

## ГИБРИДНАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА С ГЛУБИННЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКИ БИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Ульянов Сергей Викторович<sup>1</sup>, Колбенко Екатерина Викторовна<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Доктор физико-математических наук, профессор;

PronetLabs;

117403 Москва ул. Булатниковская, 20, стр. 3

e-mail: uyanovsv@mail.ru.

<sup>2</sup> Старший преподаватель;

ГОУ ВПО Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,

Институт системного анализа и управления;

141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19,

e-mail: ekolbenko@uni-dubna.ru.

*Приводится описание назначения и особенностей гибридной экспертной системы с глубинным представлением знаний для проектирования, диагностики и доводки биотехнических изделий. Сформулированы требования к аппаратному и программному обеспечению. Подробно рассмотрены алгоритмы логического (прямого и обратного) нечеткого вывода, а также вопросы построения свободного формата представления знаний. Дано описание реализации разработанной системы на примере внедренной экспертной системы выбора узлов протеза и оценки качества протезирования.*

Ключевые слова: гибридная экспертная система, база знаний, биотехнические изделия.

## HYBRID EXPERT SYSTEM WITH A DEEP KNOWLEDGE REPRESENTATION FOR DESIGN AND DIAGNOSTICS BIOTECHNICAL PRODUCTS

Ulyanov Sergey<sup>1</sup>, Kolbenko Ekaterina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

PronetLabs;

117403, Moscow, Bulatnikovskaya str., 20-3;

e-mail: uyanovsv@mail.ru.

<sup>2</sup> Senior teacher;

Dubna International University of Nature, Society and Man,

Institute of system analysis and management;

141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: ekolbenko@uni-dubna.ru.

*The purpose and characteristics of hybrid expert system with a deep knowledge representation for design, diagnostics and debugging of biotechnological products is described. The requirements for hardware and software are presented. The algorithms of the logical (forward and reverse), fuzzy inference, and the problems of constructing a free-form of knowledge representation in detail are discussed. A description of the implementation of the developed system parameters on the example of embedded expert system for selecting sites and assessing the quality of denture prosthetics is given.*

Keywords: hybrid expert system, knowledge base, biotechnical products.

## Введение

На практике существует класс задач (разработка изделий медицинской техники, проектирование человеко-машинных и биотехнических систем, моделирование и создание робототехнических систем для технологических дискретных и непрерывных процессов с учетом аварийных ситуаций и др.), связанных с изготовлением изделий и последующей их доработкой по результатам натурных испытаний или имитационного моделирования. Особое место в этом классе задач занимает проектирование биотехнических систем, когда от момента проектирования до изготовления макета характеристики биосистемы могут существенно изменяться. В результате возникает необходимость в корректировке параметров биологической или технической системы. Таким образом, процесс проектирования и изготовления опытных образцов в этих случаях является нестационарным во времени и носит итеративный характер.

При этом весь процесс (от проектирования до окончательного изготовления изделия-образца) включает в себя следующие этапы:

- сбор и обработка исходной информации для проектирования;
- выбор технических решений;
- изготовление изделий;
- испытание готового изделия и наблюдение отклонений от нормы;
- диагностика причин отклонений;
- рекомендации по устранению дефектов.

Существенной особенностью процесса изготовления биотехнического изделия является осуществление на этапе 4 испытания готового изделия (в отличие от чисто технических изделий) как биотехнического комплекса «биосистема – технические средства», включающего в себя пользователя системой (оператора, пациента и т. д.).

В связи с отмеченным, в данной работе предлагается (рис. 1) архитектура аппаратно-программного комплекса для создания экспертных систем со свободным форматом представления знаний в САПР указанного класса задач.

При этом существуют локальные обратные связи между этапами 5 и 2, так как информация, полученная при диагностике отклонений, играет существенную роль для корректировки решающих правил на этапе 2. Эволюционный характер развития биосистемы и ее взаимодействия с техническими системами носит сложный характер и содержит многочисленные факторы неопределенности (нечеткости) как в исходной информации, так и в процессах прогнозирования развития биосистемы.

Наличие таких факторов неопределенности существенно отражается на архитектуре САПР подобных систем [1]. В качестве примера достаточно указать на разработку систем проектирования протезов нижних конечностей детей и подростков, у которых происходит резкое изменение параметров культы в процессе их развития. В этом случае при проектировании и изготовлении узлов протеза изменение параметров, например культы бедра, часто приводит к несоответствию выбранных узлов протеза (типа и материала приемной гильзы, коленного шарнира и т. п.).

Для принятия корректных решений в подобного рода системах проектирования необходимо дополнительно создавать гибридные экспертные системы второго поколения с глубинным представлением знаний, в которых присутствуют блоки сбора объективной информации об изменении параметров биосистемы и гибких (прямых и обратных) логических выводов по нечеткой исходной информации [2 – 10].

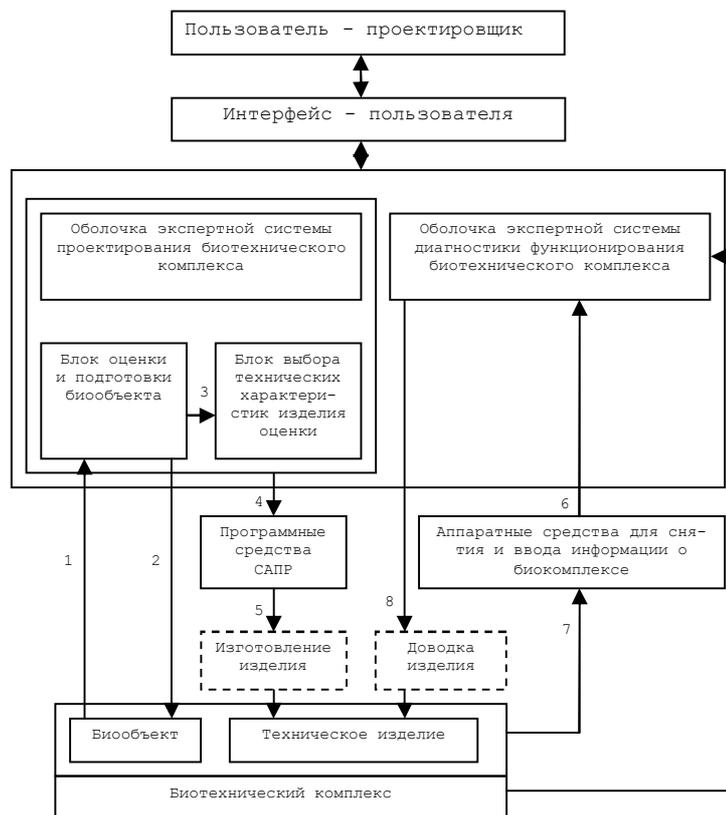


Рис. 1. Архитектура гибридной экспертной системы проектирования и диагностики биотехнических изделий: 1 – индивидуальные характеристики биообъекта, 2 – рекомендации по подготовке биообъекта к функционированию в составе биоконцентра, 3 – функциональные требования, предъявляемые к техническому изделию, 4 – технические характеристики изделия, 5 – управляющая программа для станка с ЧПУ, 6 – данные объективного исследования функционирования биоконцентра, 7 – данные визуального наблюдения за функционированием биоконцентра, 8 – рекомендации по доводке изделия

Дополнительный обзор и список литературы по данной проблеме можно найти в [11, 12].

Рассмотрим подробнее особенности архитектуры гибридной экспертной системы проектирования и диагностики биотехнических изделий представленной на рис. 1.

## 1. Архитектура гибридной экспертной системы

Отличительной особенностью описываемой системы является наличие в ней баз знаний различной структуры и использование различных типов логического вывода. Представленная архитектура предусматривает (на основе отмеченной отличительной особенности) проектирование и диагностику биотехнического комплекса на базе как объективной информации, получаемой с помощью аппаратных средств, так и субъективной информации пользователя – проектировщика о биотехническом комплексе. Перечисленное позволяет [1] отнести данную систему к классу гибридных экспертных систем с глубинным уровнем представления знаний в соответствии с определениями [2 – 12].

Принятие решений, основанное на данных видах информации, осуществляется в гибридной экспертной системе и через блок выбора технических характеристик изделия передается в блок САПР.

Этапы проектирования технического изделия и диагностики причин отклонения функционирования биоконцентра от номинального режима существенно отличаются по требованиям, налагаемым ими на математическое и программное обеспечение поддерживающих их подсистем. Поэтому ниже описывается архитектура программно-аппаратного комплекса для создания экспертных систем указанного класса задач (см. рис. 1), а также идеология построения подсистем комплекса.

### 1.1. Подсистема проектирования технического изделия

Решения задач в этой подсистеме осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит анализ исходной информации о биообъекте, на базе которого вырабатываются требования, предъявляемые к техническому изделию с учетом индивидуальных характеристик биообъекта. Кроме того, на этом этапе осуществляется выдача рекомендаций по подготовке биообъекта к выполнению функций в качестве элемента системы «биообъект – техническое изделие».

На базе требований, сформулированных в результате завершения первого этапа, на втором этапе осуществляется непосредственно проектирование технического изделия, которое может сводиться к выбору материала изделия, его конструктивных особенностей, вариантов сборки и ряда других характеристик.

В основу описываемой подсистемы положена модификация идеологии оболочки экспертной системы ЭСПЛАН [13].

Для описания предметной области (ПО) выделяется множество объектов – поименованных элементов, существенных для данной ПО. Объекты могут принимать значения, отражающие некоторые фиксированные состояния объектов (как в количественном, так и в качественном выражении). Описание ПО осуществляется путем установления совокупности связей (причинно-следственных, родо-видовых и т. д.).

В качестве формализма описания знаний используются правила – продукции. Основным элементом языка представления знаний в системе является конструкция вида:

*Если <условие>, То <действие>.*

Левая часть правила содержит условия применимости правой части. Условие представляет собой конъюнкцию бинарных логических операций эквивалентности (неэквивалентности) объекта и какого-либо заданного значения. Следствие правила – последовательность действий, среди которых могут быть действия четырех типов, представленных ниже.

Приведем формальную модель представления знаний в описываемой системе. Пусть  $W = \{w_1, w_2, \dots\}$  – множество имен объектов ПО. Каждый из объектов  $w_i$  характеризуется в системе кортежем:  $(i, w, n, d, e)$ , где  $i$  – индекс объекта;  $w$  – имя объекта;  $n$  – полное наименование объекта;  $d$  – регламентный диапазон изменения значений объекта;  $e$  – единица измерения.

Пусть, далее,  $P = \{1, 2, \dots\}$  – множество индексов правил-продукций,  $\text{card}(P)$  – количество продукций в БЗ. В общем случае каждое правило – продукция с индексом  $j \in P$  есть продукционно-вычислительное отношение на подмножестве множества  $W$ . Продукция имеет вид:

(j) ЕСЛИ *antes j* ТО *conseq j*,

где  $j$  – индекс продукции; *antes j* – посылка  $j$ -той продукции; *conseq j* – следствие  $j$ -той продукции. Каждой продукции такого вида приписывается кортеж:

(j,  $CF$ , <автор>, <дата>, <объяснение>),

где  $CF$  – степень истинности правила, зависящая как от ранга эксперта – автора правила, так и от его субъективной уверенности в истинности данного правила; <автор> – идентификатор эксперта – автора правила; <объяснение> – текст авторского объяснения правила. Посылка и следствие правила имеют вид:

$$\text{antes } j = r_{j1} \text{И} r_{j2} \text{И} \dots \text{И} r_{jq},$$

$$\text{conseq } j = \Delta_{j1} \text{И} \Delta_{j2} \text{И} \dots \text{И} \Delta_{jt},$$

где  $r_{jq} (q = \overline{1, Q})$  –  $q$ -я элементарная посылка  $j$ -той продукции;

$$\Delta_{jt} (t = \overline{1, T}) \text{ – } t\text{-е элементарное следствие } r_{jq} = w_i \left[ \left\{ \begin{array}{l} = \\ \neq \end{array} \right\} a_{jq} \right];$$

$a_{jq}$  – лингвистическое значение.

Элементарная посылка связывает тот или иной объект  $W$  в ПО с каким-либо лингвистическим значением, существенным для данного правила; может иметь вид  $a = a'$  ИЛИ  $a^2$  ИЛИ  $\dots$ . Если для правила существенным является сам факт наличия значения какого-либо объекта (т. е. элементарная посылка имеет смысл «имеет место»), то в этом случае значение не указывается и подразумевается «любое». Индексы образуют множество, являющееся множеством индексов входных объектов продукции  $j$ . Элементарное действие есть действие, предпринимаемое в случае истинности *antes*. Предусмотрено 4 типа таких действий: приписывание значения одного объекта другому; приписывание объекту заданного лингвистического значения; приписывание объекту вычисленного арифметического значения выражения; выполнение некоторых специальных операторов-функций.

Специальные операторы-функции представляют пользователю системы следующие возможности:

- организация вопросно-ответного диалога;
- связи с внешними программными комплексами;
- работа с файлами;
- декомпозиция базы знаний.

Возможность декомпозиции базы знаний на отдельные подбазы позволяет применить структурный подход к проектированию и реализации базы знаний. Кроме того, сегментация большой базы знаний необходима, если доступный объем оперативной памяти недостаточен для ее хранения целиком. В системе предусмотрена интерпретация лингвистических значений с использованием аппарата теории нечетких множеств. При этом функции принадлежности, описывающие лингвистические значения объектов, представляются в системе в параметрическом виде – упрощенном ( $L-R$ )-формате [14]. Для хранения всех промежуточных и результирующих данных служит рабочая область, куда при каждом присваивании значений объектам в правых частях правил-продукций попадают тройки (<имя объекта>, <значение>, <степень достоверности значения>). Все правила хранятся в базе знаний системы. Правила являются автономными в том смысле, что ни одно из правил не содержит ссылок на другие. Ввод знаний в систему происходит в режиме диалога. Эксперт вводит правила-продукции и значения коэффициентов  $CF$ , сопровождая их при необходимости авторским объяснением. Элементы <автор> и <дата> фиксируются системой во время начала работы с ней.

В системе существуют два зарезервированных объекта НАЧАЛО и КОНЕЦ. Объекты НАЧАЛО и КОНЕЦ являются встроенными и определяются системой соответственно в начале и конце логического вывода. Объект НАЧАЛО используется для выполнения начальных действий (инициации базы знаний) – ввод исходных данных, начальные установки и т. д.

Объект КОНЕЦ используется для инициации заключительного этапа логического вывода — отображение (или сброс в файл) результатов и т. д.

Порядком запуска правил управляет рабочая область. Для каждого попадающего в нее объекта со своим значением отыскиваются правила, в условия которых входит данный объект. Для каждого выбранного таким образом правила вычисляется степень истинности условия, т. е. насколько текущие значения (из рабочей области) всех входящих в условие правила объектов «соответствуют» значениям, записанным в левой части правила. Вычисленная степень истинности условия сравнивается с некоторым порогом (установленным пользователем перед началом работы системы), и, если она оказывается не меньше последнего, то правило выполняется.

Более подробно процедура логического вывода описана в [13].

## **1.2. Подсистема диагностики биотехнического комплекса**

Отметим некоторые особенности диагностики биотехнических систем. Специфика диагностики биотехнических комплексов заключается в том, что различные дефекты биотехнических систем выражаются порознь достаточно ограниченным набором признаков; ряд признаков характерен для большой совокупности дефектов; наложение различных дефектов искажает картину каждого из дефектов; проявление признаков в большой степени зависит от индивидуальных особенностей биотехнического объекта. В результате проявление и интерпретация одного и того же дефекта могут иметь существенные отличия при переходе от одного биотехнического объекта к другому. Поэтому установление полной однозначности при определении соответствия дефектов и их признаков не представляется возможным. Для диагностики биотехнических объектов характерно наличие в описаниях

объекта понятий и отношений с размытыми границами, суждений с многозначной шкалой истинности, процедур, обрабатывающих нечеткую исходную информацию. Данная особенность находит свое отражение в выборе механизмов и процедур логического вывода.

В предлагаемой ниже оболочке диагностической экспертной системы логический вывод порождается решением экстремальной задачи оптимизации по единственной основной «аксиоме» модели диагностирования. Прообразом правил вывода модели является композиционное правило вывода Л. Заде. Истинность логических связей вычисляется по правилам нечеткой (континуум-значной) логики.

Остановимся теперь кратко на понятии экспертной системы со свободным форматом представления знаний. Оболочка диагностической экспертной системы (ЭС) предъявляет определенные требования к формату представления той информации, которая дается экспертам для заполнения базы знаний (БЗ) системы (т. е. настройки ее на конкретную ПО). Легко понять, что «жесткость» формата БЗ может не позволить эксперту непосредственно сообщить системе некоторые существенные сведения о ПО. Если эти сведения (правила) не удастся вписать в рамки формата БЗ (даже путем их модификации), то считается, что попытка адаптировать ЭС (в имеющемся виде) к данной ПО окончилась неудачей. Инженер по знаниям путем ряда модификаций алгоритмов и программ ЭС может адаптировать ее к данной ПО. Такой путь создания ЭС, хотя и приводит так или иначе к желаемой цели (речь идет о диагностических, т. е. структурно наиболее простых ЭС), но может оказаться весьма трудоемким. Дело в том, что каждый новый формат БЗ требует, вообще говоря, «своей» машины логического вывода (МЛВ), особенно при использовании многозначной логики, так как далеко не всегда БЗ и МЛВ полностью независимы.

Оболочку ЭС стремятся адаптировать для конкретной ПО путем минимальных доработок без модификации основных частей ЭС: БЗ и МЛВ. Для этого необходимо, чтобы формат БЗ и МЛВ были достаточно универсальны. Именно такой подход принят в описываемой оболочке ЭС диагностики.

В основу построения подсистемы диагностики биотехнического комплекса (см. рис.1) была принята идеология оболочки ЭС типа FOCUS [15]. Система обладает рядом преимуществ по сравнению с разработанными логико-лингвистическими (нечеткими) моделями [16 – 20] диагностирования: позволяет объяснить появление или отсутствие каждого признака аномалий, учитывает маскирование признаков аномалиями и причинно-следственные связи между аномалиями. Для реализации процедуры логического вывода разработан быстродействующий численный алгоритм, сводящий задачу полного перебора к серии экстремальных задач целочисленного программирования. При этом задача диагностирования всегда имеет решение; кроме того, вычисляется значение истинности диагноза.

Рассмотрим кратко структуру, принятые аксиомы и механизм логического вывода в данной ЭС.

Состав ЭС диагностики и выполняемые функции. Подсистема диагностики включает следующие компоненты:

- средства создания и ведения БЗ, реализующие все необходимые функции настройки системы на конкретную ПО: заполнение, редактирование, доступ к любой информации, хранящейся в БЗ;
- транслятор правил, проверяющий правильность написания правил;
- подсистема ввода наблюдаемого вектора состояния признаков;
- процедура принятия решений (прямой и обратный вывод) с разрешением конфликтного множества;
- подсистема вывода информации, осуществляющая вывод на печать информации по БЗ системы и результатов диагностики;
- подсистема меню и контекстуально зависимых подсказок, определяющая все функции системы и средства работы с ними;
- графическая компонента, обеспечивающая представление графической информации в системе.

### **1.3. Формирование БЗ и настройка системы**

Для настройки системы на конкретную ПО эксперту необходимо определить:

1. список названий возможных дефектов;

2. список названий всех необходимых признаков (при необходимости произвести объединение признаков в группы);
3. сформулировать правила, в виде правильно построенных формул вычисления высказываний, описывающие каждый конкретный дефект (группы дефектов); матрицы влияния и маскирования;
4. расширенное описание дефектов (признаков) и рекомендации по устранению дефектов, если таковые имеют место.

Система ориентирована на возможное расширение списка дефектов, признаков и взаимосвязей между ними. При добавлении новых знаний модификация связей осуществляется автоматически.

#### **1.4. Математическая модель диагностирования и процедура логического вывода**

В математической постановке задачу диагностирования можно сформулировать следующим образом. Заданы множество аномалий  $A$ ; множество логических признаков  $B$ ; система предпочтений/аксиом  $S$ .

Необходимо выполнить некоторые действия  $T$  над множествами состояний для нахождения наиболее предпочтительного состояния или (по крайней мере) выделить множество допустимых состояний.

Таким образом, имеется некоторый объект диагностирования, для которого составлены списки возможных дефектов  $A_i$  и их признаков  $B_j$ . Обозначим через  $A_i \rightarrow B_j$  суждение « $A_i$  вызывает  $B_j$ », а через  $A_i \rightarrow B_j'$  суждение « $A_i$  вызывает  $B_j'$ ». Выражения  $A_i \rightarrow B_j$  и  $A_i \rightarrow B_j'$  вводятся для выразительности и их следует рассматривать как целые конструкции, обозначающие логические константы. Поэтому для импликации в модели употребляется символ  $\supset$  через  $\nu$  обозначается операция вычисления истинности суждения.

Предположим, что экспертной оценкой получены нечеткие отношения (матрицы влияния и маскирования):

- $\|R_{ij}\|$  – интерпретирующее отношение;
- $\|R_{ij}'\|$  – отношение маскирования;
- $\|P_{lk}\|$  – причинно-следственное отношение.

Здесь:

$$R_{ij} = \nu(A_i \rightarrow B_j),$$

$$R_{ij}' = \nu(A_i \rightarrow B_j'),$$

$$P_{lk} = \nu(A_l \rightarrow A_k), 0 \leq R_{ij}$$

$$R_{ij}', P_{lk} \leq 1, 1 \leq i, k, l, \leq m; 1 \leq j \leq n.$$

Конъюнкции  $A_i \wedge (A_i \rightarrow B_j)$  и  $A_i \wedge (A_i \rightarrow B_j')$  назовем основаниями для появления и соответственно маскирования признака  $B_j$ .

В основе процедуры логического вывода лежит система аксиом, характеризующих системы предпочтений. Набор аксиом представляет собой предикатно-логические выражения для сложных логических связей между понятиями. Для проверки аксиом используется теория приближенных рассуждений. Истинность суждения принимает значение из промежутка  $[0 - 10]$ . Процедура логического вывода (прямого и обратного) системы порождается задачей численной оптимизации истинности основной аксиомы модели, которая является конъюнкцией исходных аксиом:

- $2n$  аксиом ( $n$  – количество признаков), направленных на объяснение как наличия, так и отсутствия каждого признака. Все консеквенты этих аксиом имеют стандартный вид. При этом antecedенты этих аксиом зависят от аномалий и логических констант модели, образующих отношения влияния, маскирования;
- аксиом нечетких причинных связей между парами аномалий.

Введем следующие вспомогательные аксиомы модели диагностирования:

1. «если нет оснований для появления признака  $B_j$ , то он не появляется или его значение не достоверно». Формально:

$$\neg \bigvee_{1 \leq i \leq m} (A_i \wedge (A_i \rightarrow B_j)) \supset (\neg B_j \vee \neg TB_j), \quad 1 \leq j \leq n,$$

где  $TB_j$  есть суждение « $B_j$ , определен верно»,

2. «если есть основания для появления признака  $B_j$ , и нет оснований для его маскирования, то он появляется ИЛИ его значение не достоверно». Формально:

$$\left\{ \bigvee_{1 \leq i \leq m} (A_i \wedge (A_i \rightarrow B_j)) \right\} \wedge \left\{ \neg \bigvee_{1 \leq i \leq m} (A_i \wedge (A_i \rightarrow B_j')) \right\} \supset (B_j \vee \neg TB_j),$$

«попарные нечеткие импликации между аномалиями вытекают из соответствующих причинных св язей между ними». Формально:

$$(A_k \rightarrow A_l) \supset (A_k \supset A_l), \quad 1 \leq k, 1 \leq m.$$

Аксиомы 1-го типа обозначим через  $E_j$ ; 2-го через  $F_j$ ; 3-го через  $H_{kl}$ . Введем следующую основную аксиому модели диагностирования:

$$\bigwedge_{1 \leq i \leq n} ((q_i'' \supset E_j) \wedge (q_i' \supset F_j)) \wedge \left( \bigwedge_{1 \leq k, l \leq m} H_{kl} \right).$$

Логические константы  $q_i''$ ,  $q_i'$  определяются экспертом. Их смысл состоит в относительной важности правильного объяснения признаков. Влияние этих констант на истинность диагноза показано ниже.

Таким образом, конъюнкции всех указанных аксиом 1 – 3 дают основную аксиому модели диагностирования  $G$ .

Истинность  $v(G) = f(a, b, t)$  есть функция от  $v(A_i) = a_i$ ,  $v(B_j) = b_j$ ,  $v(TB_j) = t_j$ .

В основе алгоритма логического вывода лежит алгоритм решения следующих экстремальных задач:

$$\begin{aligned} d(b, t) &= \max f(a, b, t); \\ a_i''(b, t) &= \max \{ a_i : f(a, b, t) = d \}; \\ a_i'(b, t) &= \min \{ a_i : f(a, b, t) = d \}. \end{aligned}$$

Величина  $d(b, t) = d_{max}$  есть максимально возможное значение истинности  $G$  при заданных  $b_j$  и  $t_j$ , а величины  $a_i''$  и  $a_i'$  являются соответственно точными верхними и нижними границами координат  $a_i$  решений  $\{ a_i \}$  уравнения  $f(a, b, t) = d_{max}$ . При этом под оценкой диагностики понимаются получаемые оценки:

$$a_i' \leq v(A_i) \leq a_i'', \quad 1 \leq i \leq m.$$

В случае, когда импликация модели совпадает с импликацией Лукасевича, а конъюнкция и дизъюнкция исчисляются взятием операций  $\min$  и  $\max$ , т. е. используется нечеткая логика, указанные экстремальные задачи эквивалентны следующим: для заданных  $b = (b_1, \dots, b_n)$  и  $t = (t_1, \dots, t_n)$ ,  $0 \leq b_i, t_j \leq 1$ , определить наибольшее  $d (0 \leq d \leq 1)$ , для которого система неравенств:

$$\min(b_i, t_i) - (1 - q_j'') - (1 - d) \leq \max_{1 \leq i \leq m} \min(a_i, R_{ij}) \quad 1 \leq j \leq n; \tag{1.1}$$

$$\begin{aligned} \min \left\{ \max_{1 \leq i \leq n} \min(a_i, R_{ij}), 1 - \max_{1 \leq i \leq n} \min(a_i, R_{ij}') \right\} &\leq \\ &\leq \max(b_j, 1 - t_j) + (1 - q_j') + (1 - d) \quad 1 \leq j \leq n; \end{aligned} \tag{1.2}$$

$$a_k \leq a_i + (1 - P_{kl}) + (1 - d), \quad 1 \leq k, l \leq m \tag{1.3}$$

имеет хотя бы одно решение  $a = (a_1, \dots, a_m)$ ,  $0 \leq a_i \leq 1$  определить точные верхние и нижние границы  $a_i''$ ,  $a_i'$  координат решений (1.1) – (1.3) при найденном  $d = d_{max}$ . Величина  $d_{max}$  имеет смысл истинности диагноза.

Для реализации предложенной модели логического вывода, как отмечалось, разработан быстродействующий численный алгоритм, сводящий задачу полного перебора к серии экстремальных задач целочисленного программирования. Результатом работы процедуры логического вывода являются наиболее достоверные аномалии (одна аномалия). Рассчитываются верхние и нижние границы возможностей аномалий, характеризующие степень проявления каждой конкретной аномалии. Величина диагноза показывает сколь точно указанные признаки характеризуют полученные аномалии.

В рассматриваемой оболочке ЭС реализован как прямой вывод («стратегия, направляемая данными»), так и обратный вывод («стратегия, направляемая целями»).

При прямом выводе на вход системы подается вектор состояния признаков (наблюдаемые признаки); система на основе полученной информации идентифицирует наиболее достоверную аномалию (группу аномалий). При обратном выводе делается предположение о наличии конкретной аномалии (группы аномалий), и при заданном векторе состояний признаков это предположение либо подтверждается, либо отвергается. Эти процедуры описаны в п. 2 при обсуждении МЛВ.

## 2. Формирование свободного формата представления знаний в ЭС

Опыт эксплуатации системы показал, что жесткий формат описания взаимосвязей между дефектами и их признаками не всегда оправдан, так как иногда затрудняет описание некоторых существенных сведений о ПО, не укладывающихся в рамки данного формата. Этот факт является наиболее характерным для описания сложных ПО, где необходимо учитывать взаимосвязи не только между состояниями и признаками, но наличие третьего вида переменных – обстоятельств. Корректная запись правил такого вида требует использования в формате правила как минимум двух импликаций. Для описания этих сведений (правил) необходимо осуществлять дополнительные модификации формата БЗ и МЛВ. С учетом отмеченного была разработана модификация системы, базирующаяся на свободном формате представления знаний на основе нечеткой логики.

Рассмотрим модель БЗ диагностической ЭС, которая содержит три вида предметных переменных: состояния  $H_i$ , признаки  $W_j$  и обстоятельства  $C_h$ .

Элементы БЗ представляют собой правильно построенные формулы исчисления высказываний, содержащие указанные предметные переменные и логические константы. Логические операции исчисляются по правилам нечеткой логики с импликацией Лукасевича и  $\min$  ( $\max$ ) операциями для конъюнкции (дизъюнкции). Каждая предметная переменная  $H$  модели может входить в аксиомы произвольным образом. Однако весьма удобно и оправдано, чтобы ее вхождение в аксиомы имело форму:

$$(a \supset H) \wedge (H \supset b)$$

с различными  $a$  и  $b$ , где  $a$ ,  $b$  – логические константы с истинностями  $v(a) = a$ ,  $v(b) = b$ ,  $0 \leq a \leq b \leq 1$ . Указанное выражение удобно обозначить через

$$H(a, b) = (a \supset H) \wedge (H \supset b).$$

Если при этом используется логика Лукасевича, то

$$v(C \supset D) = \min \{ 1, 1 - v(C) + v(D) \},$$

а конъюнкция исчисляется взятием минимума, то  $v(H(a, b))$  как функция от  $a$ ,  $b$  и  $v(H)$  определяется следующим образом:

$$v(H(a, b)) = \begin{cases} 1 - (a - v(H)), & 0 \leq v(H) \leq a, \\ 1, & a \leq v(H) \leq b, \\ 1 - (v(H) - b), & b \leq v(H) \leq 1. \end{cases}$$

Указанный вид вхождения предметных переменных в аксиомы – правила имеет следующую смысловую интерпретацию:  $H(a, b)$  истинно, когда  $v(H)$  находится в промежутке  $[a, b]$  и линейно убывает по мере удаления  $v(H)$  от этого промежутка.

Таким образом, истинность  $v(H(a, b))$  как функция от  $h = v(H)$  есть  $v(H(a, b)) = 1 - p(h, [a, b])$ , где  $p(h, [a, b])$  – расстояние от  $h$  до промежутка  $[a, b]$ . Если, как и ранее, обозначить

через  $G$  конъюнкцию всех аксиом модели диагностирования, то  $v(G)$  при заданных  $v(W_i) = w_i$  и  $v(C_k) = c_k$  есть функция от  $h_i = v(H_i)$ , т.е.  $v(G) = f(h_1, \dots, h_m) = f(h)$ .

Указанная ранее экстремальная задача диагностирования имеет вид:

$$d(w, c) = \max \{f(h) : 0 \leq h_i \leq 1\},$$

$$h_i' = \min \{h_i : f(h) = d\},$$

$$h_i'' = \max \{h_i : f(h) = d\}.$$

Причем диагнозом является множество  $D = \{h : h_i' \leq h_i \leq h_i''\} = d$ , а истинность диагноза  $v(D) = d$ . Отметим, что  $D$ , вообще говоря, может не совпадать с точным диагнозом  $ED = \{h : f(h) = d\}$ , а является лишь прямоугольным параллелепипедом наименьшего объема (с гиперплоскостями параллельными координатным), содержащим  $ED$ .

Такая модель БЗ позволяет эксперту сообщить ЭС все известные ему причинные связи между состояниями объекта диагностирования и признаками состояний с учетом степени выраженности состояний, признаков и самих причинных связей.

Рассмотрим теперь МЛВ, соответствующую описанной структуре БЗ и позволяющую реализовать свободный формат представления знаний в оболочке ЭС. Для реализации МЛВ разработан быстроедействующий целочисленный алгоритм. При этом в модели используется  $l$ -значная логика с небольшим значением  $l (2 \leq l \leq 7)$ . Логический вывод осуществляется путем численного решения указанной выше серии экстремальных задач, порождаемых задачей оптимизации истинности основной аксиомы модели (конъюнкция всех правил-аксиом). В качестве диагноза (решения) служат нижние и верхние границы возможностей каждой гипотезы и истинность решения (диагноза). Система, как отмечалось, имеет как прямой, так и обратный выводы. Причем прямой вывод (от признаков к диагнозу) является локально обратным в том смысле, что обработка каждого правила-аксиомы осуществляется генерацией всех допустимых на момент начала обработки правила гипотез и отбором наиболее достоверных (по максимально возможной на момент начала обработки правила истинности диагноза). Для реализации всех возможностей использования свободного формата БЗ необходимо создание соответствующих процедур поддержки и ведения БЗ, реализующих такие функции, как, например, автоматическая корректировка аксиом при их модификациях. Тем не менее, трудности, связанные с созданием систем со свободным форматом БЗ, компенсируются гибкостью формата представления знаний, что расширяет возможности эксперта. Данный подход к формированию свободного формата представления знаний реализован в диагностической ЭС качества протезирования, описываемой ниже.

### 3. Применение гибридной экспертной системы

Ниже приводятся результаты применения описанного аппаратно-программного комплекса для создания экспертной системы выбора узлов протезов бедра и оценки качества протезирования. Экспертная система предназначена для использования в стационарных условиях медицинских отделов протезно-ортопедических предприятий и кабинетов протезирования нижних конечностей для назначения протезов бедра (при односторонней ампутации) и оценки результатов протезирования.

В основу концепции разработки системы положено представление протезирования как процесса, состоящего из совокупности следующих взаимосвязанных этапов.

*Этап 1.* Оценка состояния организма пациента и культи протезируемой конечности. Выявление противопоказаний к протезированию.

*Этап 2.* Лечение или формирование культи. Устранение относительных противопоказаний к протезированию.

*Этап 3.* Выбор элементов протеза, параметров его схемы сборки, непосредственно сборка, подгонка и устранение дефектов.

*Этап 4.* Визуальная и инструментальная (объективная) оценка качества протезирования. Обучение пользованию протезом.

*Этап 5.* Пользование протезом. Накопление пациентом жалоб и замечаний в процессе пользования протезом.

Характерной особенностью рассматриваемого процесса является наличие в нем двух циклов: малого, содержащего третий и четвертый этапы, и большого, охватывающего все этапы процесса. Малый цикл отражает процесс оптимизации характеристик системы «человек-протез» с помощью адаптации параметров к пациенту по результатам оценки качества протезирования в лабораторных условиях. Большой цикл отражает необходимость коррекции характеристик системы «человек-протез», вызванную как возможными ошибками в малом цикле, так и возможными изменениями состояния пациента на этапе 5.

Очевидно, что циклы выбора и коррекции характеристик системы «человек-протез», как наиболее сложные и ответственные элементы процесса протезирования, должны входить в сферу «компетенции» создаваемой экспертной системой.

Исходя из выделенных этапов, архитектура разработанной экспертной системы (рис. 2) включает четыре локальные экспертные системы (ЭС) и диалоговый интерфейс, выполняющий роль монитора.

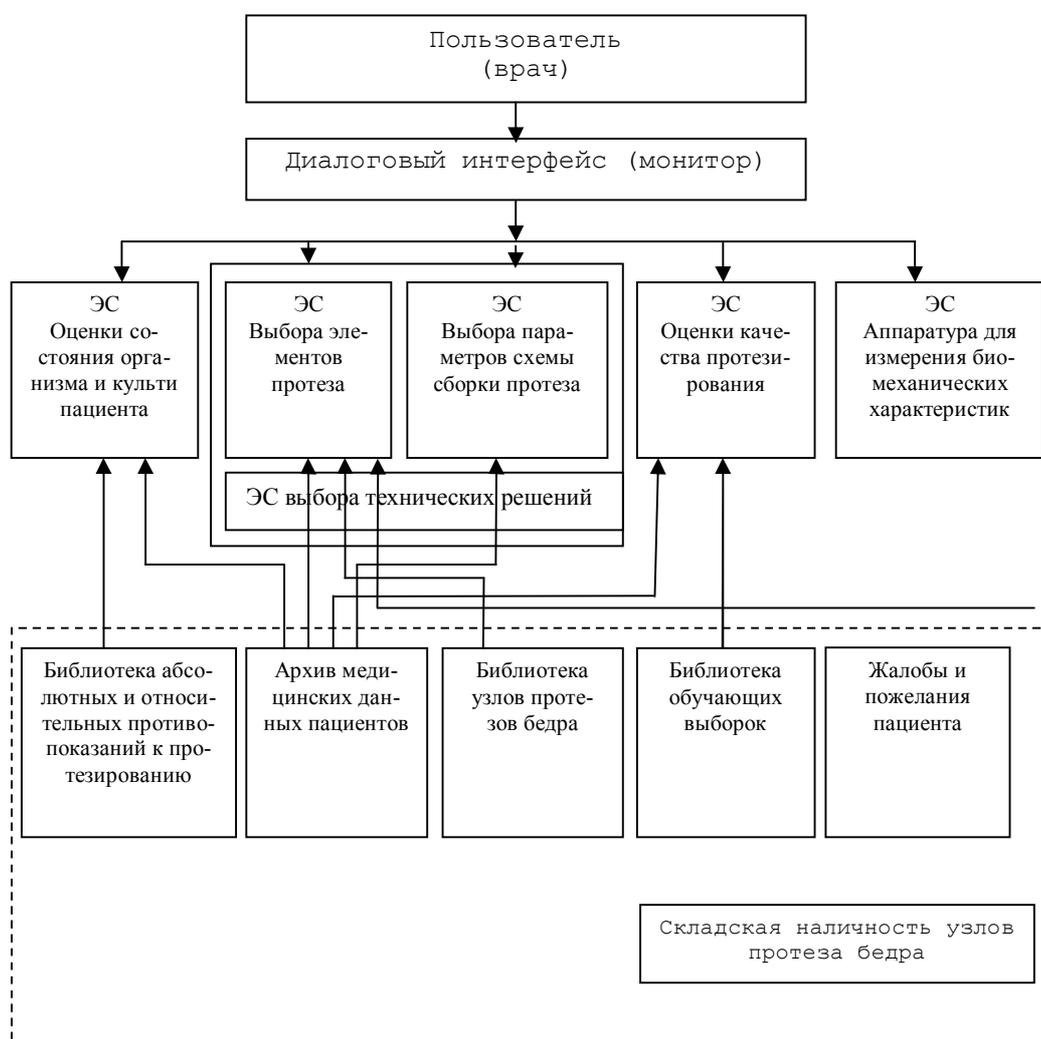


Рис. 2. Структура экспертной системы выбора узлов протеза и оценки качества протезирования с глубинным представлением знаний

При разработке системы использовался принцип агрегирования и декомпозиции структуры с целью иерархической автономности локальных ЭС.

ЭС оценки состояния организма и культуры обеспечивает автоматизированное заполнение медицинской карты и получение рекомендаций, предваряющих процесс протезирования.

ЭС выбора элементов протеза обеспечивает назначение отдельных узлов последнего с учетом индивидуальных характеристик пациента.

ЭС выбора параметров схемы сборки протеза обеспечивает выдачу рекомендаций по выбору соответствующих геометрических параметров сборки выбранных узлов как для усредненных данных, так и для процесса индивидуального протезирования.

Существенной особенностью процесса протезирования, учет которой привел к созданию ЭС нетрадиционного типа, явилось следующее. Если локальные ЭС, соответствующие первым трем этапам, обеспечивают рациональный выбор элементов протеза и параметров его схемы сборки, то четвертая ЭС обеспечивает оценку качества функционирования системы «человек-протез». При этом возникает необходимость на этапе извлечения знаний учитывать индивидуальные особенности пациента, использовать субъективные оценки врача и пациента, отделять их от объективных признаков, полученных в процессе аппаратного биомеханического обследования.

Дадим краткие характеристики отдельным ЭС.

### **3.1. ЭС оценки состояния пациента**

Блок противопоказаний включает в себя следующие этапы обследования:

- проверка состояния сердечно-сосудистой системы;
- проверка состояния культы;
- проверка состояния сохранившейся конечности;
- выработка рекомендаций по режиму двигательной активности и медицинского контроля.

При этом в результате обследования выявляются противопоказания к протезированию и даются рекомендации по лечению, приводящему к улучшению тех или иных характеристик состояния пациента. Возможно выявление абсолютных и относительных противопоказаний (в ряде случаев абсолютное противопоказание в отдельный момент времени может стать относительным).

Клинические обследования по сердечно-сосудистым заболеваниям включают в себя следующие моменты:

- выявление заболеваний, в том числе с дополнительным обследованием и без дополнительного обследования. При этом выявляются абсолютные и относительные противопоказания;
- выдача рекомендаций по долечиванию;
- оценка состояния больного по ряду признаков;
- оценка функционального резерва сердечно-сосудистой системы.

Оценка противопоказаний по состоянию культы выявляет патологию по следующим пунктам:

1. состояние кровообращения культы (по данным специальных исследований);
2. пороки и болезни мягких тканей культы;
3. состояние костной части культы;
4. состояние тазобедренного сустава.

При этом по каждому пункту в виде меню выдается список возможных патологий. В зависимости от имеющегося у пациента перечня патологических отклонений и в зависимости от степени отклонений выдается соответствующая рекомендация, включающая как комплекс терапевтических и хирургических мер, так и рекомендации по подбору и использованию протеза. Противопоказания могут быть абсолютные (т. е. протезирование в данный момент противопоказано по ряду признаков, характеризующих состояние культы) и относительные (после соответствующего медицинского лечения протезирование возможно).

### 3.2. ЭС выбора узлов протеза бедра и параметров схемы сборки

На рис. 3 приведена общая схема выбора узлов протеза и определения параметров схемы сборки.

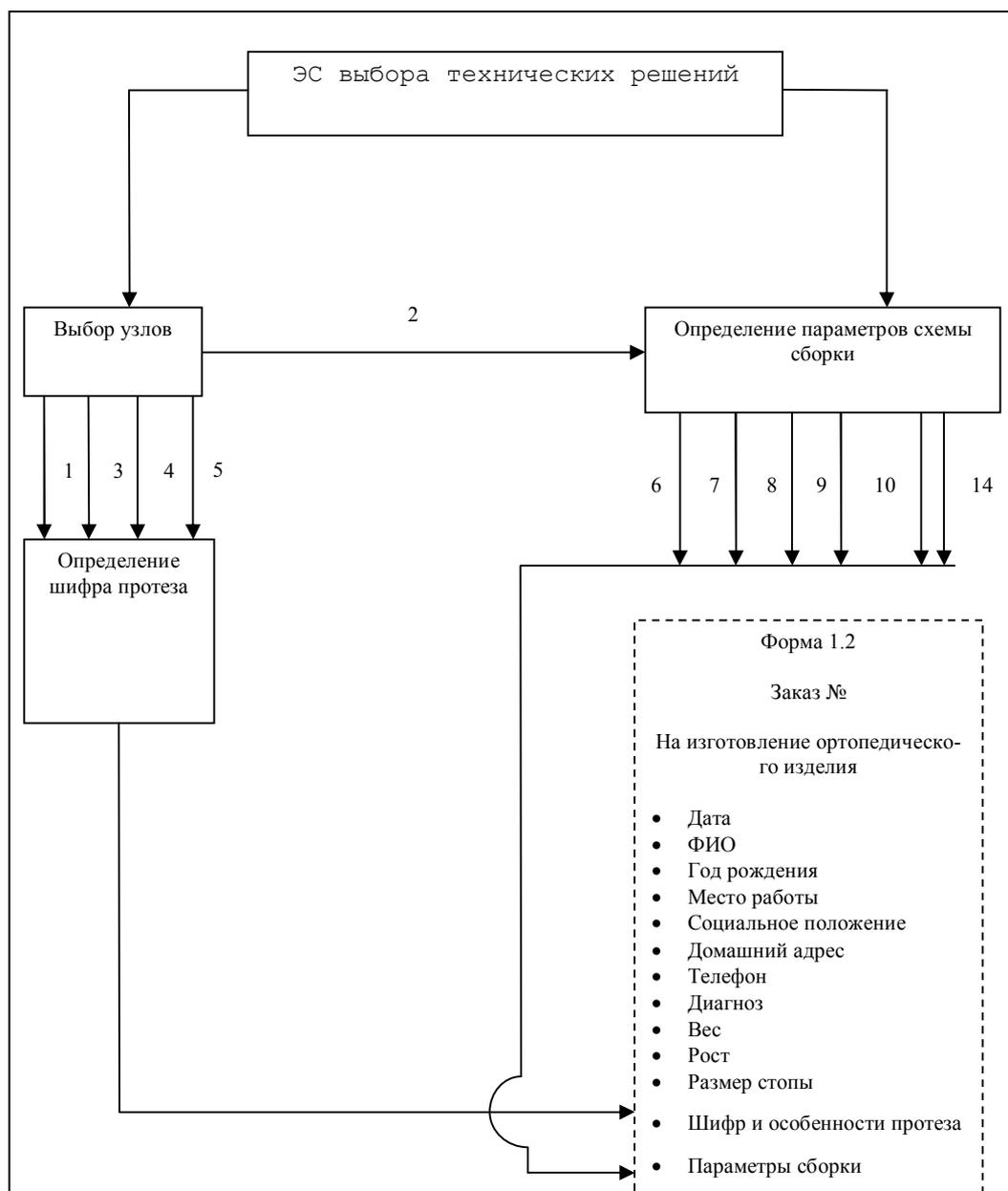


Рис. 3. Структура экспертной системы выбора узлов и схемы сборки протеза

*Примечание.* На рис. 3 введены следующие обозначения: 1 – материал приемной гильзы; 2 – тип крепления; 3 – тип коленного механизма; 4 – материал стопы; 5 – тип щиколотки; 6 – горизонтальное смещение наружу середины оси коленного сустава (КС) или коленного шарнира (КШ) относительно середины оси голеностопного шарнира (ГСШ); 7 – горизонтальное смещение наружу середины фронтального поперечника относительно вертикали, проходящей через середину осп ГСШ; 8 – горизонтальное смещение назад осп КС или КШ в саггитальной плоскости относительно оси ГСШ; 9 – горизонтальное смещение вперед центра плоского шаблона гильзы бедра в саггитальной плоскости относительно оси ГСШ; 10 – угол разворота наружу проекции оси ГСШ па горизонтальную плоскость относительно проекции оси КС или КШ на эту же плоскость; 11 – угол ротации бедра внутрь; 12 – угол наклона оси гильзы бедра по фронтальной плоскости; 13 – угол наклона оси гильзы бедра в саггитальной плоскости; 14 – разворот стопы.

Процесс назначения узлов протеза бедра состоит из следующих этапов:

1. выбора материала приемной гильзы;
2. выбора типа крепления;
3. выбора типа коленного механизма;
4. выбора материала стопы;
5. выбора типа щиколотки;
6. определения шифра протеза и шифров составляющих его узлов.

Каждый этап характеризуется четко выделенным пространством решений. Выбор каждого элемента протеза производится на основании анализа антропометрических данных пациента, собранного анамнеза, данных обследования состояния протезируемого и окружающей его среды. При этом набор входных данных может иметь неполный характер. Необходимо отметить, что на каждом этапе решается отдельная задача, а задачи взаимосвязаны таким образом, что выход одной задачи является входом для другой.

Базы знаний включают широкий набор причинно-следственных зависимостей, снабженных факторами достоверности для учета неопределенности знаний, в модели реализованы прямые продукционные цепочки рассуждений. В зависимости от заданных условий, каждый раз формируются новые наборы продукций, позволяющие производить выдвижение гипотез.

Модель диалога предназначена для неподготовленного пользователя, имеет иерархическую структуру и включает защиту от синтаксических ошибок. Вариант работы системы в качестве обучающей включает набор пояснений по ходу принятия решений. Во время сеанса решения задачи последовательное привлечение новых сведений позволяет сужать пространство возможных гипотез, выявлять наиболее перспективные решения и отсекалть маловероятные.

Процесс консультации пользователя с системой включает в себя:

1. выбор цели, подцели;
2. пояснения по выбору цели;
3. запрос текущих данных;
4. поиск решений в базе знаний;
5. выдвижение системой наиболее предпочтительных решений;
6. выдача результатов пользователю;
7. получение пояснений по использованию полученных рекомендаций;
8. запрос дополнительных условий выполнимости рекомендаций;
9. окончательное принятие врачом наиболее предпочтительного решения;
10. запись в базу данных результатов:
  - значения параметров пациента;
  - результаты работы системы;
  - решение врача.

Структура базы знаний системы приведена на рис. 4.



Рис. 4. Структура базы знаний экспертной системы

Внемашинная и внутримашинная информационная поддержка разработки включает:

1. формирование структуры «сведения – гипотезы» в виде «черного ящика»;
2. матрицы, предъявляемые эксперту, для установления достоверностей причинно-следственных зависимостей;
3. входные, промежуточные и выходные документы;
4. совокупность баз данных.

Определение параметров схемы сборки сводится к нахождению взаимного расположения выбранных узлов протеза относительно друг друга и опорно-двигательного аппарата инвалида.

### 3.3. ЭС контроля качества протезирования

ЭС контроля (оценки) качества протезирования (ЭСОКП) предназначена для выявления дефектов протезирования инвалидов при односторонней ампутации бедра (рис. 5) путем автоматизированного логического вывода, опирающегося на базы знаний экспертов, наблюдения врача, жалобы пациента, и стендовые испытания. ЭСОКП позволяет определить наличие и степень выраженности (в шкале [0 – 10]) порядка 100 дефектов протезирования, но примерно такому же количеству нечетко задаваемых признаков.

Основой (первой) базой знаний ЭСОКП является база знаний врача-протезиста, связывающая нечеткими отношениями дефекты протезирования (противопоказания к протезированию, ошибки выбора узлов протеза, ошибки построения схемы сборки) с признаками дефектов (жалобы пациентов, визуальные наблюдения врача-протезиста).

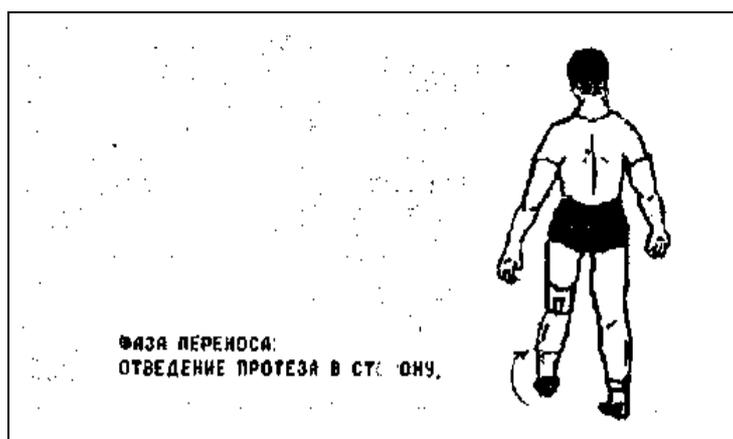


Рис. 5. Примеры графической поддержки экспертной системы оценки качества протезирования:  
а – признак дефекта «фаза переноса: отведение протеза в сторону»



Рис. 5. Примеры графической поддержки экспертной системы оценки качества протезирования:  
б – признак дефекта «наклон туловища в сторону протеза при ходьбе»

ЭСОКП обеспечивает логическую, целевую и графическую поддержки.

*Логическая поддержка.* По заданному набору признаков определяет наиболее достоверный дефект (группу дефектов). Процедура вывода базируется на нечеткой логике и позволяет работать с широким диапазоном изменения признаков. Логический вывод направлен на объяснение каждого конкретного признака и обладает высокой степенью чувствительности к степени его выраженности.

Величина истинности диагноза принимает значения в интервале [0 – 100], показывая насколько точно заданным набор признаков характеризует полученное множество решений. Реализованная процедура логического вывода позволяет производить диагностирование в условиях неопределенности, когда ряд признаков не определен (рис. 6). При полной неопределенности признака пользователь задает его значение интервалом [0 – 10], тем самым исключая его из рассмотрения.

<i>N</i>	<i>Названия аномалий</i>
1	свободная приемная гильза
2	недостаточная жесткость переднего отдела стопы
3	недостаточно эффективное крепление протеза
4	длина протеза увеличена

<i>N</i>	<i>Названия признаков</i>
1	ФО на сохр. конечность: в области основного минимума имеются дополнительные (частные) экстремумы
2	точка основного мин. смещена относительно середины
3	ФО на сохр. конечность: дополнительный экстремум после прохождения основного минимума функции
4	ФО на протез: отсутствует тах соотв. заднему толчку
5	ФП: амплитуда ТБУ чрезмерно увеличена
6	на графике ГСУ при переходе от тах подошвенного к тыльному крутизна графика чрезмерно велика по сравнению с тем же фрагментом на сохр. конечности
7	Форма ГСУ сохр. конечности меняется от шага к шагу
8	ФО на сохр. конечность: Форма ГСУ имеет дополнительное тыльное сгибание (эффект «подпрыгивания»)
9	вариативность ФП протеза более 40-50 мс
10	увеличен интервал двойной опоры, протез сзади

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5-10				5-10					5-10
2				5-10		5-10				5-10
3	5-10	5-10			5-10		5-10		5-10	
4			5-10					5-10		

Рис. 6. Фрагмент содержания базы знаний стендовых испытаний:

*ГСУ – голенистоопный узел; ФО – фаза опоры; ФП – фаза переноса; ТБУ – тазобедренный сустав*

Как отмечалось выше, в системе реализован как прямой, так и обратный выводы. При обратном выводе на исходном наборе признаков пользователь может проверить гипотезу о наличии того или

иногo дефекта протезирования или их совокупности. Система либо подтверждает выдвинутую гипотезу, либо ее отвергает.

*Целевая поддержка.* По каждому дефекту имеется перечень мероприятий, которые необходимо осуществить с целью устранения дефекта (рис. 7).

*Прямой вывод*

N	Наблюдаемые признаки	Значение	
1	Увеличение ширины шага	7	10
2	Подгибание в коленном суставе здоровой ноги	7	10
3	Наклон туловища в сторону протеза при ходьбе	3	7
4	Перекоc таза в сторону культы	7	10
5	ФП: резкое выбрасывание голени протеза	5	7
6	Расстояние между срединной линией и КУ увеличено	5	7
7	ФО: прокручивание на пятке	3	7
8	ФП: захлестывание голени внутрь	2	4

*Прямой вывод*

N	Ожидаемые дефекты	MIN	MAX
1	Некомпенсируемая отводная контрактура	0	10
2	Недостаточная длина протеза	5	10
3	Излишняя горизонтальная дивергенция узла «колeно-голень»	0	10
4	Сильно затянута ГОУ	0	10
5	Нерациональный выбор КУ при культе на уровне средней трети бедра	0	10
6	Жесткий каблук и подошва обуви	0	10

*Обратный вывод*

N	Ожидаемые дефекты	MIN	MAX
1	Недостаточная длина протеза	4	10
2	Излишняя горизонтальная дивергенция узла «колeно-голень»	4	10
3	Сильно затянута ГОУ	2	10

*Рис. 7 Пример работы диагностической экспертной системы:*

*а – диагностика дефектов по наблюдению врача*

*Графическая поддержка.* Для наглядности и распознавания ряд признаков сопровождается графической интерпретацией (рис. 5).

Вторая база знаний ЭСОКП является базой знаний врача – протезиста и инженера, опирающаяся на нечеткие отношения связи между дефектами протезирования и их признаками, полученные по результатам стендовых испытаний. Эта база объективна лишь в части получения результатов испытаний (кривые, сигналы светодиодов и т. д.), но как и предыдущая база, субъективна в части интерпретации результатов испытаний (связь между наблюдаемыми признаками и дефектами).

На рис. 6 приведен пример фрагмента базы знаний.

Результаты стендовых испытаний должны быть согласованы с основной базой (базой врача).

Как отмечалось выше, все дефекты протезирования можно условно разбить на три основные группы:

- противопоказания к протезированию;
- дефекты выбора, настройки узлов и их использования;
- дефекты схемы сборки: неправильный выбор параметров узлов.

*Прямой вывод*

Наблюдаемые признаки	Значения
ФО на сохр. конечность: в области основного min имеются дополнительные (частные) экстремумы	
ФП: амплитуда ТБУ чрезмерно увеличена	
Вариативность ФП протеза более 40-50мо	

Ожидаемые аномалии	MIN	MAX
Свободная приемная гильза	5	10

*Прямой вывод*

Наблюдаемые признаки	Значения
ФО на протез: отсутствует max соотв. Заднему толчку	
На графике ГСУ, при переходе от max подошвенного сгибания к тыльному, крутизна графика чрезмерно велика по сравнению с тем же фрагментом на сохранившейся конечности	
Увеличен интервал двойной опоры, протез сзади	

Ожидаемые аномалии	MIN	MAX
Недостаточная жесткость переднего отдела стопы	5	10

Рис. 7. Пример работы диагностической экспертной системы:

*б – диагностика дефектов с учетом биомеханических характеристик ходьбы пациента*

Каковы бы ни были выявленные дефекты, окончательное решение по их устранению принимает врач. Если его решение не согласуется с решениями, предложенными ЭСОКП, он должен объяснять свои действия с целью возможной корректировки базы знаний.

Сложность диагностирования качества протезирования заключается в том, что различные дефекты протезирования выражаются достаточно ограниченным набором признаков; ряд признаков характерен для большой совокупности дефектов; наложение признаков искажает реальную картину диагностирования; изменение рисунка ходьбы сильно зависит от индивидуальных особенностей пациента (от его походки до травмы, возраста, особенностей фигуры и т. д.). Следствием этого является тот факт, что проявление одного и того же дефекта протезирования может иметь существенные отличия у разных пациентов. Это приводит к тому, что при подготовке базы знаний вводится значительная избыточность признаков для обеспечения устойчивости принимаемого системой решения.

Для удобства пользования системой все признаки разделены на 9 основных групп: болевые ощущения; органика; изменение шага; рисунок ходьбы; перенос протеза; стопа; коленный шарнир; приемная гильза; дополнительные признаки. Все признаки информативны в том смысле, что явно наблюдаемый признак всегда вызван каким-либо присутствующим дефектом.

На рис. 7 приведен пример работы данной ЭС по результатам стендовых испытаний и наблюдений врача в свободном формате представления знаний.

#### 4. Программное обеспечение гибридной ЭС

Как программный продукт система представляет собой интегрированный пакет прикладных программ, реализующий все функции системы.

Использование модульного принципа построения программного комплекса позволило добиться его достаточной гибкости. В целом пакет отражает общую функциональную структуру системы и схему информационных потоков. Каждый уровень реализован как самостоятельный модуль, но связующим звеном является «История протеза» – понятие используемое в практике протезирования (рис. 8).

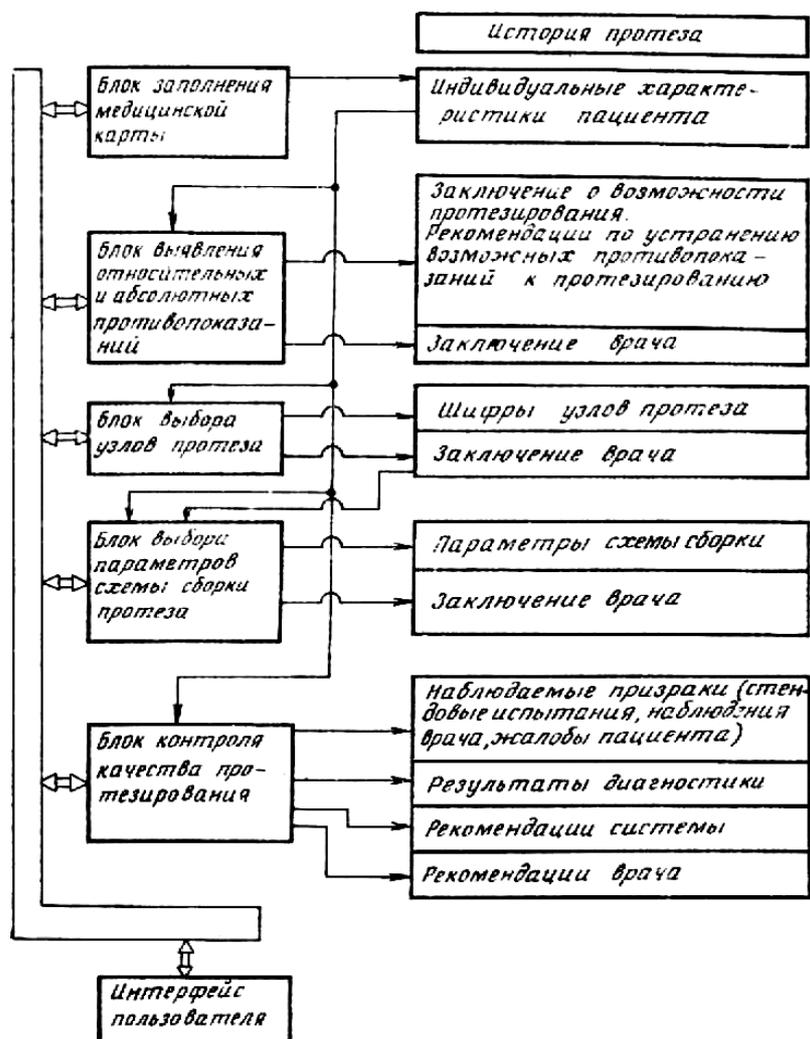


Рис. 8. Функциональная структура информационных потоков в блоке «История протеза»

Создание ее для каждого пациента начинается с заполнения «Медицинской карты» и продолжается по мере прохождения определенных этапов протезирования (см. рис. 7). «История протеза» представляет особую важность и как документ, и как источник входной информации для блоков системы (рис. 9). При этом информация передается как в прямом так и в обратном направлении. В частности, данные о результатах анализа контроля качества протезирования могут быть использованы на вышестоящих уровнях.

**МЕДИЦИНСКАЯ КАРТА**

Дата проведения обследования: 10.10.90  
 Номер истории болезни: 173  
 Фамилия, имя, отчество: Н  
 Абсолютные противопоказания:  
**АБСОЛЮТНЫХ ПРОТИВОПОКАЗАНИЙ НЕ ВЫЯВЛЕНО**  
 Относительные противопоказания:  
**ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПРОТИВОПОКАЗАНИЙ НЕ ВЫЯВЛЕНО**  
 Пол: мужской  
 Возраст: 20  
 Масса протезируемого: 65  
 Вид телосложения: нормостеническое  
 Размер стопы: 27  
 Место жительства: город  
 Социальное положение: учащийся  
 Отношение к алкоголю: трезвенник

<p>Состояние интеллекта: интеллект в норме          Образ жизни: активный          Диабет: отсутствует          Заболевания периферических сосудов: отсутствуют          Трофические расстройства культы: отсутствуют          Кожные заболевания: отсутствуют          Повышенная потливость культы: отсутствует          Заболевания органов брюшной полости: отсутствуют          Нарушения органов чувств и координации: нет нарушений          Длина культы: культы бедра в верхней трети          Тип культы: мышечный          Наличие атрофии культы: отсутствует          Форма культы: умеренно-коническая          Периметр(окружность) культы: норма          Состояние мышц культы: мышцы с умеренной атрофией          Состояние подкожно-жировой клетчатки:          умеренно-выраженный жировой слой          Состояние кожных покровов культы: кожные покровы в норме          Контрактура в тазобедренном суставе: отсутствует          Состояние костного опиала: гладкий          Состояние мягких тканей в области костного опиала:          безболезненные          Тургор кожи: норме          Локальные ороговения (омозолелость, гиперкератоз) отсутствуют          Потертости кожи: отсутствуют          Наличие на культе патологических признаков:          патологические признаки отсутствуют          Повышенная волосистость: наблюдается</p>
---

*Рис. 9. Выходной документ и результат работы экспертной системы:*

*а – медицинская карта*

<p style="text-align: center;"><b>ПРО Т И В О П О К А З А Н И Я ( к у л ь т я )</b></p> <p>Выявленные дефекты культы, препятствующие протезированию:          не выявлены          Рекомендации системы:          Протезирование возможно.          Заключение врача о возможности протезирования:          Согласен с рекомендациями системы</p>
---

*Рис. 9. Выходной документ и результат работы экспертной системы:*

*б – результат работы блока противопоказаний к протезированию*

Строго говоря, иерархия, представленная на рис. 8 довольно условна и зависит от того, с какого уровня начинается обследование больного. Следует иметь в виду, что во временной шкале этап контроля качества протезирования значительно сдвинут относительно других этапов, и «История протеза» позволяет не допустить потери информации.

Главное меню системы построено по принципу управляемой строки и включает следующие позиции:

- а) медицинская карта;
- б) противопоказания;
- в) выбор узлов;
- г) сборка;
- д) контроль качества;
- е) руководство по системе;

ж) печать «История протеза»;

з) выход из системы.

### **ВЫБОР УЗЛОВ**

#### *Материал приемной гильзы*

ИЗ ПОЛИЗИКА 0.729

МПЛ 0.993

ИЗ ПОЛИКАРА 0.992

ПОЛИЭТИЛЕН МАКСИМАЛЬНОЙ ГОТОВНОСТИ 1.000

ПОЛИЭТИЛЕН ПО СЛЕПКУ 0.700

НИТРОЛАК 0.999

КОЖА 0.196

ДРЕВЕСИНА 0.800

МЕТАЛЛ 0.800

СЛОИСТЫЙ ПЛАСТИК НА ПОЛИАМИДНОМ СВЯЗУЮЩЕМ 1.000

СЛОИСТЫЙ ПЛАСТИК НА ПОЛИЭФИРНОМ СВЯЗУЮЩЕМ 1.000

ГИПС 1.000

Заключение врача о материале приемной гильзы МЕТАЛЛ

#### Коленный узел:

ШАРНИР СО ВСТРОЕННЫМ КОТИРОВОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ 0.700

ПРОТЕЗ БЕЗ КОЛЕННОГО ШАРНИРА 0.145

ДВУХОСНЫЙ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ФИКСАЦИЕЙ 0.600

ОДНООСНЫЙ ЗАМКОВЫЙ К РАБОЧЕМУ ПРОТЕЗУ 0.300

НАКЛАДНЫЕ КОЛЕННЫЕ ШАРНИРЫ 0.240

ПОЛИЦЕНТРИЧЕСКИЙ 0.890

ДЕРЕВЯННЫЙ 0.440

ОДНООСНЫЙ С ЗАМКОМ 0.143

ОДНООСНЫЙ БЕЗЗАМКОВЫЙ 0.600

Заключение врача по выбору коленного узла ПОЛИЦЕНТРИЧЕСКИЙ

#### Крепление:

ПОЯСНОЕ КРЕПЛЕНИЕ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВЕРТЛУГОМ 0.100

КОМБИНИРОВАННОЕ КРЕПЛЕНИЕ 1.000

НЕСПАДАЮЩАЯ ПРИЁМНАЯ ГИЛЬЗА 1.000

ВАКУУМНОЕ КРЕПЛЕНИЕ 0.000

КРЕПЛЕНИЕ ПО АБРИНЫ 1.000

КРЕПЛЕНИЕ К ПОЛУКОРСЕТЫ 0.200

КОНСТРУКЦИЯ ШУВАЛОВА 0.900

КРЕПЛЕНИЕ К ЛИФУ 0.000

ЛОМОЧНОЕ КРЕПЛЕНИЕ 0.900

БАНДАЖНОЕ КРЕПЛЕНИЕ С ПОДДЕРЖКОЙ ИЗ ТЕСЬМЫ ИЛИ ФИТИЛЬНОЙ ПОМОЧИ 0.900

БАНДАЖНОЕ КРЕПЛЕНИЕ 0.650

ПОЯСНОЕ КРЕПЛЕНИЕ С ПЕРЕДНЕЙ ШНУРОВКОЙ И ЗАДНИМ РЕЗИНОВЫМ КЛАПАНОМ 0.800

ПОЯСНОЕ КРЕПЛЕНИЕ 0.200

Заключение врача по выбору крепления: КРЕПЛЕНИЕ ПО АБРИНУ

#### Стопа:

СТОПА БЕЗ ГОЛЕНОСТОПНОГО ШАРНИРА ТИПА «SACH» 0.856

ПРОТЕЗ БЕЗ СТОЛЫ 0.410

МЕТАЛЛОШТАМПОВАННАЯ 0.784  
 ФИЛЬЦЕВАЯ 0.380  
 РЕЗИНОВАЯ 0.616  
 ПЕНОПОЛИУРЕТАНОВАЯ 0.929  
 Заключение врача по выбору стопы: МЕТАЛЛОШТАМПОВАННАЯ  
 Щиколотка

БЕЗ ЩИКОЛОТКИ 1.000  
 МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ ЩИКОЛОТКА 0.000  
 ДЕРЕВЯННАЯ ЩИКОЛОТКА 0.000  
 Заключение врача по выбору щиколотки БЕЗ ЩИКОЛОТКИ

Параметры схемы оборки:

Рекомендации системы:

Угол огиб, установки гильзы бедра в сагит. плоскости  $a_{\text{сag}}$ (град)  
 угол наклона оси гильзы бедра во фронт. плоскости  $v_{\text{фр}}$ <град> 1  
 Разворот бедра в град 10. 5  
 Вынос бедра  $Y_2$ (мм) 7  
 Величина конвергенции  $X_2$ (мм) 35  
 Заключение врача: Согласим с рекомендациями системы

*Рис. 9. Выходной документ и результат работы экспертной системы:*

*в – пример выбранных узлов протеза*

### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

*Протезирование вторичное.*

Параметры используемого протеза:

материал приемной гильзы – металл) крепление – поясное)  
 коленный шарнир (КШ) – одноосный беззамковый; стопа – пенополиуритановая; щиколотка - металлическая.

Наблюдаемые признаки:

РЕКОМЕНДАЦИИ: при недостаточной длине протеза необходимо проверить посадку культи в протезе. При условии нормальной посадки необходимо определить за счет какого сегмента укорочен протез. Удлинить протез за счет голени или бедра или обоих сегментов, нерациональный КШ на уровне средней трети бедра

РЕКОМЕНДАЦИИ: сменить КШ на беззамковый и переобучить больного ходьбе на беззамковом протезе.

Достоверность диагноза: 80%.

Заключение врача:

Согласен с рекомендациями системы

*Рис. 9. Выходной документ и результат работы экспертной системы:*

*г – результат работы блока контроля качества протезирования*

Система реализована в двух вариантах: профессиональном и учебном. Последний отличается наличием большого объема подсказок, объяснений и толкований как по работе в системе, так и из области медицины и протезирования. К примеру, в учебной версии предусмотрен вывод в «специальном окне» аннотаций к каждой строке главного меню, которые отображаются по мере активизации той или иной строки.

В систему также включен ряд сервисных функций – создание и редактирование баз знаний, вывод на печать, многооконный интерфейс.

Для функционирования системы необходимы следующие аппаратные средства:

- персональная ЭВМ, совместимая с IBM PC XT/AT с оперативной памятью не менее 640 Кбайт;
- графический адаптер CGA, EGA, VGA;
- принтер типа Epson FX-800 (FX-1000);
- цветной дисплей.

ЭС функционирует под управлением операционной системы MSDOS (версия 3.3).

На рис. 9 приведен пример работы ЭС: обследование конкретного пациента.

## **Заключение**

В статье предложена архитектура оболочки гибридной экспертной системы с глубинным представлением знания для проектирования, диагностики и доводки биотехнических изделий. На основе предложенной архитектуры ЭС была создана достаточно сложная прикладная медицинская ЭС выбора узлов и построения протеза и оценки качества протезирования. Тем самым реализован новый подход к проектированию биотехнических изделий, в основе которого лежит всесторонняя поддержка процесса проектирования биотехнических изделий экспертной системой, что позволяет оптимизировать этот процесс с точки зрения экономии времени изготовления и повышения качества изделий.

## **Список литературы**

1. Амирова Э. К., Лунина Н. В., Слепченко А. Н. и др. Гибридная экспертная система для проектирования, диагностики и доводки биотехнических изделий // Тез. докл. Всесоюз. конф.: Создание и применение гибридных экспертных систем. – Рига: РТУ, 1990.
2. Sticken J., Chandrasekaran B. Integrating classification – based compiled level reasoning with function-based deep level reasoning // Appl. Art. Intell, 1989. – Vol. 3. – № 2-3.
3. Keravhou E. T., Washbrook J. What is a deep expert system? An analysis of the architecture requirements of second generation expert systems // The Knowledge Eng. Rev. 1989. – Vol. 4. – № 3.
4. Dermoy J. L. Methodologie pour des systems experts de second generation // Bull. Dir. Etud. Et. Rech. C., 1989. – № 4.
5. Van de Velde W. A conceptual architecture for second generation expert system // IMACS Ann. Comput. and Appl. Math., 1989. – Vol. 2. – № 1-4.
6. C. Steels L. The deepening of expert systems // IMACS Ann. Comput. and Appl. Math. – Vol. 2. – № 1-4.
7. Price C., Lee M. Why do expert systems need deep knowledge // Proc. 12th IMACS World Congr. Sci. Comput. Villeneuve d'Asq., 1988. – Vol. 4.
8. Yang X. The challenge to knowledge engineering: key issue in the second generation expert systems // Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man and Cybern. – N. Y.: 1988. – Vol. 2.
9. Buckley J. I., Tucker D. M. Second generation fuzzy expert system // Fuzzy Sets and Systems: 1989. – Vol. 31. – № 3.
10. Ng K.-C., Abrahamson B. Uncertainty management in expert systems // IEEE Expert: 1990. – Vol. 5. – № 2.
11. Алиев Р. А., Захарова Э. К., Ульянов С. В. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные промышленные системы // Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1991. – Т. 32.
12. Ульянов С. В. Нечеткие модели интеллектуальных систем управления: теоретические и прикладные аспекты // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, 1991. – № 3.
13. Алиев Р. А., Гулько Д. Е., Шахназаров М. М. Экспертная система для производственного планирования // Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, 1988. – № 5.
14. Аверкин А. Н., Батыршин Р. З., Блишун А. Ф. и др. Теория нечетких множеств в процессах управления искусственным интеллектом // Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.

15. Слепченко А.П., Лунина Н. В., Шапиро М. Ю. Экспертная система диагностики FOCUS // Тр. II Всесоюзн. конф. Искусственный интеллект – 90. – Минск: ВЦ АН СССР, 1990.
16. Marujata Y., Takahashi H. Application of fuzzy reasoning to failure diagnosis // J. Atom. Energy Soc. Jap, 1985. – Vol. 27. – № 9.
17. Bocklish S. T. A diagnosis system based on fuzzy classification // Comput. in Industry, 1986. – Vol. 7. – № 1.
18. Novak T., Meigs I. B., Sanjord R. L. Development of an expert system for diagnosing component level failures in a shuttle car // IEEE Trans. Ind. Appl, 1989. – Vol. 25. – № 4.
19. Ishibushi I., Ichihashi H., Tanaka H. Set-cover theoretical diagnosis based on fuzzy symptoms // Syst. Contr. and Inf, 1989. – Vol. 33. – № 2.
20. Pis P., Mesiar R. Fuzzy model of inexact reasoning in medicine // Comput. Meth. and Progr. in Biomedicine, 1989. – Vol. 30. – № 1.