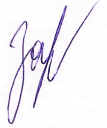


На правах рукописи

УДК: 681.5 + 004.8 + 57.089] (043.3)



ЗАГРЕБИН Дмитрий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ  
ДИАГНОСТИКИ ИШЕМИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ У ЛЕТНО-  
ДИСПЕТЧЕРСКОГО СОСТАВА

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации  
(информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва — 2012 г.

Работа выполнена на кафедре 303 «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Павлова Наталия Владимировна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Истомина Татьяна Викторовна,  
заведующая кафедрой «Информационные  
технологии и менеджмент в медицинских  
и биотехнических системах» ФГБОУ ВПО  
«Пензенская государственная  
технологическая академия»

доктор технических наук, профессор  
Ковшов Евгений Евгеньевич,  
заведующий кафедрой «Управление и  
информатика в технических системах»  
ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный  
исследовательский университет «МИЭТ».

Защита состоится « 14 » \_\_\_\_\_ мая \_\_\_\_\_ 2012 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 125993, Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ апреля \_\_\_\_\_ 2012 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Горбачев Ю. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность задачи.** Одной из основных причин авиакатастроф является человеческий фактор. Так, за последние десять лет по этой причине произошло 55% всех авиакатастроф в России.

Среди причин, по которым летно-диспетчерский состав не может качественно выполнять свои функции, одними из наиболее важных являются ишемические нарушения головного мозга (далее просто мозга). Так, 80% случаев отстранения летного состава в 1995–2001 гг. от работы произведены по причине именно таких нарушений.

У пилотов и авиадиспетчеров наступает преждевременное старение организма, на 10–25 лет раньше появляются болезни сердечно-сосудистой системы (особенно ишемические нарушения мозга); ежегодно наблюдается 60–80 случаев острых отказов здоровья. Это связано с напряженными условиями работы.

Эффективным средством предотвращения авиакатастроф по причине ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава может быть экспресс-диагностика, проводимая перед началом работы. Это важная, нерешенная на сегодня, **актуальная задача**.

Для решения данной задачи необходимо иметь переносные измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) с измерительными каналами, осуществляющими диагностику ишемических нарушений мозга по определенной методике с требуемой точностью; программно-алгоритмическое обеспечение, которое позволяет гарантированно выделить группу риска среди пилотов и авиадиспетчеров, и оперативные средства связи для передачи результатов анализа в специальные медицинские центры экспертам.

В диссертации проанализированы две современные и достаточно эффективные методики диагностики ишемических нарушений мозга, которые могут быть использованы в таких ИВК:

- ультразвуковая транскраниальная доплерография (ТКДГ);
- электроэнцефалография (ЭЭГ).

В отличие от других методик ТКДГ и ЭЭГ позволяют диагностировать наличие ишемических нарушений на самых ранних стадиях и пригодны для проведения экспресс-диагностики. Однако, каждая из методик по отдельности не обеспечивает требуемой для практики точности производимых измерений. Для всех существующих методик погрешность в диагнозе о наличии ишемических нарушений составляет не менее 15%.

Кроме того они обладают достаточно низкой стоимостью и реализуются на аппаратуре небольших габаритов, что важно при осуществлении экспресс-диагностики.

В настоящее время во всем мире методики ЭЭГ и ТКДГ используются в ИВК независимо. Например, медицинские ИВК такого типа выпускаются фирмами ООО НПФ «БИОЛА», ООО «Медицинские Компьютерные Системы», ООО «НПКФ

Медиком МТД», ООО «Нейрософт», ООО «НМФ «MBN», NIHON KONDEN, DWL, ЗАО «СПЕКТРОМЕД», NICOLET BIOMEDICAL, ATES MEDICA Device. Следующим шагом в направлении повышения точности диагностики является комплексирование измерений по обоим методикам.

Разработка средств, позволяющих осуществить такое комплексирование и провести диагностику ишемических нарушений мозга у летно-диспетчерского состава с требуемой точностью в реальном времени и является задачей, решению которой и посвящена диссертационная работа.

**Объект исследования** — ИВК медицинского назначения для экспресс-диагностики ишемических нарушений мозга у летно-диспетчерского состава.

**Предмет исследования** — экспертная система для диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава в реальном времени с использованием комплексирования результатов обследования по методикам ТКДГ и ЭЭГ.

**Целью работы** является обеспечение автоматической диагностики ишемии мозга у летно-диспетчерского состава в реальном масштабе времени с достаточной для практики точностью за счет комплексирования двух методик (ТКДГ и ЭЭГ) на базе разработанной экспертной системы.

В диссертации поставлена и решена **задача** разработки такой экспертной системы. Для этого решены следующие **научно-технические задачи**:

- проведен системный анализ диагностики состояния мозга с помощью методик ТКДГ и ЭЭГ, как возможных источников информации для экспертной системы, осуществляющей комплексирование этих измерений;
- разработана база знаний экспертной системы, включающая набор правил и признаков, позволяющих осуществлять автоматическую диагностику в реальном времени ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава с помощью методик ТКДГ и ЭЭГ;
- разработан механизм логических выводов экспертной системы, позволяющий строить алгоритм по принятию решения на основе анализа измерений ультразвукового доплеровского измерителя скорости кровотока и электроэнцефалографа; механизм носит универсальный характер и может применяться в ИВК различного назначения, где анализируются характерные области измеренных сигналов с нечеткими признаками;
- разработана комплексная методика, базирующаяся на этом программно-алгоритмическом обеспечении, которая дает возможность осуществлять автоматическую диагностику ишемических нарушений в реальном масштабе времени с требуемой для практики точностью;
- проведены тестирование, моделирование и исследования в клинических условиях с использованием разработанной экспертной системы, подтвердившие ее работоспособность и эффективность.

При решении перечисленных задач использованы следующие **методы исследований**: методы системного анализа, комплексирования информации,

принятия решений, искусственного интеллекта, обработки сигналов, моделирования.

**Научная новизна** работы заключается в:

- разработке новых нечетких переменных и их термов, применимых для комплексирования информации в экспертной системе при диагностике ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава с помощью методик ТКДГ и ЭЭГ;
- разработке правил базы знаний экспертной системы, использующих теорию нечетких множеств и достаточно полно (с точки зрения рассматриваемой задачи) описывающих предметную область;
- разработке универсального механизма логического вывода, учитывающего возможность одновременного срабатывания большого числа недостаточно точных правил и разрешающего конфликт с помощью теории нечетких множеств;
- разработке комплексной методики, позволяющей объединять измерения каналов ТКДГ и ЭЭГ и осуществлять автоматическую диагностику ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава в реальном масштабе времени с требуемой для практики точностью.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- математическое обеспечение экспертной системы, использующей теорию нечетких множеств (переменные и их термы), применимое для автоматической диагностики ишемических нарушений;
- продукционная база знаний с правилами, использующими теорию нечетких множеств, позволяющая осуществлять автоматическую диагностику ишемических нарушений с помощью методик ТКДГ и ЭЭГ с требуемой для практики точностью;
- универсальный модуль механизма логического вывода продукционной экспертной системы, позволяющий принимать решения по диагностике ишемических нарушений на основе комплексирования измерений и являющийся средством создания новых экспертных систем для различных предметных областей;
- комплексная методика диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава в реальном масштабе времени.

**Практическая значимость результатов диссертационной работы** состоит в создании экспертной системы, позволяющей осуществлять автоматическую диагностику ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава в реальном масштабе времени и с требуемой точностью, как дополнительного канала ИВК медицинского назначения «Ангиодин-Универсал» производства фирмы ЗАО «НПФ «БИОСС» совместно с фирмой ООО «БИОСОФТ-М» и применении этой системы для диагностики ишемии в клинических условиях.

**Результаты работы внедрены** в составе ИВК медицинского назначения

«Ангиодин-Универсал» в Городской клинической больнице № 15 им. О. М. Филатова (ГКБ № 15) и в ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова» и использованы в учебном процессе кафедры «Приборы и ИВК» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), что подтверждается соответствующими актами.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным применением использованных методов исследования и их проверкой в ходе моделирования и при клинических исследованиях.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XV, XVI, XVII, XIX, XX Международных научно-технических семинарах «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», 2006, 2007, 2008, 2010, 2011 гг;
- XXXII, XXXIII, XXXIV Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения», 2006, 2007, 2008 гг;
- Всероссийской научно-технической конференции «Информационные и управляющие технологии в медицине», 2007 г.;
- V, VI, VII Всероссийских конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», 2008, 2009, 2010 гг;
- Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008»;
- Конференции молодых ученых и специалистов Московского отделения академии навигации и управления движением, 2008 г.;
- XLVIII Международной научно-технической конференции «Студент и научно-технический прогресс», 2010 г.;
- V Всероссийском съезде трансплантологов, 2010 г.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21-ой печатной работе, в том числе в 7 статьях в журналах и сборниках (4 в журналах, входящих в список ВАК РФ).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников, включающего 108 наименований. Общий объём работы составляет 128 страниц, включая 43 рисунка и 6 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы; сформулирована цель работы; определены научно-технические задачи исследования, решенные для достижения поставленной цели; представлены выносимые на защиту

положения; охарактеризована их научная новизна и практическая ценность; приведены сведения о внедрении полученных результатов, структуре и объеме работы.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ современного состояния методов диагностики ишемических нарушений с использованием ТКДГ и ЭЭГ и опыта разработки ИВК медицинского назначения для определения ишемии мозга; сравнительный анализ различных методов, которые могут быть применены для решения задач комплексирования данных ЭЭГ и ТКДГ.

На основании анализа требований к оборудованию для диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава предложено провести комплексирование результатов измерений по методикам ТКДГ и ЭЭГ на базе переносного ИВК «Ангиодин-Универсал» (производства фирмы ЗАО «НПФ «БИОСС» совместно с фирмой ООО «БИОСОФТ-М»). Внешний вид ИВК «Ангиодин-Универсал» представлен на рис. 1. Этот ИВК включает различные датчики, в том числе и каналы ТКДГ и ЭЭГ, которые могут послужить входными блоками для комплексирования измерений в реальном времени с целью достижения достаточной для практики точности.



*Рис. 1. ИВК «Ангиодин-Универсал»*

Для того, чтобы ИВК «Ангиодин-Универсал» мог осуществлять диагностику ишемических нарушений в реальном масштабе времени и с достаточной точностью для выявления группы риска летно-диспетчерского состава потребовалось разработать и встроить в этот комплекс дополнительный блок, на котором и производится комплексирование измерений каналов ТКДГ и ЭЭГ.

Для разработки такого блока, во-первых, было необходимо провести системный анализ всех входных параметров ТКДГ и ЭЭГ и выделить из измеренных сигналов признаки ишемии мозга. Пример входных сигналов методик ТКДГ и ЭЭГ показан на рис. 2.

Врач-эксперт анализирует форму этих сигналов и делает заключение о состоянии мозга по ряду признаков. Признаки, которыми он пользуется, носят в основном слабоформализованный характер.

В диссертации на основании анализа литературы и мнений экспертов эти признаки выделены и по возможности математически формализованы. Всего было

выделено 24 признака для ТКДГ и 37 признаков для ЭЭГ. Характерные примеры таких признаков:

- при уменьшении просвета сосуда возрастает средняя скорость кровотока, индексы периферического сопротивления незначительно снижаются (признак методики ТКДГ);
- на тяжелые очаговые поражения указывает высокоамплитудная медленная активность (признак методики ЭЭГ).

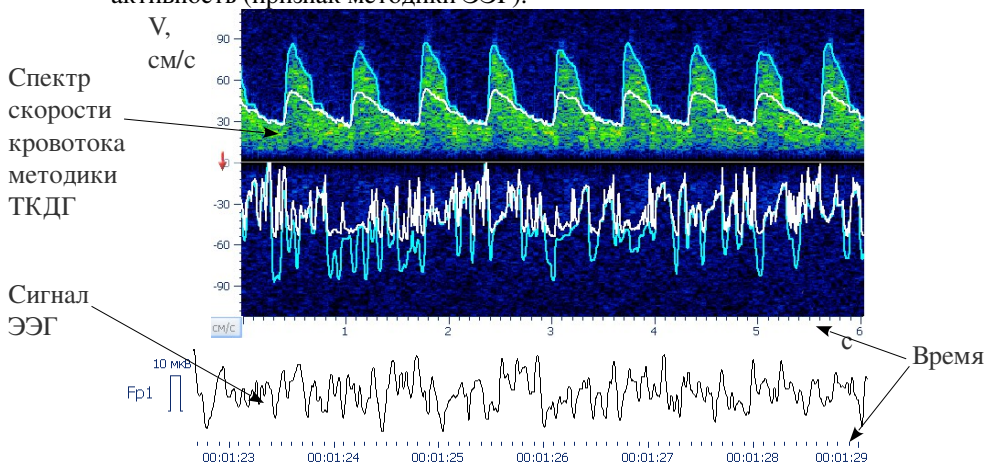


Рис. 2. Примеры входных сигналов методик ТКДГ (вверху) и ЭЭГ (внизу)

Выделенным признакам можно сопоставить индексы этих методик, которые либо вычисляются по формулам, либо по простым формальным алгоритмам. Всего в работе выделено 20 таких параметров. Например, в качестве индекса для методики ТКДГ вычисляется средняя скорость кровотока  $M$ , определяемая по формуле:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N a_i}{N},$$

где  $N$  — количество элементов (зависит от частоты и выбранной длительности анализируемого сигнала);  $a_i$  — значение амплитуды огибающей ультразвукового доплеровского спектра скорости кровотока.

Для методики ЭЭГ, в частности, вычисляется отношение  $FSR$  быстрых ритмов к медленным по формуле:

$$FSR = \frac{Power_{\alpha} + Power_{\beta}}{Power_{\theta} + Power_{\delta}},$$

где  $Power_{\alpha}$  — мощность спектра канала ЭЭГ в диапазоне частот от 8 до 13 Гц;  $Power_{\beta}$  — мощность спектра канала ЭЭГ в диапазоне частот от 13 до 35 Гц;  $Power_{\theta}$  — мощность спектра канала ЭЭГ в диапазоне частот от 4 до 8 Гц;  $Power_{\delta}$  — мощность спектра канала ЭЭГ в диапазоне частот от 0.5 до 4 Гц.

Эти вычисляемые параметры и являются входными сигналами для блока комплексирования ИВК.

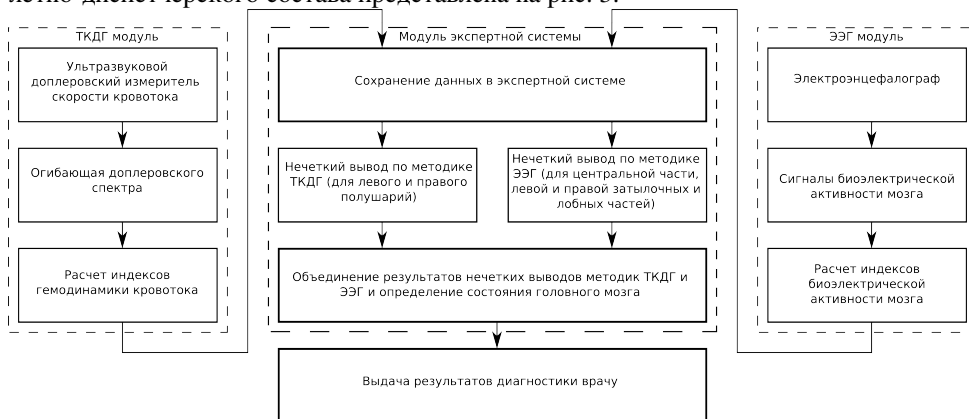


В качестве результата диагностики предлагается использовать символьную переменную I, названную «состояние мозга», которая содержит окончательный вывод о наличии ишемических нарушений у данного человека. Это может быть либо норма, и тогда пилот или диспетчер допускается к работе, либо одна из степеней развития ишемии: легкие нарушения (низкая степень), средние нарушения (средняя степень), тяжелые нарушения (высокая степень), смерть мозга.

Учитывая, что измерения по методикам ТКДГ и ЭЭГ содержат признаки ишемии, принятие решения по которым трудно строго математически формализовать, а данные медицинской статистики обладают большой степенью неопределенности, среди методов комплексирования выбраны неформализованные, реализующиеся на базе продукционных экспертных систем с учетом неопределенности на основе теории нечетких множеств Л. Заде.

**Во второй главе** поставлена задача разработки продукционной экспертной системы с правилами на базе нечеткой логики для комплексной диагностики ишемии мозга в реальном масштабе времени с достаточной для практики точностью (погрешность не более 15%) использующей методики ТКДГ и ЭЭГ.

Разработанная структурная схема процесса диагностики ишемии мозга у летно-диспетчерского состава представлена на рис. 3.



*Рис. 3. Структурная схема процесса диагностики ишемии мозга*

В правой и левой частях схемы находятся измерительные каналы ТКДГ и ЭЭГ, а ее ядром является экспертная система, на которой и осуществляется комплексирование измерений этих двух каналов.

Для проведения диагностики ишемии мозга данные по методикам ТКДГ и ЭЭГ анализируются независимо. Результат в виде сформированных индексов гемодинамики и биоэлектрической активности мозга передается экспертной системе, которая делает окончательный вывод о выделении группы риска летно-диспетчерского состава.

Для комплексирования результатов измерений по методикам ТКДГ и ЭЭГ выбрана модель головы человека, представленная на рис. 4.

На ней показано размещение ультразвуковых доплеровских измерительных датчиков и ЭЭГ электродов. Эта модель имеет характерные области: левую, правую, левую и правую лобные, левую и правую затылочные и центральную часть. Эти области задействованы при формировании правил базы знаний экспертной системы.

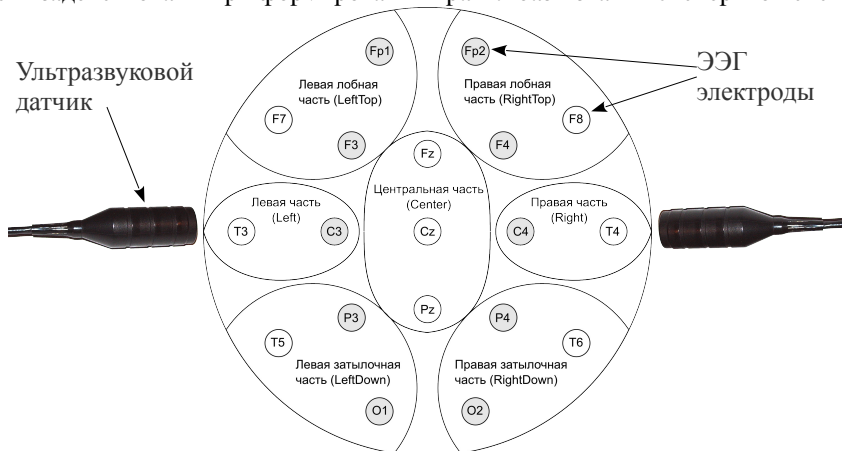


Рис. 4. Модель головы человека для диагностики по ТКДГ и ЭЭГ

Для использования теории нечетких множеств в правилах разработанной экспертной системы для всех входных, промежуточных и выходной переменной на основании анализа данных, полученных в ГКБ № 15 им. О. М. Филатова и в ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова» сформировано 14 функций принадлежности, включающих от трех до шести областей, где может находиться нечеткая переменная. Основным элементом этих функции принадлежности выбрана трапеция и для каждой из вершин определены конкретные числовые значения. Пример функции принадлежности  $F(I)$  для выходной переменной  $I$  — «состояние мозга» представлен на рис. 5.

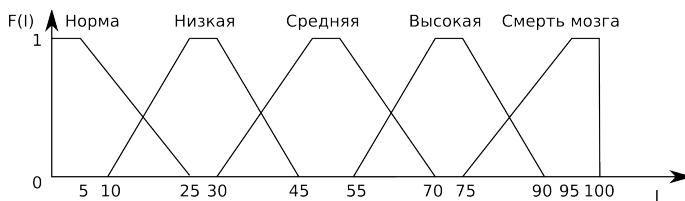


Рис. 5. Множество термов выходной переменной «состояние мозга»

С использованием этих функций принадлежности разработана база знаний, включающая 178 правил, которые полностью описывают все входные переменные, соответствующие измерениям по методикам ТКДГ и ЭЭГ, и все возможные выводы, которые можно в этих условиях получить.

Примеры правил, соответствующих отдельной методике (первое) и их комплексированию (второе) приведены ниже.

**ЕСЛИ** «в левом полушарии средняя скорость кровотока» = «норма»

**И** «систолическая скорость кровотока» = «норма»

**И** «диастолическая скорость кровотока» = «норма»

**И** «индекс пульсаций» = «норма»

**И** «коэффициент асимметрии» = «норма»

**ТО** «состояние мозга в левом полушарии» = «норма»

**ЕСЛИ** «в левой лобной части состояние мозга» = «легкие нарушения»

**ИЛИ** «в правой лобной части состояние мозга» = «легкие нарушения»

**ТО** «состояние мозга в лобной части» = «легкие нарушения»

Для облегчения проверки целостности базы знаний и упрощения алгоритма принятия решения с их использованием правила подвергнуты дополнительной структуризации. Структуризация правил базы знаний разработанной экспертной системы представлена на рис. 6.



*Рис. 6. Структура правил базы знаний экспертной системы*

Правила объединены в непересекающиеся подмножества, каждое из которых использует описания измерений, соответствующих отдельным областям модели головы, голове в целом и принадлежащих либо к отдельным методикам (ТКДГ и ЭЭГ), либо к их комплексному использованию.

Созданный алгоритм работы механизма логического вывода экспертной системы для диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава представлен на рис. 7. Он позволяет просмотреть все правила базы знаний и выбрать из них те, которые должны сработать на данном шаге принятия решения.

В отличие от традиционных продукционных экспертных систем, здесь не строится цепочка сработавших правил, а на каждом шаге срабатывают все правила, относящиеся к анализируемой ситуации. При этом возникает несколько нечетких переменных со значениями конфликтующими между собой. Используя теорию Заде,

экспертная система производит объединение всех полученных результатов и получает окончательный вывод. При этом используется минимаксная композиция нечетких множеств, согласно которой логическая операция И заменяется на минимум степеней принадлежности правил, а ИЛИ — на максимум.

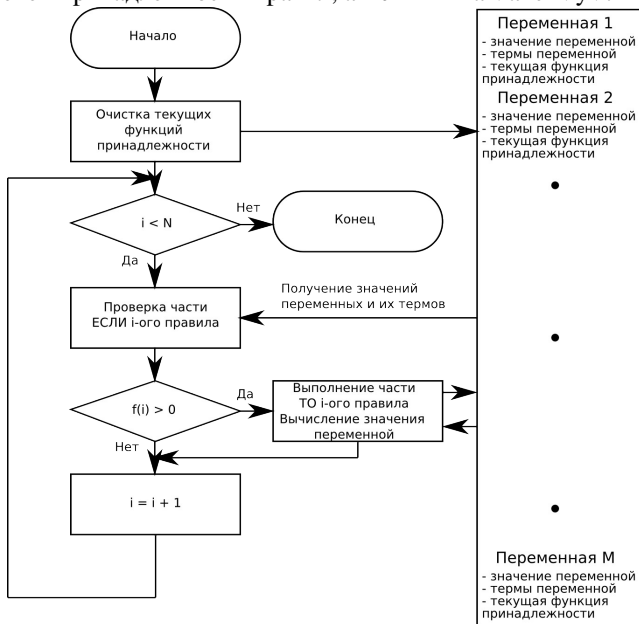


Рис. 7. Алгоритм работы механизма логического вывода в разработанной экспертной системе

Пример объединения правил для выявления групп риска летно-диспетчерского состава показан на рис. 8.

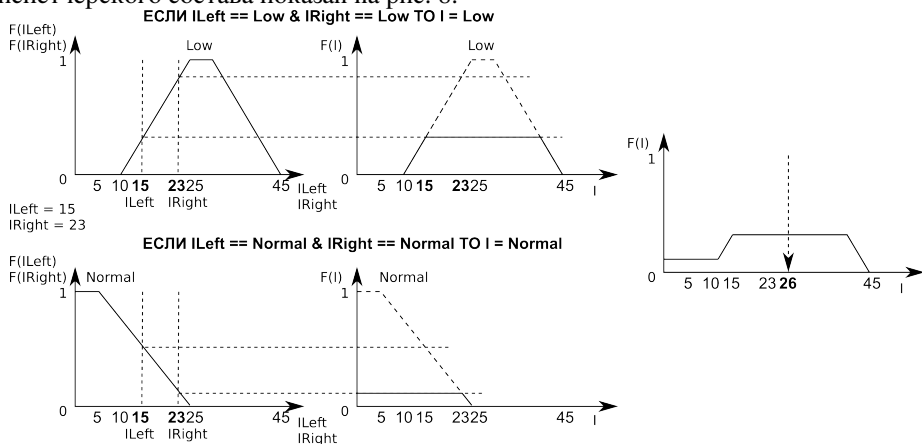


Рис. 8. Пример нечеткого логического вывода

Здесь сработали два правила из базы знаний. При нечетком выводе на функциях принадлежности переменных, входящих в части ТО этих правил, построена фигура, для которой методом центра тяжести выделено единственное значение, которое и дает окончательный вывод. В данном случае это  $I = 26\%$ , что соответствует легкому нарушению состояния мозга.

В третьей главе на примере ИВК «Ангиодин-Универсал» исследованы возможности аппаратного и программно-алгоритмического обеспечения, необходимые для осуществления автоматической диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава.

В интегрированной среде Microsoft Visual Studio на языке Visual C++ разработано программное обеспечение модуля производственной экспертной системы с правилами на базе нечеткой логики для диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава. Этот модуль в качестве дополнительного канала встроен в ИВК «Ангиодин-Универсал».

Структурная схема разработанного модуля производственной экспертной системы представлена на рис. 9.

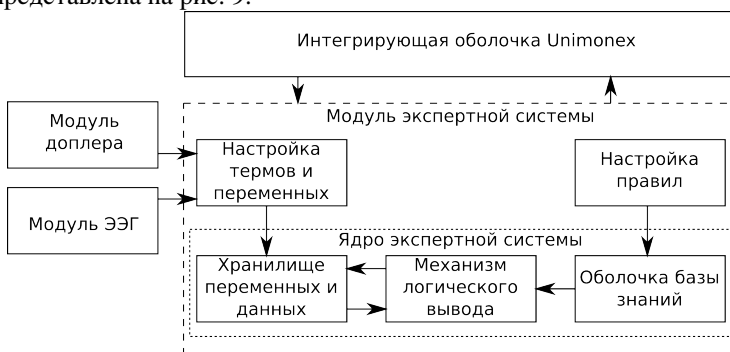


Рис. 9. Схема модуля экспертной системы

Модуль экспертной системы получает данные от модулей ЭЭГ и ТКДГ и управляется оболочкой Unimonex, являющейся ядром программно-алгоритмического обеспечения ИВК «Ангиодин-Универсал».

Разработанный модуль экспертной системы сделан универсальным. Он состоит из блоков ввода переменных и термов, ввода правил, оболочки базы знаний, хранилища переменных и данных и механизма логического вывода, способного осуществлять работу с нечеткими множествами. Именно этот механизм и позволяет получать окончательный вывод и выделять группу риска летно-диспетчерского состава. Универсальность же этого модуля позволяет применять ядро экспертной системы как инструментальное средство для разработки экспертных систем в других предметных областях (например, при анализе телеметрических данных).

Для того, чтобы экспертная система могла осуществлять диагностику ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава предварительно заполнено хранилище переменных и данных индексами и их термами с указанием численных

параметров функции принадлежности. Затем в оболочку базы знаний введены правила в форме простого текста. Ядро экспертной системы способно работать с динамически задаваемыми индексами, их термами и правилами базы знаний, для чего реализован синтаксический анализ правил и алгоритмы формирования промежуточного выполняемого кода, позволяющего осуществлять нечеткий вывод в режиме реального времени.

Такая реализация модуля экспертной системы дает возможность менять параметры функций принадлежности и базу знаний без перекомпиляции программно-алгоритмического обеспечения и развивать систему без принципиальных переработок.

**В четвертой главе** представлены результаты тестирования, моделирования и клинических испытаний разработанной экспертной системы, которые подтвердили ее работоспособность и эффективность для применения в задаче диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава.

Тестирование разработанной экспертной системы проводилось в три этапа.

На первом этапе проверена работоспособность разработанной экспертной системы и в первую очередь ее универсального ядра. Для этого использовано 94 автоматических комплексных теста, включавших в себя как тестирование отдельных функций, так и работу с нечеткой логикой в рамках специальной упрощенной базы знаний. Тесты встроены в ядро экспертной системы и позволяют контролировать ее качество, как универсального инструментального средства.

Тестирование позволило проверить все аспекты работы ядра экспертной системы, начиная от синтаксического анализа при вводе правил и заканчивая получением окончательных выводов системы. Результат — 100% работоспособность.

На втором этапе проводилось моделирование с использованием реальных значений индексов измеряемых сигналов и с целью формирования контрольных тестов, которые затем были встроены в экспертную систему и применяются для контроля ее работоспособности перед проверкой летно-диспетчерского состава. Для этого использованы исходные данные ГКБ № 15 им. О. М. Филатова и в ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова». 54 специально сформированных клинических контрольных теста подтвердили полную работоспособность системы.

На третьем этапе проведены клинические испытания разработанной производственной экспертной системы с правилами на базе нечеткой логики в составе ИВК «Ангиодин-Универсал» на базе ГКБ № 15 им. О. М. Филатова и в ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова».

В ГКБ № 15 им. О. М. Филатова разработанная экспертная система проверялась на пациентах с нормой, атеросклерозом и другими сердечно-сосудистыми нарушениями (норма, легкий, средний и тяжелый уровни нарушений) в амбулаторных условиях (до операции и после операции) и в интероперационных условиях.

В ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова» тестирование осуществлялось на пациентах в тяжелом и очень тяжелом состоянии с черепно-мозговыми травмами различной степени тяжести.

Проведено 966 тестов для выявления степени нарушения функций мозга и выделения группы риска летно-диспетчерского состава. Степень ишемии продиагностирована с погрешностью не превышающей 10%. Пилоты и авиадиспетчеры, которые не имеют признаков ишемии, выделяются безошибочно. Это позволяет оперативно в реальном времени выделить группу риска летно-диспетчерского состава, а используя возможности ИВК, более детально проанализировать степень ишемии, передав данные экспертам, в том числе с применением дистанционных средств оперативной связи в специальные медицинские центры.

**В заключении** изложены основные результаты и выводы работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В результате проведенных исследований получены следующие основные выводы и результаты:

1. Поставлена и решена задача разработки экспертной системы с правилами на основе нечеткой логики, являющейся дополнительным каналом ИВК медицинского назначения для комплексной диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава.
2. Разработана продукционная база знаний экспертной системы, включающая 178 базирующихся на теории нечетких множеств правил и достаточно полно (с точки зрения рассматриваемой задачи) описывающая предметную область диагностики ишемических нарушений. Для этого определены все пригодные для автоматической диагностики ишемии мозга в экспертной системе входные, промежуточные и выходная нечеткие переменные, их термы и функции принадлежности (трапецевидной формы).
3. Разработан универсальный механизм логического вывода продукционной экспертной системы с правилами на базе нечеткой логики, применимый для автоматической диагностики ишемических нарушений у летно-диспетчерского состава. Механизм также применим для разработки экспертных систем, имеющих на входе измерительные блоки, оценка сигналов которых связана с существенной неопределенностью в исходных данных (в различных предметных областях).
4. Разработано программное обеспечение, реализующее теоретические результаты по созданию продукционной экспертной системы с правилами на базе нечеткой логики для диагностики ишемических нарушений с помощью методик ТКДГ и ЭЭГ, включающее подсистемы настройки термов, переменных и правил. Разработанное программно-алгоритмическое

обеспечение встроено в ИВК медицинского назначения «Ангиодин-Универсал», используемый для комплексной автоматической диагностики ишемии мозга в режиме реального времени.

5. Проведено тестирование разработанной экспертной системы, включающее три этапа. На первом этапе проверена работоспособность универсального ядра экспертной системы с использованием 94 комплексных тестов с сигналами разной формы. Результат — 100% работоспособность. На втором этапе проводилось моделирование с использованием реальных значений индексов измеряемых сигналов и с задачей формирования 54 контрольных тестов, которые затем встроены в экспертную систему и подтвердили полную ее работоспособность. На третьем этапе проведены клинические испытания экспертной системы в составе ИВК «Ангиодин-Универсал» на базе ГКБ № 15 им. О. М. Филатова и в ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова» (966 тестов). Констатированы гарантированное выделение пилотов и авиадиспетчеров, не имеющих ишемических нарушений, и диагностика степени ишемии с погрешностью, не превышающей 10%.
6. Полученные в диссертационной работе результаты в составе ИВК «Ангиодин-Универсал» внедрены в ГКБ № 15 им. О. М. Филатова и в ФБГУ «Федеральный научный центр трансплантологии и искусственных органов им. академика В. И. Шумакова» для диагностики ишемии мозга и использованы в учебном процессе МАИ, что подтверждено соответствующими актами.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В рецензируемых журналах и изданиях*

1. Адашкин А. В., Исакова О. И., Сергейчик В. В., Филатов И. А., Загребин Д. А. Мультимодальные средства функциональной диагностики лётного и диспетчерского состава гражданской авиации. // Вестник МАИ. Том 18, № 3, 2011, с. 152–160.

2. Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое обеспечение модулей интегрированного медицинского приборного комплекса. // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 45, 2011. — Режим доступа: [http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25387&PAGEN\\_2=2](http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=25387&PAGEN_2=2) — 15.02.2012.

3. Павлова Н. В., Загребин Д. А. Продукционная экспертная система для исследования биоэлектрической активности мозга летного и диспетчерского состава. // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 49, 2011. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=27966> — 15.02.2012.

4. Филатов И. А., Сергейчик В. В., Адашкин А. В., Загребин Д. А. Разработка и внедрение в авиационную медицину средств удаленного мониторинга состояния пациентов в режиме on-line. // Вестник МАИ. Том 18, № 2, 2011, с. 160–167.



5. Адашкин А. В., Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое обеспечение для управления медицинским цвето-звуковым терапевтическим приборным комплексом. // Сборник статей Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008», г. Москва, 21–24 апреля 2008 г. Тезисы докладов. — М.: МАИ-ПРИНТ, 2008, с. 36–37.

6. Адашкин А. В., Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое обеспечение обработки звуковых сигналов медицинского назначения. // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: Труды V Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Центральный регион. Москва, 1–2 апреля 2008 г. — М.: Вузовская книга, 2008, с. 79–80.

7. Загребин Д. А. Информационное и программное обеспечение для применения мобильной вычислительной техники в медицинских приборных комплексах. // Научные труды «XXXIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция», том 2. — М.: МАТИ, 2007, с. 127–128.

8. Загребин Д. А., Павлова Н. В., Сергейчик В. В. Информационное и программное обеспечение мобильной вычислительной техники с дистанционным отображением результатов медицинских исследований. // Труды XVI Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», г. Алушта, 2007. — Тула: ТулГУ, 2007, с. 317.

9. Загребин Д. А., Павлова Н. В., Сергейчик В. В. Программно-алгоритмическое обеспечение сжатия доплеровского ультразвукового сигнала информационного вычислительного комплекса медицинского назначения. // Труды XV Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации», г. Алушта, 2006. — М.: МИФИ, 2006, с. 302.

10. Загребин Д. А. Программа обработки результатов измерений с распознаванием формул и символов. // Научные труды «XXXII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция», том 2. — М.: МАТИ, 2006, с. 96–97.

11. Загребин Д. А., Программно-алгоритмическое обеспечение для регистрации, отображения и обработки сигналов биоэлектрической активности мозга. // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: Труды VI Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Центральный регион. Москва, 1–2 апреля 2009 г. — М.: Вузовская книга, 2009, с. 61–62.

12. Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое средство для оптимальной настройки алгоритмов вычисления десятичного логарифма при проведении испытаний измерительно-вычислительной техники. // Научные труды «XXXIV Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция», том 2. — М.: МАТИ, 2008, с. 86–87.

13. Загребин Д. А. Программное обеспечение электрокардиографа для мобильной выездной бригады скорой помощи. // Материалы XLVIII Международной научно-технической конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. — Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2010, с. 214.
14. Загребин Д. А., Технология «Plug and Play» в создании программного обеспечения для медицинских комплексов. // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: Труды VII Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Центральный регион. Москва, 21–22 апреля 2010 г. — М.: Вузовская книга, 2010, с. 41–42.
15. Павлова Н. В., Загребин Д. А. Комплексирование информации в интегрированном измерительно-вычислительном комплексе медицинского назначения. // Материалы XX Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, 2011. — Пенза: Изд-во ПГУ, 2011, с. 324–325.
16. Павлова Н. В., Загребин Д. А. Многоканальный мониторинг биоэлектрической активности в задаче комплексного исследования кровоснабжения головного мозга. // Труды XIX Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, 2010. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010, с. 284–285.
17. Павлова Н. В., Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое обеспечение медицинского цвето-звукового терапевтического приборного комплекса. // Сборник «Обеспечение качества на всех этапах жизненного цикла изделия». — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008, с. 324–330.
18. Павлова Н. В., Сергейчик В. В., Адашкин А. В., Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое обеспечение медицинского приборного комплекса аудио-визуальной и тактильной стимуляций. // Труды XVII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, 2008. — СПб.: ГУАП, 2008, с. 261.
19. Павлова Н. В., Сергейчик В. В., Загребин Д. А., Применение мобильных вычислительных систем в медицинских приборных комплексах. // Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции «Информационные и управляющие технологии в медицине», г. Пенза, 2007. — Пенза: АНОО «Приволжский дом знаний», 2007, с. 44–46.
20. Павлова Н. В., Сергейчик В. В., Загребин Д. А. Программно-алгоритмическое обеспечение измерительно-вычислительного комплекса для исследования биоэлектрической активности мозга. // Сборник «Проектно-конструкторские и производственные вопросы создания перспективной авиационной техники». — М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009, с. 257–263.
21. Погребниченко И. В., Филатов И. А., Сергейчик В. В., Загребин Д. А. Разработка средств комплексирования диагностической информации в единой базе данных. // Материалы V Всероссийского съезда трансплантологов, г. Москва, 2010. — М.: ООО «Издательство «Триада», 2010, с. 34.