

*На правах рукописи*



Алексейчук Андрей Сергеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ  
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО  
ОБУЧЕНИЯ НА БАЗЕ ВЕБ-КОНФЕРЕНЦИЙ**

Специальность 05.13.11 –

Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре «Математическая кибернетика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор  
**Пантелеев Андрей Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Данилюк Сергей Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры №32 Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (филиал в г. Серпухове Московской области)

**Сологуб Глеб Борисович,**  
кандидат физико-математических наук,  
аналитик ООО «Букмейт» (до 13.10.2016)

**Ведущая организация:** Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)

Защита состоится «16» июня 2017 года в 10 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.125.04 Московского авиационного института по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4 или на сайте МАИ по адресу:  
[http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=79486](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=79486)

Отзывы в 2 экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.04, кандидат физико-математических наук, доцент



Северина  
Наталья Сергеевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследования**

В настоящее время в инженерном образовании происходит широкое внедрение разнообразных информационных, компьютерных и технических средств. Быстро растущая доступность Интернета позволяет обеспечивать не только традиционную, асинхронную форму взаимодействия в процессе дистанционного обучения (работу с веб-сайтами, электронной почтой, отправку файлов с работами, поиск информации в базах знаний и т.п.), но и передавать мультимедийные данные в режиме реального времени. Рационально используя эту возможность, можно поднять качественное наполнение процесса дистанционного обучения на новый уровень. Применение мультимедийных технологий существенно обогащает образовательный процесс, позволяет легко визуализировать материал, делает обучение эффективным и увлекательным.

Одним из современных видов дистанционного обучения является веб-конференция. Эта технология позволяет обеспечивать коллективную форму обучения посредством обмена аудио- и видеоданными и работы с мультимедийными материалами в режиме реального времени. Веб-конференции позволяют проводить регулярные учебные занятия, воссоздающие модель реальных аудиторных занятий по различным дисциплинам.

При проведении занятий в форме веб-конференции существенным обстоятельством является необходимость эффективной организации учебного процесса. Это может быть достигнуто объединением студентов в группы в зависимости от их уровня подготовки и от сложности решаемых на занятии задач с отдельным проведением занятий для каждой группы. Поскольку преподавателю затруднительно точно оценить способности и подготовленность каждого студента до проведения занятий, то возникает необходимость создания информационной системы, автоматически анализирующей данные об успеваемости студентов и составляющей расписание проведения занятий с разбиением студентов на группы с учетом текущего уровня подготовки каждого студента и уровня сложности предлагаемых на занятии учебных заданий.

### **Цель и задачи исследования**

Цель диссертационной работы состоит в создании средств дистанционного обучения на базе технологий веб-конференции, поиске и реализации подходов к организации такого обучения в соответствии с индивидуальными способностями студентов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать форму дистанционного обучения в режиме веб-конференции с применением модели индивидуализации обучения каждого студента, использующей доступную информацию о студенте и о сложности предлагаемых заданий;
- разработать математическое обеспечение информационной системы, поддерживающей предложенную модель индивидуализации обучения;

- разработать программный комплекс, реализующий обучение в форме веб-конференции, имеющий средства проверки знаний студентов и включающий в себя указанную информационную систему;
- реализовать удобный пользовательский интерфейс программного комплекса, позволяющий проводить учебные веб-конференции, управлять учебным процессом, создавать и редактировать учебные задания.

**Объектом исследования** является математическое и программное обеспечение дистанционного обучения в режиме реального времени.

**Предметом исследования** являются математические модели, используемые для построения учебного процесса в режиме реального времени, и программные средства, реализующие поддержку дистанционного обучения с применением данных моделей.

**Область исследования** формулируется согласно пунктам паспорта специальности 05.13.11:

- модели, методы, алгоритмы, языки и программные инструменты для организации взаимодействия программ и программных систем;
- человеко-машинные интерфейсы; модели, методы, алгоритмы и программные средства машинной графики, визуализации, обработки изображений, систем виртуальной реальности, мультимедийного общения.

#### **Методологическая и теоретическая основа исследования**

Для решения поставленных задач использовались следующие методы: для решения теоретических задач – методы нечеткой логики, нейронные сети, численные методы; для практической реализации – методы объектно-ориентированного программирования с использованием различных технологий и языков программирования.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в данной работе разработан программный комплекс поддержки дистанционного обучения в режиме веб-конференции, предоставляющий возможности для изучения различных дисциплин в режиме реального времени и обладающий экспертной системой, позволяющей выстроить учебный процесс с учётом индивидуальных способностей каждого студента.

Научная новизна состоит в следующих положениях:

1. Создан программный комплекс MathConference, реализующий обучение в режиме веб-конференции и обладающий средствами и инструментами для проверки знаний по различным дисциплинам. Разработан принцип взаимодействия участников веб-конференции при проведении занятия в режиме реального времени, включая одновременное пошаговое решение учебных заданий под контролем преподавателя, и созданы соответствующие элементы интерфейса.

2. Предложен метод организации учебного процесса путем создания различных уровней сложности заданий для одного и того же занятия, а также проведения раздельных занятий с группами студентов, сформированных в соответствии со сложностью наборов заданий, включенных в каждый уровень. Разработаны структура и математическое описание нечеткой экспертной системы,

позволяющей реализовать предложенную форму учебного процесса. Данная экспертная система рассчитывает рекомендуемый уровень сложности каждого занятия для каждого студента, что позволяет автоматически составлять расписание занятий, формируя группы студентов с близким уровнем подготовки.

3. Разработаны структура и принципы взаимодействия компонентов информационно-образовательной системы, предложены принципы хранения и представления мультимедийных материалов учебных заданий, предназначенных для решения в режиме реального времени под контролем преподавателя.

**Достоверность результатов работы** обеспечивается корректным использованием математического аппарата и подтверждается экспериментальной проверкой работы разработанной информационной системы, а также использованием разработанного комплекса программ в учебных заведениях.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Метод индивидуализации траектории обучения студента при обучении в режиме веб-конференции и принцип построения индивидуальной траектории обучения посредством выбора рекомендуемого уровня сложности заданий для каждого студента перед проведением занятия.

2. Структура и математическое обеспечение функционирования иерархической нечеткой экспертной системы, реализующей предложенную математическую модель индивидуализации на основе методов нечеткой логики и нейронных сетей. Данная экспертная система обрабатывает экспертную информацию об уровне сложности каждого занятия и данные об успеваемости студентов и автоматически составляет расписание занятий, в котором каждому студенту назначен рекомендуемый уровень сложности занятий.

3. Программный комплекс системы дистанционного обучения, объединяющий систему поддержки веб-конференций и разработанную экспертную систему и обеспечивающий дистанционное обучение в режиме реального времени; принципы создания, архитектура и требования к компонентам программного комплекса.

4. Принципы работы с компонентами пользовательского интерфейса разработанного программного комплекса, предназначенными для проведения занятий в форме веб-конференции, управления учебным процессом, просмотра результатов обучения, создания учебных заданий.

**Практическая ценность** результатов работы состоит в том, что разработанный программный комплекс позволяет осуществлять дистанционное обучение различным дисциплинам в режиме реального времени посредством обмена аудио- и видеоданными и совместной работы с мультимедийными объектами. Благодаря этому становится возможным проводить занятия в онлайн-режиме при непосредственном участии преподавателя. Внедрение разработанной системы позволяет:

- проводить занятия со студентами, не имеющими возможности очно присутствовать в институте (студенты-инвалиды, студенты филиалов, студенты заочной формы обучения);

- проводить различные виды занятий: лекции, практические занятия, а также дополнительные занятия и консультации без необходимости присутствия участников в учебном заведении;

- организовывать эффективный учебный процесс благодаря наличию в составе комплекса экспертной системы, позволяющей индивидуализировать процесс обучения каждого студента.

### **Апробация результатов исследования**

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях и семинарах:

- Научно-техническая международная молодежная конференция «Системы, методы, техника и технологии обработки медиаконтента» (Москва, МГУП им. И. Федорова, 2011 г.);
- XI научно-практическая межвузовская конференция молодых ученых и студентов «Молодые ученые – нашей новой школе» (Москва, МГППУ, 2012 г.);
- II международная научно-практическая конференция «Психологическая помощь социально незащищённым лицам с использованием дистанционных технологий (Интернет-консультирование и дистанционное обучение)» (Москва, МГППУ, 2012 г.);
- 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012» (Москва, МАИ, 2012 г.);
- Международная научно-методическая конференция «Информатизация инженерного образования» (ИНФОРИНО) (Москва, МЭИ, 2012 г.);
- XVII, XVIII, XIX Международные конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011, ВМСППС'2013, ВМСППС'2015, г. Алушта);
- VIII, IX научно-практические конференции молодых ученых и студентов «Инновационный менеджмент в аэрокосмической промышленности» (Москва, МАИ, 2012-2013 гг.);
- XI научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Инновации в экономике и менеджменте в авиации» (МАИ, 2015 г.);
- XII научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Инновации в экономике и менеджменте в аэрокосмической промышленности» (Москва, МАИ, 2016 г.);
- Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронеж, ВГУ, 2016 г.);
- Научные семинары Института проблем информатики РАН (2016 г.), кафедры «Математическая кибернетика» МАИ (НИУ) (2013-2017 гг.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, из них 3 работы в журналах, входящих в перечень ВАК (1 статья из журнала, индексируемого в БД Scopus, 1 статья в соавторстве), 17 статей в других журналах и сборниках материалов конференций (1 статья в соавторстве), 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

## **Структура и объём диссертации**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 137 машинописных страниц. Текст диссертации содержит 51 рисунок и 8 таблиц. Список литературы содержит 123 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведен обзор публикаций в области программного и математического обеспечения систем дистанционного обучения, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первой главе** приведено сравнение существующих систем веб-конференций, обоснована необходимость разработки программного комплекса, реализующего обучение различным дисциплинам в режиме реального времени. Представлены функциональные и нефункциональные требования к проектируемой программной системе дистанционного обучения и ко всем ее компонентам. В соответствии с результатами анализа требований произведен выбор технологий разработки каждого компонента программной системы.

Разработанная система дистанционного обучения (СДО) MathConference представляет собой программный комплекс, т. е. набор программных компонентов, выполняющих взаимосвязанные функции, обменивающихся информацией при помощи специальных протоколов передачи данных и составляющих единое средство для решения поставленной задачи. В главе приводятся функциональные требования к программному комплексу в целом: поддержка работы в многопользовательском режиме с возможностью доступа к системе через Интернет; поддержка функций, позволяющих обеспечивать всестороннее взаимодействие участников в режиме реального времени (общение в режиме веб-конференции, показ презентаций, работа с виртуальной доской, обмен файлами, показ своего рабочего стола, средства решения учебных заданий с использованием WYSIWYG-редактора); поддержка функций создания и редактирования учебных материалов с возможностью отображения формул, рисунков, графиков, текста, произвольных изображений. СДО также должна реализовывать модель построения индивидуального учебного процесса для каждого студента с учетом его текущей успеваемости.

Нефункциональные требования к разрабатываемой СДО сформулированы в виде ряда общих характеристик, предъявляемых к программному обеспечению: доступность, надежность, масштабируемость, безопасность, удобство поддержки, производительность, платформонезависимость и т. д.

Далее в главе приводится клиент-серверная модель, позволяющая реализовать указанные требования, и состав компонентов программного комплекса: клиентское веб-приложение, серверное веб-приложение, мультимедийный сервер, HTTP-сервер, СУБД и редактор учебных заданий. Приводятся функциональные и нефункциональные требования к каждому компоненту. Например, функциональные требования к мультимедийному серверу включают требование поддержки передачи аудио- и видеопотоков и наличие инструментов синхрони-

зации событий, а нефункциональные требования включают требования к стабильности и бесперебойности работы сервера с типичной нагрузкой.

Исходя из результатов анализа требований, для разработки программного комплекса были выбраны следующие технологии: для разработки серверного веб-приложения выбран фреймворк Ruby on Rails; в качестве СУБД выбрана PostgreSQL; для реализации клиентского веб-приложения и редактора учебных заданий выбрана технология Adobe Flash; для разработки мультимедийного сервера – сервер Red5.

**Вторая глава** посвящена построению математической модели индивидуализации процесса обучения каждого студента путем выбора рекомендуемого уровня сложности занятий. Приведено обоснование необходимости соответствия сложности предлагаемых заданий уровню подготовки каждого студента. Если студенту попадаются слишком легкие задачи, то он быстро справляется с ними и вынужден ждать, пока все остальные выполнят поставленную задачу, а потенциал студента остается нераскрытым. Если задача слишком сложная для какого-либо студента, то это замедляет темп совместной работы, а в случае получения им неудовлетворительной оценки потребуются проведение дополнительных занятий, что приведет к дополнительной трате временных ресурсов. Поэтому имеет смысл разделять студентов на группы и проводить занятия раздельно с использованием заданий различных уровней сложности.

В главе предложена модель процесса обучения в режиме реального времени, где для каждого занятия составляются задания нескольких уровней сложности, и приводится постановка задачи формирования индивидуальной траектории обучения студента.

**Определение.** *Индивидуальная траектория обучения студента* – это последовательность пар вида  $\langle \text{номер занятия; номер уровня сложности решаемых студентом на занятии задач} \rangle$ .

Пусть учебным планом по дисциплине предусмотрено некоторое количество занятий  $N$ . Обозначим через  $i \in \{1, \dots, N\}$  номер текущего занятия, для которого составляется расписание. Модель занятия в рассматриваемой СДО представляет собой кортеж

$$(M_i, (X_{i1}, \bar{C}_i(1)), (X_{i2}, \bar{C}_i(2)), \dots, (X_{iM_i}, \bar{C}_i(M_i))), \quad i \in \{1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где  $M_i$  – количество уровней сложности  $i$ -го занятия,  $X_{i1}, \dots, X_{iM_i}$  – текстовые, графические и формульные материалы для каждого уровня сложности, хранящиеся в базе данных,  $\bar{C}_i(1), \dots, \bar{C}_i(M_i)$  – экспертные оценки сложности каждого уровня, заданные преподавателем. Для составления экспертных оценок для студентов различного уровня подготовки студенты делятся на три нечетких класса: «сильные», «средние», «слабые». Оценка сложности для  $j$ -го уровня представляется вектором  $\bar{C}_i(j) = (C_{i1}(j), C_{i2}(j), C_{i3}(j))$ , где  $C_{i1}(j) \in [0, 1]$  – оценка сложности  $j$ -го уровня  $i$ -го занятия для класса «сильные»,  $C_{i2}(j)$  –



оценка сложности для класса «средние»,  $C_{i3}(j)$  – оценка для класса «слабые»,  $j \in \{1, \dots, M_i\}$ .

В качестве модели студента используются тройки величин  $\langle \langle w \rangle_1^{i-1}, w_{i-1}, \bar{D} \rangle$ ,

где  $w_{i-1} \in [0; 1]$  – оценка, полученная студентом за предыдущее занятие (при наличии);  $\bar{D}$  – вектор, содержащий данные о начальной успеваемости студента: средний балл в аттестате, оценку в аттестате по данной дисциплине, оценку за ЕГЭ по дисциплине, средний балл за ЕГЭ по всем предметам, оценки за вступительный тест и первую контрольную работу;  $\langle w \rangle_1^{i-1} \in [0; 1]$  – средневзвешенная сумма оценок, полученных студентом по данной дисциплине с первого до  $(i-1)$ -го занятия включительно (при их наличии), вычисляемая по формуле:

$$\langle w \rangle_1^{i-1} = \frac{\sum_{k=1}^{i-1} e^{-\beta(i-k-1)} w_k}{\sum_{k=1}^{i-1} e^{-\beta(i-k-1)}} \quad \text{при } i \geq 2, \quad (2)$$

где  $w_k \in [0; 1]$  – оценка за  $k$ -е занятие,  $k = 1, \dots, N$ ;  $\beta \in [0, \beta_{\max}]$  – задаваемый преподавателем параметр, характеризующий скорость уменьшения влияния предыдущих оценок на средневзвешенную сумму и позволяющий учесть изменение подготовленности студента по данной дисциплине со временем.

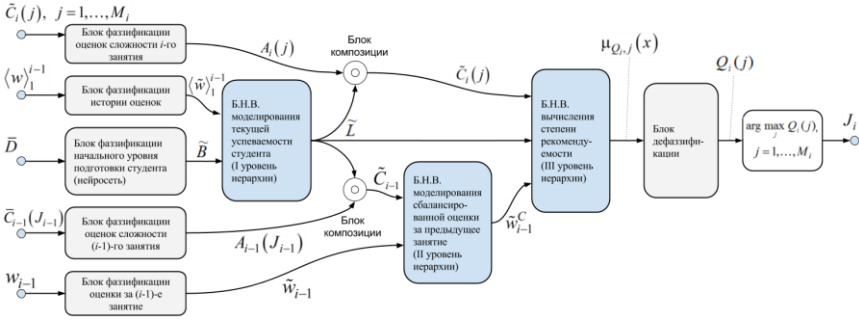
Требуется создать модель работы информационной системы, формирующей индивидуальную траекторию обучения каждого студента. Для этого требуется вычислить рекомендуемый номер уровня  $J_i$  текущего занятия для каждого студента с использованием всей доступной информации, содержащейся в модели студента и модели занятия, т.е.

$$J_i = J_i \left( \langle w \rangle_1^{i-1}, w_{i-1}, \bar{D}, \bar{C}_{i-1}(J_{i-1}), \{ \bar{C}_i(j) \}_{j=1}^{M_i} \right), \quad i \geq 2. \quad (3)$$

**Определение.** *Степень рекомендуемости* – это числовой параметр  $Q_i(j) \in [0; 1]$ , соответствующий данному студенту и  $j$ -му уровню сложности  $i$ -го занятия и отражающий соответствие этого уровня сложности текущему уровню подготовки студента.

Рекомендуемый уровень сложности для студента определяется из условия достижения максимума степени рекомендуемости:  $J_i = \arg \max_{j \in \{1, \dots, M_i\}} Q_i(j)$ . Вы-

числение  $J_i$  производится экспертной системой, входящей в состав разработанной СДО и состоящей из следующих компонентов: пяти блоков фаззификации, двух блоков композиции, трех блоков нечеткого вывода и блока дефаззификации (рис. 1).



**Рис. 1. Структурная схема иерархической нечеткой экспертной системы**

Блок фаззификации оценок сложности  $i$ -го занятия осуществляет фаззификацию оценок сложности  $j$ -го уровня текущего занятия, представленных вектором  $\vec{C}_i(j) = (C_{i1}(j), C_{i2}(j), C_{i3}(j))$ . В качестве функций принадлежности термов всех лингвистических переменных использованы треугольные и трапециевидные функции. Выход блока – матрица  $A_i(j) = \|a_{kp,i}(j)\|$ , где  $a_{kp,i}(j) = \mu_C^k(C_{ip}(j))$ ,  $k = \overline{1,3}$ ,  $p = \overline{1,3}$ ,  $j = 1, \dots, M_i$ .

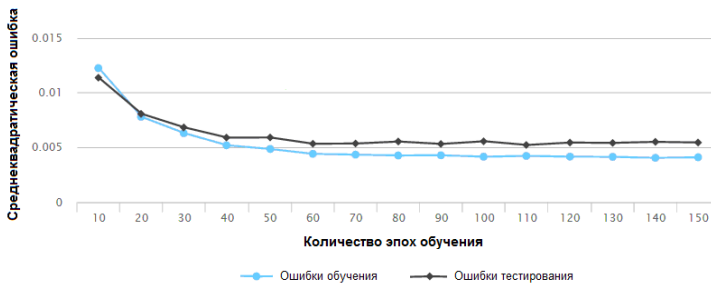
Следующий за блоком фаззификации блок композиции осуществляет вычисление вектора  $\tilde{C}_i(j)$ , соответствующего степеням принадлежности сложности  $j$ -го уровня занятия для данного студента термам лингвистической переменной  $C$  «сложность занятия» с терм-множеством  $T_C = \{\text{«высокая»}, \text{«средняя»}, \text{«низкая»}\}$ . Вычисление производится при помощи оператора максиминной композиции по формуле  $\tilde{C}_i(j) = A_i(j) \circ \vec{L}$ , где  $A_i(j)$  – матрица, представляющая результат фаззификации компонент вектора  $\vec{C}_i(j)$ ,  $\vec{L}$  – вектор, представляющий значение лингвистической переменной  $L$  «текущая успеваемость» с терм-множеством  $T_L = \{\text{«высокая»}, \text{«средняя»}, \text{«низкая»}\}$ . Компоненты вектора  $\tilde{C}_i(j)$  вычисляются по формуле

$$\tilde{C}_{k,i}(j) = \max_{p=1,3} \min \{a_{kp,i}(j), L_p\}, \quad k = \overline{1,3}. \quad (4)$$

Блок фаззификации оценок сложности  $(i-1)$ -го занятия и следующий за ним блок композиции работают аналогично блоку фаззификации оценок сложности  $i$ -го занятия и следующего за ним блока композиции.

Блок фаззификации оценки за  $(i-1)$ -е занятие и блок фаззификации взвешенной суммы оценок осуществляют вычисление векторов, соответствующих степеням принадлежности этих величин термам лингвистической переменной  $W$  «оценка за занятие» с терм-множеством  $T_W = \{\text{«отлично»}, \text{«хорошо»}, \text{«удовлетворительно»}, \text{«неудовлетворительно»}\}$ .

Блок фаззификации начального уровня подготовки студента моделирует начальный уровень успеваемости каждого студента путем нечеткой классификации, т.е. вычисления степени принадлежности студента трем нечетким классам: «сильные», «средние» и «слабые». Вход блока – вектор данных о начальной успеваемости студента  $\bar{D}$  с координатами, приведенными линейным преобразованием к отрезку  $[-1, 1]$ . Выход блока – вектор  $\tilde{B} = \|b_i\|$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , где  $b_i$  – степень принадлежности студента  $i$ -му классу. Нечеткая классификация производится при помощи нейронной сети. Выбор архитектуры сети, функции активации нейронов, алгоритма обучения и числа эпох обучения сети произведен экспериментально путем изменения этих параметров и анализа изменения величины среднеквадратических ошибок обучения и тестирования. Использована выборка из 220 записей о студентах, разделенная на 170 обучающих и 50 тестовых записей. Пример анализа зависимости ошибок обучения и тестирования от количества эпох обучения для выбранной конфигурации сети приведен на рис. 2. Из графика видно, что после 70 итераций ошибка тестирования перестает уменьшаться, что и обусловило выбор данного количества эпох для обучения сети.



**Рис. 2. Зависимость среднеквадратических ошибок обучения и тестирования от количества эпох обучения**

В окончательной конфигурации нейронная сеть имеет 6 входных нейронов, 2 скрытых слоя (4 нейрона в первом скрытом слое, 5 нейронов во втором) и 3 нейрона выходного слоя. Функция активации нейронов скрытых слоев – симметричная сигмоидная, описываемая формулой  $f_z(x) = \frac{2}{1 + e^{-zx}} - 1$  с крутизной функции активации  $z = 0,7$ . Алгоритм обучения – эластичный алгоритм обратного распространения ошибки.

Следующие друг за другом три блока нечеткого вывода образуют иерархическую систему, где результаты работы первого и второго блоков не подвергаются дефаззификации, а непосредственно передаются на вход третьего блока. Структура базы знаний каждого из блоков представляется в виде набора лингвистических правил вида «Если  $x_1$  есть  $A_{11}$  и  $x_2$  есть  $A_{12}$  и ... и  $x_p$  есть

$A_{lp}$ , то  $y$  есть  $B_l^m$ »,  $l=1, \dots, L$ , где  $l$  – порядковый номер правила,  $L$  – количество правил вывода блока,  $x_1, \dots, x_p$  – входные лингвистические переменные,  $A_{l1}, \dots, A_{lp}$  – термы входных переменных,  $y$  – выходная лингвистическая переменная,  $B_l^m$  ( $m=1, \dots, K_y$ ) –  $m$ -й терм выходной переменной, находящийся в заключении  $l$ -го правила,  $K_y$  – количество термов выходной переменной,  $p$  – количество входных переменных блока.

Блок нечеткого вывода I-го уровня иерархии моделирует текущую успеваемость студента, исходя из его истории оценок по дисциплине и начального уровня подготовки. Блок нечеткого вывода II-го уровня иерархии вычисляет сбалансированную оценку за предыдущее занятие, т.е. оценку, скорректированную с учётом соответствия сложности данной задачи уровню подготовки студента. Блок нечеткого вывода III-го уровня иерархии вычисляет агрегированную функцию принадлежности  $\mu_{Q,i,j}(x)$  лингвистической переменной  $Q$  «степень рекомендуемости» с терм-множеством  $T_Q = \{\text{«очень высокая»}, \text{«высокая»}, \text{«средняя»}, \text{«ниже среднего»}, \text{«низкая»}\}$  для  $j$ -го уровня  $i$ -го занятия. Каждый из блоков нечеткого вывода использует схему нечёткого вывода Мамдани, включающую следующие этапы.

Первый этап – нахождение степени истинности antecedента каждого правила с использованием  $t$ -нормы, в качестве которой используется операция вычисления минимума:  $\alpha_l = \min_{k=1, \dots, p} A_{lk}$ ,  $l=1, \dots, L$ .

Второй этап – процедура нахождения степени принадлежности выходной переменной  $\tilde{y}$  термам выходной переменной блока. Пусть  $\{l_m\}$  – множество номеров правил вывода, содержащих в заключении  $m$ -й терм выходной переменной  $B_l^m$ . Тогда в блоках I и II уровня иерархии  $m$ -я компонента  $\tilde{y}_m$  вектора выходной переменной  $\tilde{y}$  будет определяться по формуле:

$$\tilde{y}_m = \max_{l \in \{l_m\}} \{\alpha_l\} = \max_{l \in \{l_m\}} \left\{ \min_{k=1, \dots, p} A_{lk} \right\}, \quad m=1, \dots, K_y. \quad (5)$$

Для I и II блоков на этом этапе алгоритм работы заканчивается, и вектор выходной переменной  $\tilde{y}$  передается на следующий уровень иерархии вывода. В III блоке предусмотрены еще два этапа – активизация подзаключений и агрегация. Пусть  $\mu_{Q_m}(x)$  – функция принадлежности  $m$ -го терма выходной переменной  $Q$ . Активизация подзаключений – это построение усечённых функций принадлежности  $\mu_{Q_m,i,j}^*(x)$  для  $j$ -го уровня сложности  $i$ -го занятия:

$$\mu_{Q_m,i,j}^*(x) = \min \{ \mu_{Q_m}(x), \tilde{y}_m \}, \quad m=1, \dots, K_y. \quad (6)$$

Агрегация представляет собой объединение полученных усечённых функций принадлежности:  $\mu_{Q_i,j}(x) = \max_{m=1,\dots,K_y} \mu_{Q_m^*,i,j}(x)$ .

Блок дефаззификации вычисляет окончательное значение степени рекомендуемости  $Q_i(j)$  методом поиска «центра тяжести»:

$$Q_i(j) = \frac{\int_0^1 x \mu_{Q_i,j}(x) dx}{\int_0^1 \mu_{Q_i,j}(x) dx}. \quad (7)$$

Интегралы в (7) вычисляются численно с использованием метода трапеций. По результатам расчетов составляется расписание, где каждому студенту назначен уровень  $J_i$  с наибольшим значением степени рекомендуемости.

При проведении занятий после решения каждого учебного задания студентам выставляются оценки, рассчитываемые формуле

$$w(p, t) = \frac{n-t}{n} (0,6 + 0,4e^{-0,1p}) \cdot 100\%, \quad (8)$$

где  $w(p, t) \in [0, 100\%]$  – оценка за задание,  $p$  – количество допущенных ошибок,  $t$  – количество нерешенных шагов задания. Данная формула учитывает условие, что при отсутствии нерешенных шагов оценка за задание должна быть положительной (не менее 60%).

В конце главы приведен пример расчета траектории обучения студента (рис. 3). При получении студентом низких оценок экспертная система начинает предлагать ему более простые уровни последующих задач, а после получения высоких оценок траектория ожидаемо возвращается к более сложным уровням.

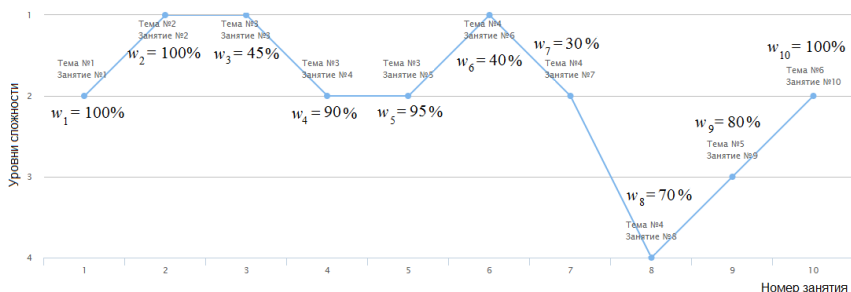


Рис. 3. Пример траектории обучения студента

В третьей главе приведено описание разработанной архитектуры программного комплекса MathConference, описаны технологии разработки, форматы хранения данных и способы обмена информацией между его компонентами.

Приведена структура компонентов программного комплекса, логическая структура базы данных, структура классов компонентов СДО и экспертной системы.

Клиентское веб-приложение построено на основе технологии Flash по модульному принципу. Модули имеют в своем составе средство синхронизации, называемое общими объектами. Каждый общий объект в составе клиентского приложения (локальный общий объект) имеет соответствующий общий объект в памяти мультимедийного сервера (удаленный общий объект).

Мультимедийный сервер служит для приёма и передачи аудио- и видеопотоков клиентским компьютерам по протоколу RTMP и для синхронизации событий при помощи общих объектов. Каждое событие, происходящее в виртуальной аудитории и подлежащее синхронизации в режиме реального времени, обрабатывается соответствующим общим объектом на мультимедийном сервере и рассылается клиентским приложениям.

В главе приводится структура данных, предназначенная для хранения учебных заданий, представляющих собой упорядоченное множество шагов  $P = (S_1, S_2, \dots, S_n)$ , где  $n$  – количество шагов задания. Каждый из этих шагов можно представить в виде множества  $S_k = (D_k, E_k, Q_k, H_k)$ , где  $k = 1, \dots, n$ ;  $D_k$  – множество элементов формул  $k$ -го шага, включающее множество скрытых элементов  $D_{Rk}$  и множество видимых элементов  $D_{Fk}$ ;  $E_k$  – палитра элементов для составления ответа;  $Q_k$  – множество текстовых полей для свободного ввода, включающее статические поля  $Q_{Fk}$  и поля для ввода текстовых значений  $Q_{Rk}$ ;  $H_k$  – совокупность графических примитивов (линий, точек, окружностей и т.д.), образующих графические материалы  $k$ -го шага задания. Для хранения и передачи данных в процессе решения учебных заданий указанная структура учебного задания отображается на иерархическую структуру данных в формате XML. Множество  $S_k$  представлено набором узлов, являющихся дочерними узлами корневого узла XML-документа. Параметры всех элементов (координаты, цвет и т.д.) задаются атрибутами соответствующих узлов XML-документа.

Рассмотрим процесс взаимодействия студента и преподавателя при решении задачи. При переходе к  $k$ -му шагу клиентское приложение добавляет новое рабочее поле в конец прокручиваемой области и отображает на нем видимые элементы формул  $D_{Fk}$ , палитру  $E_k$ , рисунки  $H_k$ , текстовые поля  $Q_{Fk}$  и пустые поля свободного ввода  $Q_{Rk}$   $k$ -го шага. Студент вводит ответ  $G_k^0 = D_k^0 \cup Q_k^0$ , состоящий из выбранных им элементов палитры  $D_k^0$  и введенных значений текстовых полей  $Q_k^0$ , и отправляет его на проверку преподавателю.

Преподаватель сравнивает ответ студента с правильным ответом, состоящим из множества  $D_k$  и правильных значений текстовых полей  $Q_k$ . В случае,

если  $G_k^0 = D_{Rk} \cup Q_{Rk}$  (введенные элементы ответа совпадают с невидимыми элементами и значения, введенные в текстовые поля, верны), то преподаватель засчитывает ответ как правильный. Если же какой-либо элемент ответа неверен, то преподаватель указывает допущенные ошибки и делает устное разъяснение. Проанализировав результат проверки, студент удаляет с поля неправильные элементы и набирает исправленный вариант, а также вводит в текстовые поля новые значения, после чего преподаватель проверяет новый вариант решения.

**В четвертой главе** приведено описание интерфейса СДО MathConference. Описан порядок работы студентов и преподавателей с веб-интерфейсом, с клиентским приложением и с редактором заданий. Приведены примеры практического использования разработанного программного комплекса.

Работа с системой начинается с ввода данных учетной записи и перехода на главную страницу веб-интерфейса СДО. Преподаватель может просматривать текущие оценки студентов в табличном виде в разрезе дисциплин, тем и занятий. Формирование расписания занятий происходит при помощи экспертной системы.

Интерфейс клиентского приложения для проведения веб-конференций показан на рис. 4. На рабочем поле находятся окна преподавателя и студентов. Доступна функция текстового чата, с помощью которого все участники могут в любой момент обмениваться текстовыми сообщениями. Показ дополнительного визуального материала поддерживается функцией демонстрации презентации. Преподаватель может делать пометки поверх презентации, и эти пометки видят все участники.



Рис. 4. Интерфейс клиентского приложения

Виртуальная доска – это мультимедийное средство, которое выполняет те же функции, что и обычная доска в аудитории. Доступна возможность изменения цвета и толщины линий, а также функция вертикальной прокрутки доски. Содержимое виртуальной доски синхронизируется в режиме реального времени у всех участников конференции.

Доступна функция демонстрирования преподавателем своего рабочего стола. Она может быть полезна для демонстрирования веб-сайтов, обучающих программ и других материалов непосредственно со своего компьютера. Также доступна функция быстрого обмена файлами с участниками конференции.

Функция решения учебных заданий (рис. 5) позволяет всем присутствующим в веб-конференции студентам одновременно решать задачи в режиме реального времени под контролем преподавателя. В левой части окна у преподавателя отображается решение текущей задачи, а в правой – ответы студентов на текущий шаг задания. Преподаватель проверяет результаты решения каждого студента и указывает ошибки и неточности. При этом сохраняется визуальный контакт и возможность устного общения между преподавателем и студентами.

Для создания учебных заданий предусмотрен редактор с библиотекой математических символов для набора формул и инструментами рисования, позволяющими изображать различные фигуры – линии, окружности, стрелки, прямоугольники, осуществлять рукописный ввод, добавлять изображения из графических файлов.

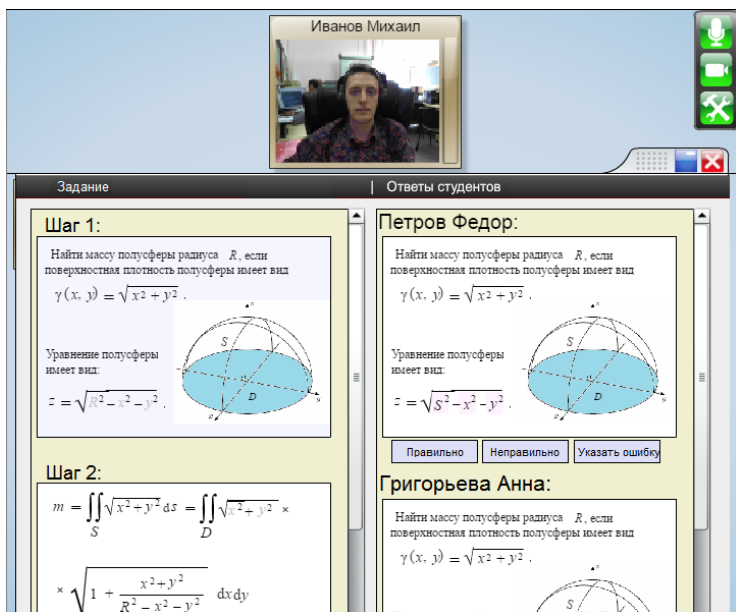


Рис. 5. Функция решения учебных заданий



Перечисленные инструменты позволяют создавать мультимедийные материалы с использованием текста, графиков, схем, формул, рисунков, что позволяет формировать учебные задания по широкому кругу учебных дисциплин, включая математические.

В **заключении** подведены итоги работы, отражены основные результаты диссертации.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Основным итогом диссертационной работы является разработка математических методов и программного комплекса для реализации одной из форм дистанционного обучения на базе веб-конференций в режиме реального времени, что выразилось в достижении следующих научных и практических результатов.

1. Разработан метод индивидуализации траектории обучения студента при обучении в режиме веб-конференции, предложена модель одной из дистанционных форм учебного процесса, включающей обучение в режиме реального времени, разработан принцип построения индивидуальной траектории обучения посредством выбора рекомендуемого уровня сложности заданий для каждого студента перед проведением занятия [3, 16, 20, 21].

2. Разработана структура иерархической нечеткой экспертной системы, реализующей предложенную математическую модель индивидуализации процесса обучения каждого студента. Экспертная система обрабатывает экспертную информацию об уровне сложности каждого занятия и данные об успеваемости студентов и автоматически составляет расписание занятий, в котором каждому студенту назначен рекомендуемый уровень сложности занятий. Разработано математическое обеспечение функционирования экспертной системы на основе методов нечеткой логики и нейронных сетей [3, 16, 17, 20].

3. Разработаны принципы создания, архитектура и требования к компонентам программного комплекса, объединяющего систему поддержки веб-конференций и экспертную систему и обеспечивающего дистанционное обучение в режиме реального времени [2, 16].

4. Выполнена реализация программного комплекса системы дистанционного обучения MathConference, включающего веб-приложение для проведения учебных веб-конференций, редактор учебных заданий, серверное приложение с экспертной системой, мультимедийный сервер, СУБД и веб-сервер. Реализованы методы взаимодействия между компонентами программного комплекса, разработаны структуры данных, используемых для хранения и передачи информации [1, 2, 4, 5, 9, 11].

5. Реализованы пользовательские интерфейсы компонентов комплекса, предназначенные для проведения занятий в форме веб-конференции, управления учебным процессом, просмотра результатов обучения, создания учебных заданий, администрирования системы [2, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 18].

Разработанные программные средства создают современную систему дистанционного обучения с дружественным интерфейсом, позволяющую организовывать эффективное онлайн-обучение для различных категорий студентов, в том числе студентов-инвалидов.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. *Алексейчук А. С.* Принципы разработки телекоммуникационных образовательных систем на базе веб-конференций // Информационные и телекоммуникационные технологии, №14, 2012. – С. 31–36.

2. *Алексейчук А. С.* Контроль качества подготовки студентов по математическим дисциплинам в форме веб-конференции // Информационные и телекоммуникационные технологии, №19, 2013. – С. 16–21.

3. *Алексейчук А. С., Пантелеев А. В.* Индивидуализация процесса обучения в режиме веб-конференции на основе иерархической нечеткой экспертной системы // Информатика и её применения, т. 11, вып. 1, 2017. – С. 90-99 (Scopus).

### Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ

4. *Алексейчук А. С.* Клиентское приложение программного комплекса для проведения дистанционного обучения в форме веб-конференций // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2016662322 от 07.11.2016 г.

5. *Алексейчук А. С.* Мультимедийный серверный компонент программного комплекса для проведения дистанционного обучения в форме веб-конференций // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2016662678 от 17.11.2016 г.

### Публикации в других изданиях

6. *Алексейчук А. С.* Система поддержки онлайн-обучения на базе веб-конференций // Научно-техническая международная конференция «Системы, методы, техника и технологии обработки медиаконтента». Сборник тезисов. – М.: МГУП им. И. Федорова, 2011. – С. 7-8.

7. *Алексейчук А. С.* Интернет-семинары как форма дистанционного проведения занятий // Материалы XVII международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. – М.: МАИ, 2011. – С. 776-777.

8. *Алексейчук А. С.* Системы дистанционного обучения на базе веб-конференций // Труды международной конференции «Информатизация инженерного образования» ИНФОРИНО-2012. – М.: МЭИ, 2012. – С. 343-344.

9. *Алексейчук А.С., Айсмонтас Б. Б., Пантелеев А. В.* Телекоммуникационные системы дистанционного обучения // Проблемы авиационного, космонавтики и ракетостроения. Сб. науч. тр. – М.: «Ваш полиграфический партнер», 2012. – С. 374–379.

10. *Алексейчук А. С.* Применение технологии веб-конференций для изучения математических методов в экономике // Научный альманах. Вып. 16: Материалы VIII научно-практической конференции «Инновационный менеджмент в аэрокосмической промышленности». – М.: «Доброе слово», 2012. – С. 142-148.

11. *Алексейчук А. С.* Использование телекоммуникационных технологий для создания систем онлайн-обучения // Молодые ученые – нашей новой школе. Материалы XI научно-практ. конф. – М.: МГППУ, 2012. – С. 440-441.

12. *Алексейчук А. С.* Применение веб-конференций с расширенными функциями в дистанционном обучении // Психологическая помощь социально неза-

щённым лицам с использованием дистанционных технологий (Интернет-консультирование и дистанционное обучение). Материалы II международной конференции. – М.: МГППУ, 2012. – С. 194-200.

13. *Алексейчук А. С.* Интерактивная среда для обучения решению математических задач в режиме веб-конференции // Материалы 11-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012». – СПб.: Мастерская печати, 2012. – С. 369-370.

14. *Алексейчук А. С.* Применение веб-конференций для подготовки студентов Инжэкин к контрольным работам по математическим дисциплинам // Научный альманах. Вып. 17: Материалы IX конф. «Инновационный менеджмент в аэрокосмической промышленности». – М.: «Доброе слово», 2013. – С. 174–179.

15. *Алексейчук А. С.* Интерактивная среда для решения математических задач в форме web-конференции // Материалы XVIII Международной конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2013), Алушта. – М.: МАИ, 2013. – С. 830–832.

16. *Алексейчук А. С.* Применение экспертной системы для индивидуализации процесса обучения студентов в режиме веб-конференции // Научный альманах. Вып. 20: Материалы XI научно-практ. конф. «Инновации в экономике и менеджменте в авиации». – М.: «Доброе слово», 2015. – С. 174–182.

17. *Алексейчук А. С.* Индивидуализация процесса обучения студентов в режиме веб-конференции при помощи интеллектуальной экспертной системы // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015). – М.: МАИ, 2015. – С. 707–709.

18. *Алексейчук А. С.* Программная система для обучения студентов экономических специальностей в режиме веб-конференции // Научный альманах. Вып. 21: Мат. XII конф. «Инновации в экономике и менеджменте в аэрокосмической промышленности». – М.: «Доброе слово», 2016. – С. 190–198.

19. *Алексейчук А. С.* Технологии построения систем дистанционного обучения на базе веб-конференций // Мат-лы XI Междунар. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях, 2016. – М.: Изд-во МАИ, 2016. – С. 547-549.

20. *Алексейчук А. С.* Построение индивидуальной траектории обучения студента при помощи экспертной системы // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж: «Научно-исследовательские публикации», 2016. – С. 349-351.

21. *Алексейчук А. С.* Модель взаимодействия студентов и преподавателя при решении учебных заданий в режиме реального времени // Научный альманах. Вып. 22: Материалы XIII Научно-практ. конф. «Инновационный менеджмент в авиационной промышленности». – М.: «Доброе слово», 2017. – С. 200-206.