

На правах рукописи

Маренко Валентина Афанасьевна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ  
ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Маренко*

Тюмень – 2004

Работа выполнена в Тюменском государственном университете

Научный руководитель: доктор технических наук,  
доцент Глухих Игорь Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Гуц Александр Константинович;  
кандидат технических наук,  
профессор Зыков Владислав Владимирович

Ведущая организация: Омский государственный университет

Защита состоится 2 марта 2004 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании  
диссертационного совета К 212.274.01 при Тюменском государственном  
университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15а, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского  
государственного университета

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета *Бутакова* Бутакова Н.Н.

## **Актуальность работы.**

Моделирование как процесс углубления познания – одно из средств отображения явлений и процессов реального мира, полнее раскрывающий их сущность, базируется как на строгих научных теориях, принципах и методах, так и на интуиции и эвристиках – алгоритмах творчества. Анализ методов и средств моделирования сложных объектов приводит к выводу, что с расширением возможностей реализации моделей существенно расширяется и спектр задач, решаемых методами моделирования, которым присуща проблема принятия решений. Методы моделирования широко применяются при решении различных технических задач, актуальной из которых является обеспечение электромагнитной совместимости радиосистем. В настоящее время плотность различных электромагнитных излучений практически во всех используемых диапазонах частот настолько увеличилась, что, несмотря на все попытки регламентации радиослужб, проводимые международными и национальными организациями, уровень помех во многих случаях оказывается настолько интенсивным, что заметно ухудшает качественные показатели радиосистем.

Обеспечение электромагнитной совместимости представляет собой сложную задачу, для решения которой не существует универсальных приемов. Решение таких задач требует не только знаний радиотехники, теории электрических цепей, теории распространения радиоволн, которыми в большей степени обладают наиболее опытные специалисты, но и знаний, основанных на интуиции и многолетнем опыте. Таким образом, задачи управления процессом обеспечения электромагнитной совместимости во многом являются творческими, базируются на эмпирическом опыте специалистов, а эффективность результатов во многом определяется наличием этих знаний и опыта у специалистов.

В современном обществе наблюдается общая тенденция – нехватка высококвалифицированных кадров в связи с оттоком их из научно-исследовательских учреждений, повышение требований к интенсивности и качеству производства, конкуренция на данном секторе рынка. Все это обуславливает актуальность компьютерных систем поддержки решения профессиональных задач по электромагнитной совместимости. Применяемые в данной области методы и средства моделирования не отвечают в полной мере задачам воспроизводства реального человеческого опыта и знаний специалистов-практиков. В то же время исследования в области искусственного интеллекта и экспертных систем в частности показали эффективность применения для таких случаев интеллектуальных систем поддержки принятия решений, основанных на экспертных знаниях. Известны теоретические работы и практические внедрения в этой области научных коллективов под руководством таких известных отечественных и зарубежных ученых, как Маслов С.Ю., Поспелов Д.А., Загоруйко Н.Г., Переверзев-Орлов В.С., Уотермен Д. и других. Однако в области обеспечения электромагнитной совместимости задача разработки и

промышленного применения интеллектуальных систем поддержки принятия решений остается нерешенной. Актуальность задач, связанных с разработкой и внедрением таких систем определило те цели и задачи, которые исследуются в диссертационной работе.

**Целью работы** является создание моделей и алгоритмов экспертных систем поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости, обеспечивающих научно-практическую базу для имитационного моделирования и исследования проблемной области, процессов принятия решений, а также разработки программных систем поддержки профессиональной деятельности в этой области знаний.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решены следующие основные задачи:

- проведен анализ возможностей использования моделей представления знаний для задач электромагнитной совместимости, и сформулированы принципы построения экспертных систем для их реализации;
- разработана обобщенная и нечеткая модели предметной области и алгоритм вывода решений;
- разработан комплекс моделей и алгоритмов: для имитации процессов решения профессиональных задач, модель пользователя экспертной системы, модель и алгоритм обучения пользователя экспертной системы;
- разработана и внедрена в опытную эксплуатацию первая версия программного обеспечения экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости.

**Научная новизна** проделанной работы заключается в том, что разработаны принципы построения экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости. Разработаны модели и алгоритмы для имитации процессов решения профессиональных задач и исследования объектов предметной области «Электромагнитная совместимость».

**Практическая ценность.** Первая версия разработанной экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости «КС ЭМС» передана в опытную эксплуатацию в Омский НИИ приборостроения, экспертная составляющая базы знаний которой наращивается введением знаний, получаемых во взаимодействии со специалистами в области радиоэлектроники. Такой набор знаний станет сводом квалифицированных мнений и постоянно обновляющимся справочником наилучших стратегий и методов решений вопросов обеспечения электромагнитной совместимости. Ведущие специалисты уходят, но их опыт должен сохраняться и активно использоваться. Связывая модели, отражающие особенности рассуждений экспертов при решении профессиональных задач, с обширной специфической информацией, экспертная система поддержки принятия решений повышает ценность и доступность экспертных знаний.

Способ оценки уровня индивидуальных знаний, разработанный при формировании модели пользователя экспертной системы, используется в учебном процессе Омского государственного педагогического университета.

По результатам проделанной работы получены три акта внедрения.

**Методы исследований.** В работе использованы методы моделирования, оптимизации, инженерии знаний, когнитивной психологии, теории нечетких множеств и принятия решений.

**Апробация работы.** Основные положения работы апробированы на международных научно-практических конференциях «Математическое моделирование в образовании, науке и производстве» (Тирасполь, 2001, 2003, ТГТУ); межрегиональном информационном конгрессе «МИК-2001» (Омск, 2001, Адм. Омской обл.); второй Российской конференции «Естественные науки в военном деле» (Омск, 2001, ОТИИ); на научно-технической конференции «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии» (Вологда, 2001, ВоГТУ); II всероссийской ФАМ конференции по финансово-актуарной математике и смежным вопросам (Красноярск, 2003, КГУ); городской научно-методической конференции «Совершенствование форм и методов управления качеством учебного процесса» (Омск, 2002, ОмГТУ); семинарах и ежегодной научной сессии (Омск, 2001, 2002, 2003, ОФ ИМ СО РАН); IV международной конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2002, ОмГТУ); международных конференциях: «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Усть-Каменогорск, 2003, ВКГУ); «Современные проблемы физики и высокие технологии» (Томск, 2003, ТГУ); «Новые информационные технологии в нефтегазовой промышленности и энергетике» (Тюмень, 2003, ТюмГНГУ).

По теме диссертации опубликованы 21 научная работа, часть из которых выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 01-01-00303, 01-07-90003).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

Принципы построения экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости.

Обобщенная и нечеткая модели предметной области и алгоритм вывода решений.

Комплекс моделей и алгоритмов:

- для имитации процессов решения профессиональных задач;
- пользователя экспертной системы;
- обучения пользователя экспертной системы.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 102 наименований и 11 приложений. Объем основного текста составляет 130 страниц машинописного текста.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность разработки компьютерных систем поддержки принятия решений профессиональных задач, так как общей тенденцией в современных условиях является отток квалифицированных специалистов из научно-исследовательских учреждений и предприятий в более престижные отрасли экономики. Во введении формулируется также цель исследования и конкретные задачи, направленные на ее реализацию, указываются методы исследования.

В **первой главе** дается анализ методов и подходов моделирования в системах поддержки принятия решений. Рассматриваются способы обеспечения электромагнитной совместимости. Исследуются возможности использования моделей представления знаний. Формулируются принципы построения экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости.

На сегодняшний день в теории принятия решений широко известны следующие методы: теории полезности, проспектов, ELECTRE, анализа иерархий и эвристические методы. К задачам с субъективно оцениваемыми решениями относятся задачи, для которых объективная оценка результата решения заменяется экспертными оценками, основанными на эвристических предпочтениях. Эвристические знания реализуются в экспертных системах – компьютерных системах поддержки принятия решений, в которых применяется метод интеллектуального анализа данных, заключающийся в применении алгоритмов обработки информации с целью выявления скрытых тенденций, закономерностей, взаимосвязей процессов, учет которых помогает повысить качество принимаемых решений.

Работа экспертных систем основана на знаниях, хранимых в памяти системы, что требует создания специальных средств представления знаний и манипулирования ими. В экспертной системе *BDS*, разработанной в США для диагностики неисправностей в радиосистемах, знания представлены продукциями. В экспертной системе по электромагнитной совместимости *Консультант*, созданной в НИИ Министерства Обороны РФ, используемой для заполнения заявок на выделение радиочастоты, - модулями. Дальнейшая разработка моделей и алгоритмов экспертных систем поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости, представленных в диссертации, базируется на следующих основных принципах: имитация процессов решения профессиональных задач, системность деятельности специалиста, применение правдоподобных рассуждений, выдача альтернативных рекомендаций, модульность построения.

**Вторая глава** посвящена вопросам построения обобщенной модели знаний предметной области «Электромагнитная совместимость». В ней приводятся предлагаемые автором подходы и алгоритмы, разработанные для исследования объектов предметной области с использованием нечеткой

логики, отличающиеся от общеизвестных аналитических и экспериментальных методов.

Для представления знаний в экспертной системе поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости разработана обобщенная модель предметной области - сетевая конструкция, задаваемая в виде

$$C = \langle X; R_1, \dots, R_i; G \rangle, i = \overline{1, n}$$

где  $X$  – множество объектов предметной области;

$R_1, \dots, R_i$  – множество типов связей между ними;

$G$  – отображение, задающее связи между объектами, входящими в  $X$ , из заданного набора типов связей.

Путем экспертного опроса и анализа научно-исследовательских материалов сформирован словарь предметной области - выделены основные объекты, которыми оперируют специалисты, такие как «радиосистема», «радиосигнал», «электромагнитная обстановка» и другие.

При анализе *электромагнитной обстановки* необходимо, в числе прочего, оценивать степени загрузки отдельных частотных диапазонов, так как при одновременной работе в некоторой области пространства большого числа радиосистем из-за ограниченного числа радиоканалов непреднамеренные электромагнитные помехи приемникам будут создаваться излучениями передатчиков, работающих на совпадающих частотах. Для уменьшения помех между ними большое значение имеет такое перераспределение частотного спектра в пространстве, при котором сведены к минимуму нежелательные пересечения частот.

Для оценки степени загрузки частотного канала применены методы нечеткой логики и нечеткие множества. Введем лингвистические переменные  $\rho$  – «плотность загрузки частотного канала» и  $\tau$  – «длительность загрузки частотного канала» с терм-множествами значений  $T_\rho$  и  $T_\tau$  соответственно:

$$T_\tau = T_\rho = \{ \text{«малая»}, \text{«средняя»} \text{ и } \text{«большая»} \} \text{ (рис. 1).}$$

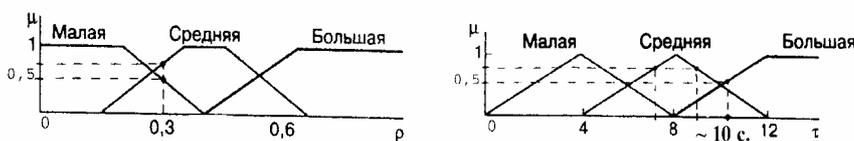


Рис. 1. «Плотность» и «длительность» загрузки частотного канала

Анализ электромагнитной обстановки предлагается проводить по правилам, формируемым на основе экспертного опроса:

- 1) при «малой» плотности загрузки частотного канала длительность загрузки частотного канала может быть «большой»;
- 2) «средней» плотности соответствует «средняя» длительность;

3) в случае «большой» плотности требуется «малая» длительность загрузки частотного канала.

Как видно из рис. 1, области определения входных функций принадлежности различных термов пересекаются, поэтому входная нечеткая инструкция будет представляться некоторой комбинацией приведенных правил. Пусть зафиксировано значение «плотности» загрузки частотного канала равное 0,3. Из рис. 1 видно, что эта плотность с функцией принадлежности 0,5 принадлежит терму «малая» плотность и – 0,75 – терму «средняя» плотность. Согласно правилам, «длительность» загрузки частотного канала может быть на 0,5 «большой» и на 0,75 «средней». «Большая» длительность –  $\tau$  для плотности загрузки  $\rho=0,3$ , согласно правилам, «около 10 сек».

Нечеткая база знаний представляется в виде:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} [\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^{jp})] \rightarrow y = d_j; j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n},$$

где  $a_i^{jp}$  – нечеткий терм, которым оценивается значение входа  $x_i$ ; выход  $y$  оценивается нечетким термом  $d_j$ ,  $m$  – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходных данных.

Логический вывод основывается на известном алгоритме вывода в нечетких экспертных системах, формализованное обобщение которого представляется следующим образом.

1) Пусть  $\mu^{jp}(x_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$  – функция принадлежности входа  $\{x_i\}$  нечеткому терму  $a_i^{jp}$ , то есть  $a_i^{jp} = \int_{x_i}^{\bar{x}_i} \mu^{jp}(x_i) | x_i$ , где  $\int$  – совокупность пар элементов нечеткого подмножества;

2)  $\mu^{dj}(y)$  – функция принадлежности выхода  $y$  нечеткому терму  $d_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  
 $d_j = \int_y^{\bar{y}} \mu^{dj}(y) | y$ ;

3) степень принадлежности входа  $\{x_i\}$  нечеткому терму  $d_j$  из базы знаний определяется следующей системой нечетких логических уравнений:

$$\mu^{dj}(x_i) = \bigvee_{p=1, k_j} \bigwedge_{i=1, n} (\mu^{jp}(x_i)); j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}.$$

4) нечеткое подмножество  $\tilde{y}$ , соответствующее входу  $\{x_i\}$ , определяется как

$$\tilde{y} = \bigcup_{j=1, m} \int_y^{\bar{y}} \min(\mu^{dj}(x_i), \mu^{dj}(y)) | y,$$

где  $\bigcup$  – операция объединения нечетких подмножеств;

5) четкое значение выхода –  $y$ , соответствующее входу  $\{x_i\}$  определяется в результате дефазификации нечеткого  $\tilde{y}$  методом медианы:

$$a = \frac{\sum_{x_i \in G} (x_i \cdot \mu_{\tilde{y}}(x_i))}{|G|},$$

где  $G$  – мощность нечеткого подмножества.

В соответствии с алгоритмом база знаний представлена в виде таблиц, где в качестве столбцов присутствуют базовые значения лингвистических переменных «плотность загрузки частотного канала», «длительность загрузки частотного канала» и их модификации, образованные логическими связками «и», «или».

В целях представления и использования коллективных знаний база знаний сформирована путем опроса нескольких экспертов. Для объединения индивидуальных суждений в коллективное применяется нечеткое отношение «между», значения которого представляются некоторым интервалом значений, находящимся на отрезке  $[0, 1]$ . В работе нечеткое отношение  $\tilde{R}$  используется для нахождения суждения, лежащего одновременно между всеми суждениями экспертов. В общем случае суждение  $\tilde{R}$  лежит между суждениями  $R_1, R_2, \dots, R_k$ , если  $\bigcap_{i=1}^k R_i \subseteq \tilde{R} \subseteq \bigcup_{i=1}^k R_i$ . Понятие «между» в пространстве предпочтений представляет собой формализацию условия Парето для принципа согласования отношений индивидуального предпочтения: «если все индивидуумы предпочитают объект  $a$  объекту  $b$ , то и в групповом отношении объект  $a$  должен быть предпочтительнее  $b$ ». Нечеткое отношение «между» предлагается использовать как механизм объединения индивидуальных суждений в коллективное.

В третьей главе разрабатывается и анализируется модель действий эксперта при решении задачи обеспечения электромагнитной совместимости радиосистемы – приемо-передающего антенного центра, размещаемого на ограниченной площади. Приведен алгоритм решения – замкнутый цикл. Проведен сравнительный анализ методов выбора решений. Разработаны нечеткая модель предметной области, модель пользователя экспертной системы, модель и алгоритм обучения пользователя экспертной системы.

В рамках агрегативно-декомпозиционного подхода структура антенной системы описывается на различных уровнях детализации совокупностью графов (рис. 2), отражающих ее внутреннюю организацию, устойчивые взаимосвязи между подсистемами, распределение функций управления по элементам организационной иерархии. Проектируемый антенный центр, как сложная система, включает: передающую антенну, помещаемую в центр площадки крышевого типа, и четыре приемные антенны (рис. 2. а).

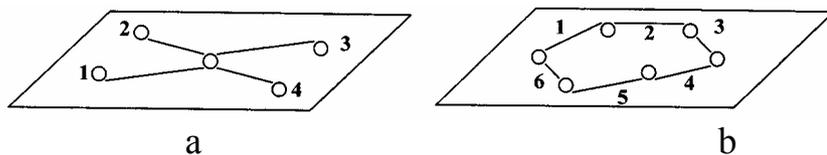


Рис. 2. Модель действий эксперта при решении профессиональной задачи а) структура антенного центра; б) алгоритм решения на графе – замкнутый цикл

Оптимизация выбора антенн для формирования структуры приемо-передающего антенного центра осуществляется следующим образом. Рассмотрим множество  $M = \{m_1, \dots, m_x\}$ , каждый элемент которого

соответствует виду антенны –  $x \in M$ , имеющему несколько характеристик, оцениваемых с помощью атрибутов

$$F_1(x), \dots, F_n(x), \text{ обозначаемых } F(x) = (F_1(x), \dots, F_n(x)).$$

Будем считать, что задана матрица

$C = c_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, s$ ;  $j = 1, \dots, n$ , у которой  $c_{ij} = F_j(m_i)$  – значение  $j$ -ой характеристики для  $i$ -го вида антенны.

Приемо-передающий антенный центр должен нормально функционировать, то есть функционировать с минимальным уровнем помех. В этом случае целевая функция системы имеет минимум. Для выбора антенн предлагается использовать метод многокритериальной оптимизации:  $F(x) \rightarrow \min, x \in M$ .

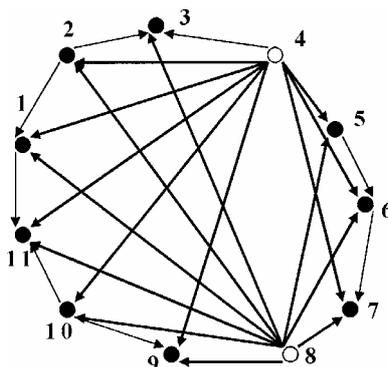


Рис. 3. Выбор Парето-оптимального решения с помощью графа

Обозначим через  $M^*$  множество Парето-оптимальных решений – видов антенн. Решение находится с помощью ориентированного графа

$$G = (V, E), \text{ где}$$

$$V = \{v_1, \dots, v_s\} \text{ – множество вершин,}$$

$$E \subseteq \{(v_i, \dots, v_k) : i, k = 1, \dots, s; i \neq k\} \text{ – множество дуг.}$$

Граф строится следующим образом. Вершина  $v_i$  соответствует антенне  $m_i$ , а дуга  $(v_i, v_k)$  принадлежит  $E$  тогда и только тогда, когда  $i$ -я антенна доминирует  $k$ -ю антенну, то есть  $c_{ij} \leq c_{kj}$ ,  $j = 1, \dots, n$ , причем, существует номер  $t$  такой, что  $c_{ij} < c_{kt}$ . Вариант  $m_i$  является Парето-оптимальным, если ни одна дуга из  $E$  не входит в вершину  $v_i$ . Множество вершин  $V^*$ , соответствующих Парето-оптимальным решениям для данного графа, построенного с использованием сформированной базы данных по антеннам, состоит из вершин  $v_4, v_8$  (рис. 3).

Последовательность действий специалиста на этапе проектирования приемо-передающего антенного центра представлена в виде графа, дуги которого соответствуют: 1) учету конструктивных особенностей; 2) использованию свойств диаграммы направленности; 3) исследованию возможностей поляризационного разнosa; 4) осуществлению пространственного разнosa; 5) обеспечению частотного разнosa (рис. 2. б).

Качество анализа совокупности характеристик прямо связано с полнотой модели, которая должна быть максимально подробной, но в то же время простой и компактной. В алгоритме предусмотрена возможность внесения

поправок и дополнений в модель с помощью элемента  $A_6$  – «всё остальное». Алгоритм решения на сформированном графе – замкнутый цикл:

$$A_1 \wedge A_2 \wedge A_3 \wedge A_4 \wedge A_5 \wedge A_6 \rightarrow B.$$

Дуги ( $A_1, \dots, A_6$ ) соответствуют правилам, предложенных экспертом, имеющих вид нечетких высказывательных предложений в форме «если..., то...», которые после формализации помещены в базу знаний. Заключение ( $B$ ) об обеспечении электромагнитной совместимости для каждого варианта, получаемое на основе анализа совокупности формализованных правил, перебираемых при перемещении по замкнутому циклу, сопровождается оценкой достоверности, показывающей степень уверенности эксперта в её достаточности для получения соответствующего заключения.

Обобщением предложенного алгоритма является его представление в виде совокупности высказываний, где осуществляется строго упорядоченная проверка истинности элементов левых частей, имеющих сложную структуру:

$$A_1 \wedge (\vee) A_2 \wedge (\vee) \dots \wedge (\vee) A_i \rightarrow B, \quad i = \overline{1, n};$$

$n$  – число анализируемых условий, значение которых зависит от рассматриваемой задачи и предметной области.

Формирование базы знаний по антеннам осуществляется внесением в соответствующие таблицы не только знаний о существующих антеннах, но и о модифицированных. Для того, чтобы внести лучший вариант из них, использовалось нечеткое отношение предпочтения, для формирования которого наряду с множеством полученных технических решений  $X$  эксперту предъявляется некоторое множество «эталонных» объектов  $Y$  – технических решений, полученных путем математического моделирования.

Алгоритм решения следующий:

1. Эксперту предлагается выбрать для каждого  $x_i$  максимально близкий к нему эталон  $y_j$  и оценить степень их сходства  $\mu(x_i, y_j)$  единицей, а остальные оценки  $\mu(x_i, y_j), j \neq 1, i = \text{const}$  назначать, исходя из этой максимально схожей пары.

2. Сформированная матрица экспертных оценок  $F$  нормируется.

3. На  $Y$  определяется линейный порядок  $S$ .

4. Вычисляется на  $X$  нечеткое отношение предпочтения  $R$ , индуцированное отношением  $S$ , по закону взаимодействия отношений

$$R = F^{-1} \circ S \circ F,$$

которое является прообразом отношения  $S$  относительно соответствия  $F$  и интерпретируется, как степень выраженности представления «выбранное техническое решение не хуже эталонного».

Будем полагать, что выполняется свойство нечеткого отношения  $F$ , состоящее в том, что оно функционально, если удовлетворяет условию: для любого  $x \in X$  существует единственное  $y \in Y$  такое, что  $\mu(x, y) = 1$ , то есть в матрице отношения  $F$  в каждой строке найдется элемент, равный 1.

Пусть  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$  – множество решений,  $Y = \{y_1, y_2\}$  – множество эталонов, на которых определен четкий линейный порядок  $S = \begin{pmatrix} 11 \\ 01 \end{pmatrix}$ .

Нормированные экспертные оценки степени сходства технических решений с эталонами представим в виде двудольного орграфа:  $F=(1,1)|0.2+(1,2)|1.0+(2,1)|1.0+(2,2)|0.7+(3,1)|0.4+(3,2)|1.0$  (рис. 4).

Из рисунка видно, что из трех предложенных решений решение  $x_2$  наиболее предпочтительно, так как оно со степенью 1 схоже с наиболее предпочтительным эталонным решением  $y_1$ .

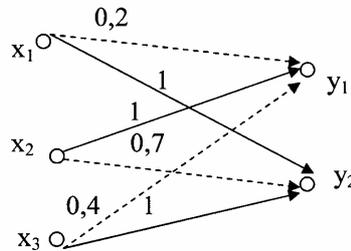


Рис. 4. Нормированное отношение  $F$  в виде орграфа

Нечеткое отношение предпочтения  $R = (1,1)|1+(1,2)|0.7+(1,3)|1+(2,1)|1+(2,2)|1+(2,3)|1+(3,1)|1+(3,2)|0.7+(3,3)|1$ , в котором каждый элемент определяется в соответствии с законом взаимодействия отношений по формуле:

$$\mu_R(x, y) = \bigvee_{u, v \in Y} \{ \mu_F(x, u) \wedge \mu_S(u, v) \wedge \mu_F(y, u) \},$$

и строгое нечеткое предпочтение для нашего случая  $P=(1,1)|0+(1,2)|0+(1,3)|0+(2,1)|1+(2,2)|0+(2,3)|1+(3,1)|0+(3,2)|0+(3,3)|0$ , каждый элемент которого определяется по формуле:

$$\mu_P(x, y) = \begin{cases} \mu_R(x, y), & \text{если } \mu_R(x, y) > \mu_R(y, x), \\ 0, & \text{если } \mu_R(x, y) \leq \mu_R(y, x), \end{cases}$$

подтверждают неформальный вывод, сделанный из рис. 4.

Метод эталонного подхода применялся в работе для выбора антенны по одной характеристике – коэффициенту бегущей волны. Для учета сразу нескольких характеристик антенны предлагается использовать другой метод – композиционное правило вывода.

Пусть  $\tilde{A}$  – согласованные средние экспертные оценки характеристик антенны, ранжированные по важности: коэффициента бегущей волны, диаграммы направленности, поляризации, коэффициента полезного действия.  $\tilde{F}$  – нечеткое отношение, элементами которого являются значения попарного сравнения характеристик из матрицы попарных близостей, формируемой экспертом на входе экспертной системы.  $\tilde{A}=1|1.00+2|0.65+3|0.25$ ;  $\tilde{F}=(1,1)|1+(2,2)|1+(3,3)|1+(4,4)|1+((1,2)+(2,1)+(2,3)+(3,2)+(3,4)+(4,3))|0,50$ .

Назовем  $\tilde{A}$  – унарное нечеткое отношение лингвистическим приближением «равный», а  $\tilde{F}$  – бинарное нечеткое отношение – «примерно равны». Уравнения назначения в этом случае имеют вид:

$$\tilde{A} = \text{«равный»};$$

$$\tilde{F} = \text{«примерно равны» и, следовательно};$$

$$\tilde{R} = \text{«равный»} \circ \text{«примерно равны»} \text{ («} \circ \text{» – максиминная операция)}$$

можно аппроксимировать как «более или менее равный», в качестве лингвистического приближения. Вычисления, произведенные по формуле

$$\mu_{\tilde{R}}(y) = \bigvee_x (\mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{F}}(x, y)),$$

дают результат  $\tilde{R} = 1|1.00 + 2|0.65 + 3|0.50 + 4|0.25$ .

Приближенный вывод – это и есть решение с набором характеристик антенны, «более или менее равным», заданному набору. Если используется матрица попарных близостей дилетанта, то выдаваемое решение не соответствует лингвистической оценке «более или менее равный».

Основная идея этого метода состоит в следующем: экспертные оценки представляются в виде уравнений назначения – нечетких отношений, содержащих ограничения на базовые переменные. Эти уравнения решаются относительно желаемых ограничений при помощи композиции нечетких отношений. Получаемый приближенный вывод и есть решение.

Построение нечеткой модели предметной области «Электромагнитная совместимость», моделей пользователя и обучения пользователя основано на исследовании семантического пространства памяти человека, необходимого для условного описания основных объектов предметной области и ее атрибутов, которое рассматривается в когнитивной психологии как модель структуры индивидуального сознания. В проведенных экспериментах экспертам в области радиоэлектроники и дилетантам предъявлялось подмножество из основных объектов предметной области и ее атрибутов. Поочередно каждый термин брался за эталон, и испытуемые выстраивали оставшиеся по убыванию сходства с ним. Так формировалась и графически интерпретировалась матрица попарных близостей, которую можно рассматривать как нечеткую модель предметной области, формализация которой осуществляется следующим образом.

Пусть  $\mu_1(x, y)$  – функция принадлежности нечеткого бинарного отношения «сходство» на заданном наборе понятий. Для каждой пары понятий  $x, y$  значение  $\mu_1(x, y)$  есть субъективная оценка человеком степени их сходства, которую можно рассматривать как «экспериментальные данные», отражающие понимание человеком понятия «сходство». Для  $\mu_1(x, y)$  вводится  $n$ -шаговое отношение

$$\mu_n(x, y) = \sup_{x_1, \dots, x_{n-1} \in X} \min(\mu_1(x_1, y), \dots, \mu_1(x_{n-1}, y)).$$

Для любых  $x, y \in X$  выполняется цепочка неравенств  $0 \leq \mu_1(x, y) \leq \mu_2(x, y) \leq \dots \leq \mu_n(x, y) \leq \dots \leq 1$ , из которой следует, что для любых  $x, y \in X$  последовательность  $\{\mu_k(x, y)\}$  имеет предел при  $k \rightarrow \infty$ . Таким образом, существует предельное отношение сходства, определяемое равенством

$$\mu(x, y) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mu_k(x, y) \quad \forall x, y \in X.$$

Подобное «портретирование» памяти, являющееся интегральным показателем уровня индивидуальных знаний, позволяет разработанной системе идентифицировать пользователя (рис. 5).

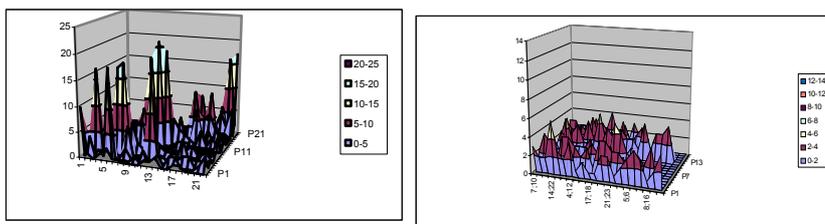


Рис. 5. Модель структуры индивидуального сознания эксперта (слева) и дилетанта (справа)

В качестве приемлемого количественного критерия контрастности «портрета» пользователя можно воспользоваться величиной, отражающей уровень индивидуальных знаний в заданной предметной области. Модель пользователя представляется в виде:

$$P = \left| \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij} - h_{ij} \right|,$$

где  $m, n$  – количества столбцов и строк матрицы попарных близостей,  $h_{ij}$  – высоты индивидуального профиля.

Дополнительные эксперименты, проведенные в Омском государственном педагогическом университете по исследованию структуры индивидуального сознания студентов, показывают, что разработанную методику можно с успехом использовать и как самостоятельный инструмент для контроля знаний в процессе обучения.

Результаты проведенных исследований позволили ориентировать экспертную систему на обучение. Цель - приближение знаний пользователя-обучаемого к уровню знаний эксперта. Модель обучения пользователя

$$M = M(P_X, P_Y, p, K)$$

представляется как процесс решения оптимизационной задачи

$$K(p) \rightarrow \min,$$

задаваемой функциями:  $p, K$  от переменных  $P_X, P_Y$ , где  $P_X, P_Y$  – интегральные характеристики матриц попарных близостей пользователя-обучаемого и эксперта. Функция  $p : X, Y \rightarrow P_X, P_Y$ ;  $K$  – оператор качества, показывающий для каждого  $P_X$  его близость к  $P_Y$ . Задача состоит в достижении  $p$ , минимизирующего  $K$ . Проведенные эксперименты хорошо согласуются с предлагаемой моделью.

В четвертой главе приведена реализация разработанной экспертной системы поддержки принятия решений «КС ЭМС» с использованием принципов объектно-ориентированного моделирования. Проведен расчет для задачи «Обеспечения электромагнитной совместимости приемопередающего центра, расположенного на ограниченной площади».

Для построения экспертной системы выбрана концепция «быстрого прототипа», которая продемонстрировала принципиальную пригодность инженерии знаний в данной предметной области. Экспертная система

реализована на объектно-ориентированном языке программирования C++ с применением Borland C++ Builder для использования в операционных системах Microsoft Windows. Согласно такой технологии «КС ЭМС» представляется в виде трех взаимосвязанных моделей: объектной модели, отражающей структурные аспекты, связанные с данными; динамической модели, описывающей работу исследуемых объектов; функциональной модели, в которой рассматриваются взаимодействия между объектами.

В экспертной системе обеспечивается интерактивное заполнение базы знаний в модуле «редактирование». Модуль «решения» выдает рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости для ряда типичных задач, представляющих самостоятельное значение на практике.

База знаний экспертной системы состоит из теоретического материала по проблемам обеспечения электромагнитной совместимости и специфической экспертной информации, что расширяет ее функциональные возможности как системы поддержки принятия решений и консультирования пользователей.

Расчет для задачи «Обеспечение электромагнитной совместимости приемо-передающего антенного центра, расположенного на ограниченной площади», проведен с помощью разработанного алгоритма (рис. 6).

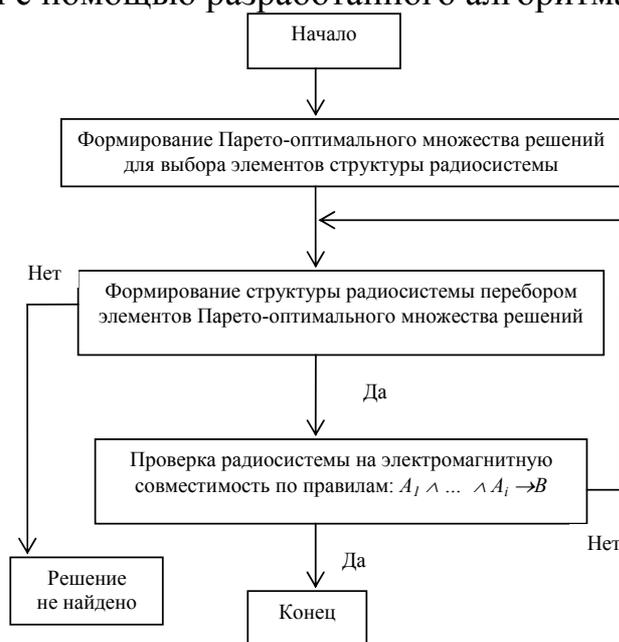


Рис. 6. Алгоритм «Проверка радиосистемы на электромагнитную совместимость»

Результаты эксперимента позволяют оценить реальную возможность обеспечения электромагнитной совместимости на этапе проектирования в конкретной группе радиоэлектронных средств.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## **Основные результаты диссертации**

1. Разработана обобщенная и нечеткая модели предметной области «Электромагнитная совместимость».
2. Предложена модель имитации профессиональной деятельности специалиста, позволяющая разрабатывать алгоритмы эффективного решения вопросов обеспечения электромагнитной совместимости радиосистем с использованием экспертной информации.
3. Для решения задач обеспечения электромагнитной совместимости применен аппарат нечеткой логики. Разработанные алгоритмы позволяют создавать методики преобразования информации на основе экспертных оценок.
4. Разработана модель пользователя экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости. Проведенные эксперименты по формированию модели структуры индивидуального сознания, позволили ориентировать разработанную экспертную систему на обучение. Формализация предлагаемой модели хорошо согласуется с результатами экспериментов.
5. Предложен эффективный способ оценки уровня индивидуальных знаний в заданной предметной области, учитывающий когнитивные механизмы сознания. Способ используется как самостоятельный инструмент для контроля знаний в процессе обучения.
6. На основе сформированных моделей и алгоритмов с использованием методов моделирования, оптимизации, инженерии знаний, когнитивной психологии, теории нечетких множеств и принятия решений разработан действующий прототип экспертной системы поддержки принятия решений по электромагнитной совместимости «КС ЭМС».

## **Публикации по теме диссертации**

1. Маренко В.А. Способы представления знаний в экспертных системах //Математические структуры и моделирование. – Омск: ОмГУ, 2001. – Вып. 8. - С. 34-39.
2. Бояркин Г.Н., Маренко В. А., Чуканов С.Н. Информационные технологии: Учебн.пособие. Омск: ОмГТУ, 2001. – 192 с.
3. Богданов А.В., Ивченко Р.В., Маренко В.А., Маренко В.Ф. Применение математического моделирования для разработки антенно-согласующих устройств декаметрового диапазона //Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Материалы II Междун.научн.- практ.конф. – Тирасполь: РИО ПГУ, 2001. – С. 67-69.
4. Маренко В.Ф., Маренко В.А. Программно-имитационная модель антенно-согласующих устройств декаметрового диапазона //Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы научн.-техн.конф. – Вологда: ВоГТУ, 2001. – С. 38–39.

5. Маренко В.А. Исследование семантического пространства памяти//Омский научный вестник. Омск: ОмГТУ, 2001. – № 17. – С. 82–84.
6. Богданов А.В., Лузан Ю.С., Маренко В.Ф., Маренко В.А., Нартов Б.К., Чуканов С.Н. Проблемы динамического согласования передающих антенн КВ-диапазона для подвижных объектов //Научн.метод.сб. № 50 МО РФ и УВО; М.: Военное изд-во, 2001. – С.104–109.
7. Маренко В.А., Маренко В.Ф. Эвристические методы решения задач в информационно-консультационной системе //Совершенствование форм и методов управления качеством учебного процесса: Сб.материалов городской научн.-метод.конф. Омск: ОмГТУ, 2002. – С. 38–41.
8. Маренко В.А. Использование нечетких отношений при разработке информационно-консультационной системы «Электромагнитная совместимость» //Математические структуры и моделирование. – Омск: ОмГУ, 2002. – Вып. 9. – С. 48–50.
9. Маренко В.А., Маренко В.Ф. Основы разработки консультационной экспертной системы //Техника радиосвязи /Омский НИИ приборостроения. – 2002. – Вып.7. – С.74–77.
10. Маренко В.А., Шапцев В.А. Представление знаний в экспертных системах: Учебн.пособие. //Сургут: РИО СурГПИ, 2002. – 73 с. – ISBN 5-93190-052-7.
11. Маренко В.А. Оптимизация в условиях неопределенности //Омский научный вестник. Омск: ОмГТУ, 2002. – № 19. – С. 61–63.
12. Маренко В.А. Композиционное правило вывода в информационно-консультационной системе «Электромагнитная совместимость» //Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IV междун. науч.-техн.конф. – Омск: ОмГТУ, 2002. Кн. 1 – С. 312–314. ISBN 5-8149-0145-4.
13. Маренко В.А. Оценка индивидуальных знаний //Математические структуры и моделирование. – Омск: ОмГУ, 2002. – Вып. 10. – С. 34–38.
14. Маренко В.А., Маренко В.Ф. Моделирование действий специалиста //II всероссийская ФАМ конференция по финансово-актуарной математике и смежным вопросам: Тез.докл. – Красноярск: КГУ, 2003. – С.89–90.
15. Маренко В.А. Системный подход в решении вопросов обеспечения электромагнитной совместимости //Вычислительные технологии. Региональный вестник Востока: Совместный выпуск по материалам междун.конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании», 2003. – Т. 8. – Ч. II. – С. 191 – 196.
16. Маренко В.А. Антенный комплекс как сложная система //Математические структуры и моделирование. – Омск: ОмГУ, 2003. – Вып. 11. – С. 54–58.
17. Маренко В.А. Прототип консультационной системы по вопросам обеспечения электромагнитной совместимости //Современные проблемы физики и высокие технологии: Материалы междун.конф., посвященной 125-

летию ТГУ, 75-летию СФТИ и 50-летию РФФ ТГУ. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003. – С. 427 – 428.

18. Маренко В.А. Оценивание учебной деятельности //Новые информационные технологии в нефтегазовой промышленности и энергетике: Материалы междунаучн.-техн.конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С.20–23.
19. Маренко В.А. Моделирование структуры антенного комплекса //Новые информационные технологии в нефтегазовой промышленности и энергетике: Материалы междунаучн.-техн.конф. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – С.75–77.
20. Маренко В.А., Рукосуев С.И. Моделирование действий специалиста в прототипе консультационной системы по вопросам обеспечения электромагнитной совместимости //Математическое моделирование в образовании, науке и производстве: Материалы III Междунаучн.-практ.конф. – Тирасполь: РИО ПГУ, 2003. – С. 14–15.
21. Глухих И.Н., Маренко В.А. Оптимизация набора элементов сложной системы при конструировании антенных комплексов //Вестник Тюменского государственного университета. – Тюмень: ТюмГУ, 2003. – № 5 (в печати).