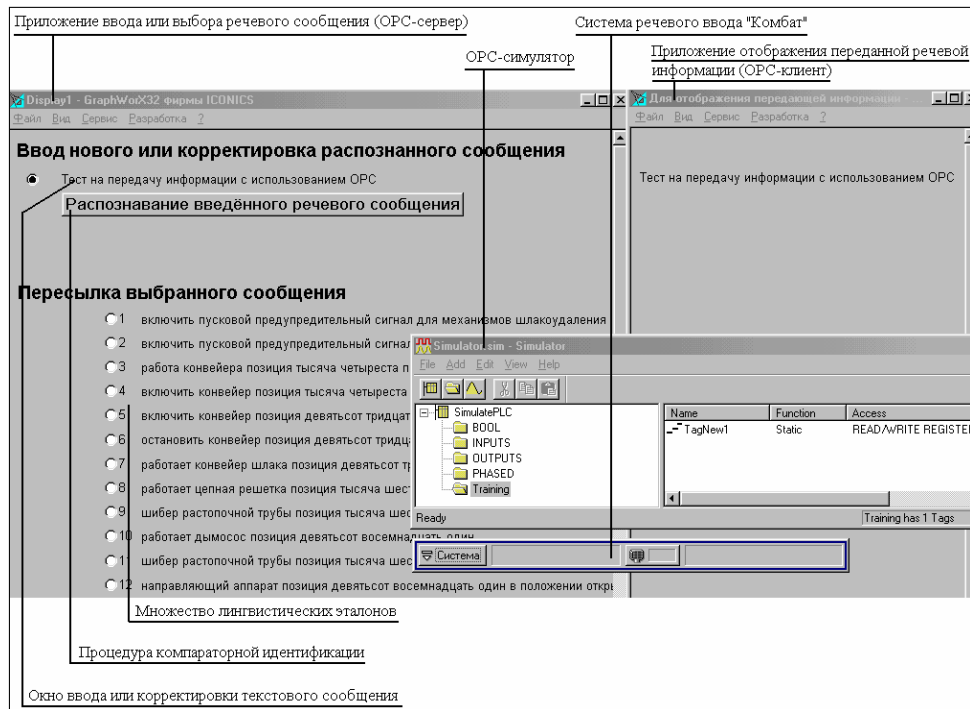


Рис. 4. Фрагмент работы программы

## ВЫВОДЫ

Анализ экспертной информации комплексной системы управления УОФ проведен в рамках решения задачи синтеза фреймовой динамической ЭС поддержки принятия решений операторов ТП с использованием следующих принципов: дружелюбности пользовательского интерфейса, которая достигнута на базе визуализации экспертных знаний с помощью диаграммной техники Чена; естественно-языкового пользовательского интерфейса на основе компараторной идентификации лингвистических единиц ограниченного словаря терминов; технологии Drag-and-Drop взаимодействия элементов ПО динамической ЭС; использования фреймовой БЗ ЭС, которая адекватно описывает предметную область УОФ.

Данный подход позволяет повысить оперативность и качество принимаемых операторами ТП решений. Корректность функционирования ЭС поддержки принятия решений операторов ТП УОФ подтверждается совпадением выводов, полученных при тестировании ЭС, и экспертов на 89,8 %, а также стопроцентным распознаванием введенной лингвистической информации при настройке на конечного пользователя.

Дальнейшим развитием предложенного подхода представляется разработка, совершенствование и внедрение современных технологий ввода и распознавания речи, что позволит эргономично интенсифицировать взаимодействие человека и ЭВМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Зубов Д.А.* Разработка системы автоматизированного управления цехом флотации углей на базе экспертных оценок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Луганск, 1998. — 234 с.
2. *Герман О.В.* Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний. — Минск.: ДизайнПРО, 1995. — 255 с.
3. *Статические и динамические экспертные системы: Учеб. пособие / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот.* — М.: Финансы и статистика, 1996. — 320 с.
4. *Поспелов Г.С.* Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии. — М.: Наука, 1988. — 280 с.
5. *Калянов Г.Н.* CASE — структурный системный анализ. — М.: ЛОРИ, 1996. — 240 с.
6. *Зубов Д.А.* Использование CASE-технологий при проектировании производственной экспертной системы // Вісник СНУ ім. В. Даля. — 2002. — № 1(47). — С. 257–260.
7. *Зубов Д.А.* Динамическая фреймовая экспертная система поддержки решений оператора углеобогадательной фабрики // Искусственный интеллект. — 2002. — № 1. — С. 73–80.
8. *Зубов Д.А.* Логический вывод в базе знаний оператора углеобогадательной фабрики на основе классического исчисления высказываний // Вісник СНУ ім. В. Даля. — 2002. — № 8(54). — С. 159–162.
9. *Зубов Д.А.* Интеллектуальный пользовательский интерфейс на базе информативного лингвистического анализатора // Новые технологии управления движением технических объектов: Материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. — Ростов-на-Дону: Изд. СКНЦ ВШ, 2000. — С. 91–93.
10. *Суханова М.* А что у нас? // Мир ПК. — № 3. — 1999. — С. 43.
11. *Бондаренко М.Ф., Калиновский А.С., Рябова Н.В.* Методы и модели извлечения знаний из текстовых баз данных // Тр. Одесского политехн. ун-та: Научный и производственно-практический сборник по техническим и естественным наукам. — Одесса, 2001. — Вып. 4 (16). — С. 119–121.

Поступила 25.06 2003