

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Серия
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
Выпуск 14

№ 10(97)

Межвузовский сборник научных статей
Издается с января 2004 г.

2012



Волгоград
2012

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

*Сборник входит в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ
для публикации трудов соискателей ученых степеней*

Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»
академик РАН И. А. Новаков

Редакционная коллегия серии:

засл. деят. науки РФ д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *В. А. Камаев* (научный редактор)

д-р техн. наук, профессор БрГТУ *В. И. Аверченков*

д-р техн. наук, профессор ПензГУ *А. М. Бершадский*

д-р хим. наук, профессор ВолгГТУ *Л. Н. Бутенко*

д-р техн. наук, профессор МГТУ СТАНКИН *Г. Д. Волкова*

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. С. Горобцов*

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. М. Дворянкин*

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. В. Заболеева-Зотова*

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. Г. Кравец*

д-р техн. наук, профессор ТагГРТУ *В. М. Курейчик*

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *В. С. Лукьянов*

д-р техн. наук, профессор АстрГТУ *И. Ю. Петрова*

д-р техн. наук, профессор АстрГТУ *О. М. Проталинский*

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. Н. Шилин*

д-р техн. наук, профессор *Юрген Баст* (Технический ун-т Горной Академии, г. Фрайберг, Германия)

д-р философии *Ле Квет Тан* (Университет г. Канто, Вьетнам)

д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *С. А. Фоменков* (ответственный секретарь)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст.
№ 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 204 с. (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 14).
ISBN 978–5–9948–1013–2

Содержит работы ученых высших учебных заведений России по следующей тематике: математическое моделирование и численные методы, системный анализ и обработка информации, управление в социальных и экономических системах, автоматизированное проектирование, построение сетей и защита информации.

Ил. 80. Табл. 37. Библиогр.: 340 назв.

ISBN 978–5–9948–1013–2

© Волгоградский государственный
технический университет, 2012

Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

<i>Багаутдинов В. Р., Ураксеев М. А.</i> Методы контроля ходовой части железнодорожного транспорта. Тепловизионный метод.....	5
<i>Бандурин Н. Г.</i> Программа для автоматического решения систем существенно нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений (двумерные задачи).....	10
<i>Васильев П. С., Рева С. Л., Рева Л. С., Голованчиков А. Б.</i> Критериальная зависимость для испарения одиночной капли жидкости на поверхности нагрева.....	13
<i>Голованчиков А. Б., Дулькина Н. А., Миняйло В. В.</i> Моделирование процессов усреднения концентраций в аппаратах с комбинированной структурой потоков.....	19
<i>Голованчиков А. Б., Меренцов Н. А., Балашов В. А., Орлянкина Я. А.</i> Моделирование гидромеханических и тепло- и массообменных процессов в вентиляторной градирне с капельным орошением и проволоочной насадкой.....	22
<i>Клочков Ю. В., Николаев А. П., Киселева Т. А.</i> Анализ НДС произвольной непологой оболочки в форме компенсатора с использованием векторной интерполяции полей перемещений.....	28
<i>Коротеев М. В.</i> Аналитическая дефазификация нечетких чисел.....	32
<i>Михайлов В. К., Плешаков И. А.</i> Принцип построения алгоритма управления состоянием линейных инерционных объектов.....	36
<i>Чивилёв А. Д.</i> Алгоритм расчета торсионного люфтовывирателя для механического привода зеркальных антенн.....	41
<i>Элькин М. Д., Джалмухамбетова Е. А., Гайсина А. Р., Алыкова О. М.</i> Моделирование структуры дофимина и адреналина.....	47
<i>Элькин П. М., Эрман М. А., Карташов В. М.</i> Математическое моделирование структуры и динамики димеров урацила и азаурацилов.....	55
<i>Эрман Е. А., Элькин П. М., Стефанова Г. П., Равчеева Н. А.</i> Программно-алгоритмическая поддержка задач молекулярного моделирования.....	63

Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Артемов Е. М., Привалов О. О., Цветков А. А., Петров В. О.</i> Исследование алгоритмов фильтрации аномальных данных в задаче стереоскопического зрения роботов.....	68
<i>Брумиштейн Ю. М., Сокольский В. М., Аксенова Ю. Ю.</i> Многокомпонентная общая анестезия: системный анализ рисков и моделей принятия решений.....	72
<i>Брызгалин Г. И.</i> Оценочный взгляд на функции логики высказываний.....	79
<i>Кандырин Ю. В., Чивилев А. Д.</i> Методика автоматизированного многокритериального выбора механического привода зеркальных антенн.....	84
<i>Кучуганов А. В., Соловьева А. Н.</i> Распознавание характерных точек по фотографиям в экспертной системе построения словесного портрета.....	92
<i>Май Нгок Тханг, Камаев В. А., Щербаков М. В., Тюков А. П.</i> Обзор подходов к идентификации видов деятельности человека в задачах оптимизации потребления электроэнергии.....	97
<i>Тюков А. П., Камаев В. А., Бребельс А.</i> Архитектура централизованной системы управления системами контроля микроклимата в коммерческих зданиях.....	101
<i>Чмутин А. М., Шарипов Р. Р.</i> Феномен jpeg-структуры цифрового фотографического изображения и ее свойства.....	105
<i>Шевченко С. В., Камаев В. А., Манева Р. И.</i> Применение нечетких продукционных правил и нейронных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии в регионе.....	108

Часть III. УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<i>Брумштейн Ю. М., Петрова И. Ю., Попова Ю. Н.</i> Научная деятельность в региональных вузах: анализ вопросов информационной безопасности.....	113
<i>Волошин Ю. А.</i> Архитектура системы автоматизированного проектирования технологий производства сельскохозяйственных культур.....	120
<i>Кригер Л. С., Квятковская И. Ю.</i> Интеллектуальная модель оценки удовлетворенности потребителей услуг городского пассажирского электротранспорта.....	123
<i>Санжапов Б. Х., Буханцева Н. В., Дудина И. А., Буханцев А. Н.</i> Пользовательский интерфейс на основе «умных агентов» для систем управления обучением в вузе.....	129
<i>Санжапов Б. Х., Мурадов А. А.</i> Модель принятия решений при обеспечении экологической безопасности развития урбанизированных территорий.....	135
<i>Шевчук В. П., Бельчанская Е. Н., Курьянов В. Н.</i> Алгоритм диагностики роторного оборудования автоматизированного рабочего места энергетика.....	139
<i>Шикунская О. М., Рахманина А. А., Ходаева А. А., Ходаева Т. А.</i> Исследование проблемы управления качеством медицинской помощи на основе интеллектуального анализа данных.....	143
<i>Шикунская О. М., Юречко М. А.</i> Разработка модели влияния тяжелых металлов на состояние живых организмов в водной среде.....	147

Часть IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

<i>Бутенко Д. В., Ананьев А. С., Попов К. В.</i> Концептуальное проектирование информационных систем. Программная среда психосемантической идентификации звука.....	151
<i>Волошин Ю. А.</i> Алгоритм автоматизированного формирования системы машин для производства сельскохозяйственных культур.....	155
<i>Дыков М. А.</i> Автоматизация поиска альтернативных товаров в интернет-магазинах.....	158
<i>Крапивина Н. В., Коробкин Д. М., Фоменков С. А.</i> Автоматизация фильтрации электронных первоисточников по признаку знаний о нанотехнологиях и выявление описаний нанотехнологий.....	161
<i>Фоменков С. А., Колесников С. Г., Коробкин Д. М.</i> Методика модификации информационного обеспечения базы данных физических эффектов.....	166
<i>Яковлев А. А., Чибисов А. В., Позднякова П. Е., Чурсина С. В.</i> Использование модели онтологий для разработки программного модуля синтеза физического принципа действия преобразователей энергии.....	171
<i>Яковлев А. А., Чибисов А. В., Позднякова П. Е., Чурсина С. В.</i> Методика разработки матрицы технических решений для устройств с газообразным рабочим телом.....	174

Часть V. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

<i>Аминов Р. И.</i> Методы реализации объектно-ориентированного управления устройствами встраиваемых систем.....	177
<i>Бершадский А. М., Курилов Л. С., Финогеев А. Г.</i> Классификация методов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях.....	181
<i>Кутузов Д. В., Филлин В. А.</i> Структура и математическая модель параллельной пространственной коммутационной системы.....	185
<i>Лазарев Е. А., Шапошников Д. Е., Мисевич П. В.</i> Метод ветвей и границ для оптимизации структуры сети передачи данных....	189
<i>Лукиянов В. С., Аль-Хадша Ф. А. Х.</i> Проектирование топологических сетей с ограничениями по пропускной способности канала.....	193
<i>Лукиянов В. С., Степаненко И. А.</i> Проблема повторной оплаты электронным чеком.....	200

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 536.5

В. Р. Багаутдинов, М. А. Ураксеев

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА. ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕТОД

Уфимская государственная академия экономики и сервиса

bag_vr@mail.ru

Рассмотрены способы диагностики состояния букс железнодорожного транспорта. Описаны дистанционные способы мониторинга. Рассмотрен принципиально новый метод дистанционного контроля ходовой части железнодорожного транспорта – с помощью тепловизионного сканера. Приведен анализ всех способов дистанционного контроля.

Ключевые слова: дистанционный контроль, железнодорожный транспорт, вагон, буксы, тепловидение, перегрев, тепловизор, мониторинг, инфракрасное излучение, сферическое зеркало, сканер, матрица, окуляр, объектив, контроллер, индикатор, диагностика.

V. R. Bagautdinov, M. A. Urakseev

CONTROL METHODS OF THE RUNNING GEAR OF RAILWAY TRANSPORT. TEPLOVIZIONNY METHOD

Ufa State Academy Economic and Service

Ways of diagnostics of a condition of axle boxes of railway transport are considered. Remote ways of monitoring are described. Essentially new method of remote control of a running gear of railway transport – by means of a thermographic scanner is considered. The analysis of all ways of remote control is provided.

Keywords: remote control, railway transport, car, axle boxes, heatvision, overheat, thermographic camera, monitoring, infra-red radiation, spherical mirror, scanner, matrix, eyepiece, lens, controler, the indicator, diagnostic provided.

В настоящее время в связи с ростом скоростей движения рельсового транспорта, с одной стороны, и старением подвижного состава – с другой, актуальной становится задача объективного контроля за техническим состоянием железнодорожного подвижного состава. Одними из наиболее нагруженных узлов железнодорожного вагона являются буксы колесных пар, требующие постоянного контроля. Буксы – важнейшие элементы ходовых частей вагона, от надежности которых во многом зависит безопасность движения поездов. Работоспособность буксы характеризуется степенью ее нагрева и состоянием смазки, а неисправности в буксе оцениваются по результатам ее разборки. Проводимые периодические осмотры вагонов на станциях требуют значительных временных затрат, что существенно увеличивает время в пути. При этом при осмотрах присутствует элемент субъективизма, так как качество осмотра

зависит от квалификации осмотрщика вагонов и количества обслуживающего персонала.

Один из способов обнаружения перегрева букс железнодорожных вагонов представлен на рис. 1; здесь изображен продольный разрез устройства [9].

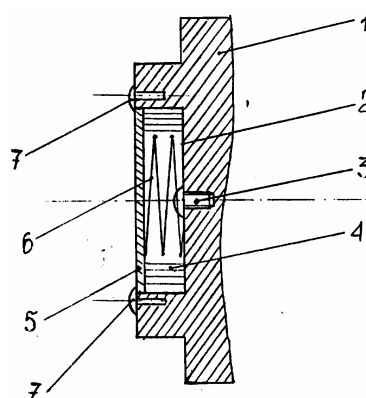


Рис. 1. Продольный разрез устройства

Вид устройства при его срабатывании изображен на рис. 2.

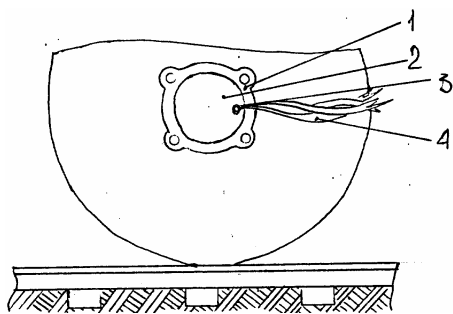


Рис. 2. Вид устройства при срабатывании

Необходимый результат достигается тем, что в устройстве для обнаружения перегрева буксы подвижного состава, состоящем из установленных на каждой крышке буксы датчиков превышения допустимой температуры, выполненных из легкоплавкого материала, блока сигнализации, последний выполнен на крышке буксы и закрыт подпружиненной с внутренней стороны крышкой, при этом внутри него нанесено светящееся пятно и закреплены одним концом полоски ткани, а датчиками превышения допустимой температуры являются шпильки, которыми закреплена крышка блока сигнализации.

На рис. 1 и 2 приведены нанесенное на крышку буксы 1 светящееся пятно 2, винт 3, полоски ткани 4, крышка 5 блока сигнализации, пружины 6 и шпильки 7.

Устройство работает следующим образом. При нагревании буксы до температуры, превышающей нормальный рабочий нагрев, происходит плавление удерживающих шпильки 7. Плаваясь, шпильки освобождают крышку 5, ко-

торая сбрасывается пружиной 6, находящейся до этого в сжатом состоянии. Освобожденное от крышки светящееся пятно 2 и полоски ткани 4 дают сигнал о нагреве буксы, обнаруживаемый визуально работником локомотивной бригады при осмотре поезда в кривой и на станции, а также работниками железнодорожного транспорта на переездах и постах безопасности. Этим обеспечивается повышение надежности и информативности работы устройства для обнаружения перегрева букс [9].

Данный способ, несомненно, имеет ряд недостатков. Перегрев букс возможно обнаружить только при остановке поезда. Также данный способ не дает полного представления о степени нагрева; здесь присутствует элемент субъективизма, что делает его небезопасным и неперспективным в условиях стремительного развития направления совершенствования способов диагностики ходовой части железнодорожных вагонов.

Для исключения элементов субъективизма необходим постоянный мониторинг за состоянием букс в течение всего времени их эксплуатации. Все вышеперечисленное делает актуальным разработку дистанционных способов диагностики неисправностей букс железнодорожных вагонов.

Рассмотрим один из способов дистанционной диагностики неисправностей букс, который позволяет быстро и точно в процессе движения состава выявлять неисправные буксы, а также количественно измерять величину зазора между буксой и лабиринтным кольцом, используемой для контроля букс колесной пары на железнодорожном транспорте. На рис. 3 приведена схема реализации [8] данного способа.

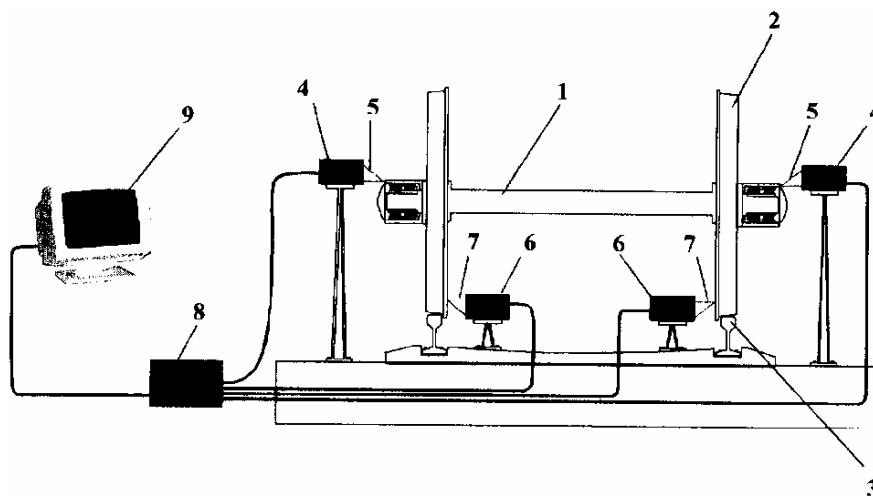
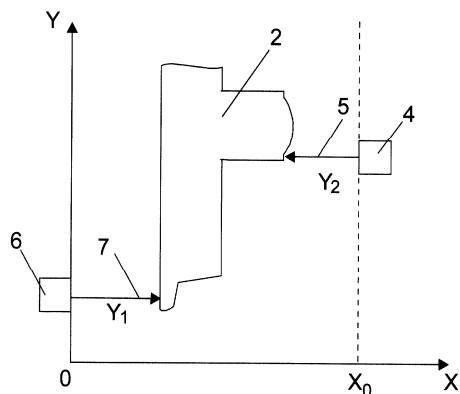


Рис. 3. Общая схема установки

На рис. 4 представлен чертеж, поясняющий принцип формирования профиля колеса.



Оптический дальномер 6, сканируя лучом 7, формирует текущую координату Y_1 внутренней поверхности колеса 2, а оптический дальномер 4, сканируя лучом 5, формирует текущую координату Y_2 положения его буксы. Сигнал от оптического дальномера 6 используется в качестве базового сигнала, необходимого для привязки начала координат оптического дальномера 4, так как внутренняя поверхность колеса выбрана в качестве базовой поверхности для определения координат положения буксы. Перед началом измерений производят юстировку оптических дальномеров, т. е. точное определение координаты X_0 (расстояние между оптическими дальномерами 4 и 6), которую вносят в качестве исходной координаты в блок обработки информации 8. Перед началом измерений текущих координат для каждого из колес состава блока 8 по сигналу магнитной педали (на рис. 3 она не показана) поступает сигнал на включение оптических дальномеров. Сигналы с оптических дальномеров 4 и 6 в виде набора текущих координат точек сканируемых поверхностей поступают на блок обработки информации 8, где из них формируют законченный профиль внутренней поверхности колеса и профиль буксы (см. рис. 3 и 4). После определения указанных профилей их сравнивают с эталонными сигналами и делают отметку о состоянии буксы. Текущая координата Y_2 однозначно показывает величину схода буксы.

Результат достигается тем, что с помощью тепловизионного сканера, состоящего из нескольких расположенных вертикально и сдвинутых друг относительно друга в горизонтальном направлении линеек теплочувствительных элементов, осуществляют съемку всех тележек перемещающегося относительно тепловизионного сканера железнодорожного состава; полученные изображения от каждой линейки вводят

в компьютер и сохраняют в его памяти с помощью компьютерных средств: каждое сохраненное изображение разбивают на фрагменты, каждый из которых содержит тепловизионное изображение одной тележки, включающее вращающиеся и невращающиеся части; осуществляют геометрическое масштабирование вращающихся и невращающихся частей тележки каждого фрагмента изображения; формируют изображение вращающихся частей тележки путем объединения всех фрагментов изображений, полученных от всех линеек теплочувствительных элементов; составляют изображение невращающихся частей тележки путем объединения всех фрагментов изображений, полученных от всех линеек теплочувствительных элементов; формируют новое многослойное изображение путем объединения сформированного изображения невращающихся частей тележки со сформированным изображением вращающихся частей тележки; сформированное новое

изображение последовательно совмещают с хранящимися в памяти указанного компьютера бинарными изображениями шаблонов обследуемых частей тележки; в результате совмещения на равномасштабном тепловизионном снимке выделяют участки, принадлежащие раме, буксам и колесам; в пределах границ выделенных участков анализируют степень нагрева каждой буксы и в случае превышения заданной температуры нагрева каждой буксы принимают решение о ее неработоспособности; в пределах границ выделенных участков анализируют степень нагрева рамы и каждого колеса и при обнаружении локальной области, имеющей повышенную относительно остальных частей рамы и/или колеса температуру, принимают решение о наличии на колесе или раме механической трещины.

На рис. 5 изображена поясняющая фигура способа диагностики неисправностей колесных тележек железнодорожных вагонов [5].

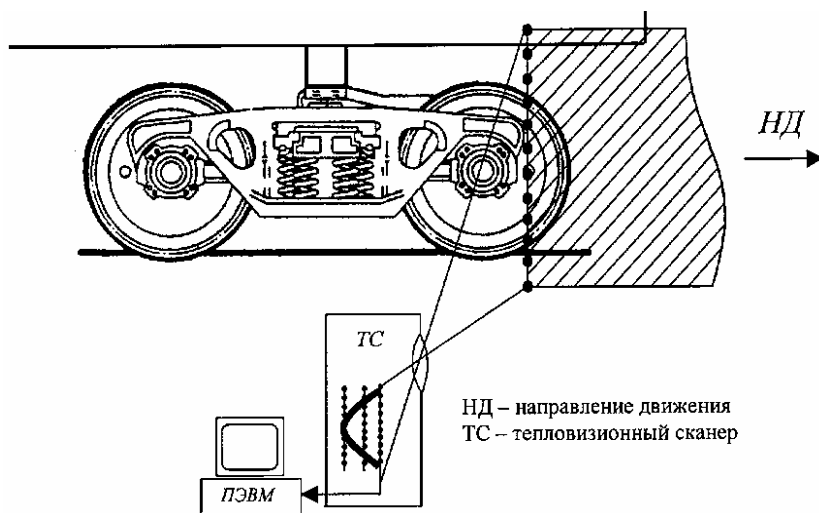


Рис. 5. Способ диагностики неисправностей колесных тележек железнодорожных вагонов

Алгоритм реализации заявленного способа представлен на рис. 6.

Способ основан на том, что для выявления трещин на дисках и раме колесной тележки, а также для определения работоспособности букс с двух сторон железнодорожного полотна устанавливают два однотипных тепловизионных сканера. Каждый из сканеров содержит несколько расположенных вертикально, на некотором расстоянии друг от друга, линеек теплочувствительных приемников с целью получения незакрытого колесной рамой полного изображения колеса.

Данный способ реализуется в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 6, где

1 – данные сканерного изображения B , полученные одной из тепловизионных линеек; 2 – разбиение исходного снимка на фрагменты (оператор F); 3 – сохранение изображений всех колесных пар железнодорожного состава; 4 – расчет скорости кадрового масштаба и координат центров осей колес; 5 – известные параметры колесной тележки и сканера; 6 – геометрическое растяжение невращающихся частей тележки до масштаба μ_{ki} ; 7 – эталонные изображения невращающихся частей тележки H_p ; 8 – выделение незакрытой части колеса B_k (оператор F); 9 – геометрическое восстановление изображения вращающегося колеса (оператор G); 10 – геометрическое масштабирование изобра-

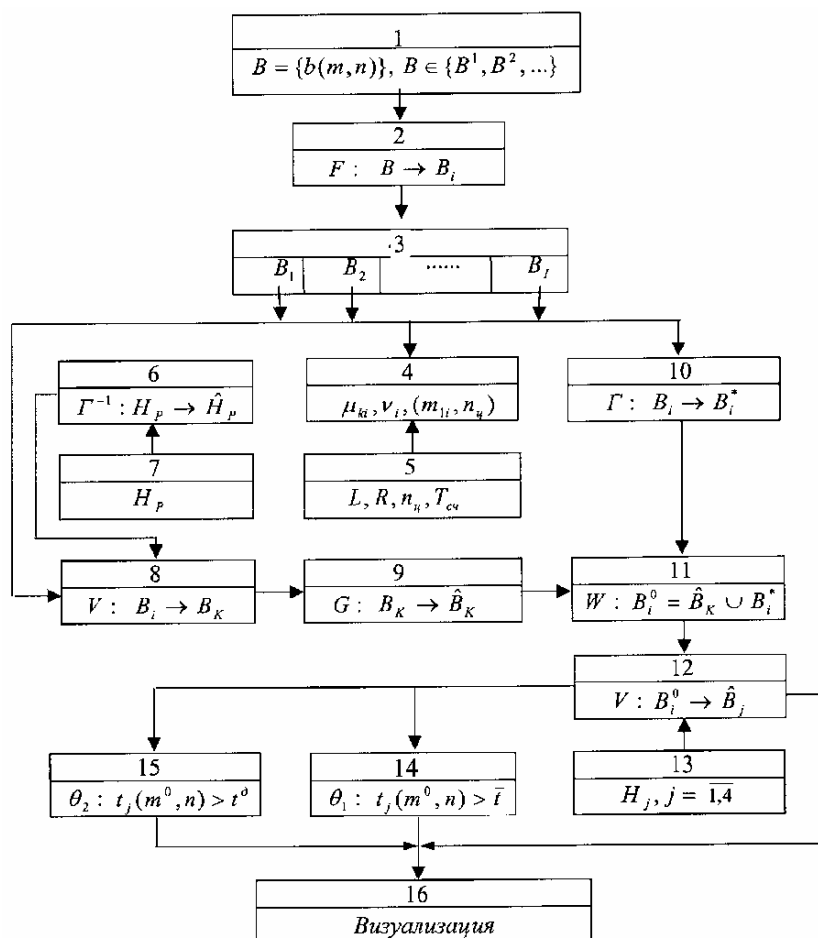


Рис. 6. Алгоритм реализации способа

жения B_i (оператор Γ); 11 – формирование изображений вращающихся и невращающихся частей тележки и формирование многослойного нового изображения B_i^0 путем объединения изображений вращающихся и невращающихся частей; 12 – выделение участков изображений анализируемых узлов колесной тележки; 13 – известный набор шаблонов H_j узлов колесной тележки; 14 – выявление температурных аномалий на изображении колеса и раме и принятие решения о наличии механических трещин; 15 – анализ температуры буксы колеса и принятие решения о ее работоспособности; 16 – визуализация изображения колесной тележки.

Данный способ реализуется с помощью любого тепловизионного [6] сканера. В сканере могут использоваться, например, линейки, состоящие из 256. Сканер регистрирует ИК-излучение в спектральном диапазоне 8–12 мкм и за счет предварительной калибровки обеспечивает измерение температуры обследуемых объектов с точностью 0,1°. Обработка полученных изображений осуществляется при по-

мощи компьютерных средств, состоящих, например, из IBM/PC совместимого компьютера необходимым периферийным оборудованием, а также программного обеспечения, алгоритм функционирования которого приведен в описании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бурсин, В. И. Волоконно-оптические датчики : Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бурсин, Ю. Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Жуков, А. Г. Тепловизионные приборы и их применение / А. Г. Жуков, А. Н. Горюнов, А. А. Кальфа. – М.: Радио и связь, 1983. – 168 с.
3. Окоси, Т. А. Волоконно-оптические датчики : пер. с япон. / Т. А. Окоси. – Л.: Энергоатомиздат, 1990 г.
4. Удда, Э. М. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Э. М. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
5. Система для расчета тепловых технологических процессов машиностроения / А. Е. Андреев, Е. Г. Громов, М. В. Резников, О. В. Шаповалов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических сис-

темах» ; вып. 7). – С. 124–126.

6. Пат. 2260534 Российская Федерация, В61К9/00. Способ диагностики неисправностей колесных тележек железнодорожных вагонов.

7. Пат. 2430848 Российская Федерация, В61К9/00. Устройство для дистанционного контроля состояния буксы колесной пары.

8. Пат. 2258017 Российская Федерация, В61К9/00. Способ мониторинга состояния буксы колесной пары.

9. Пат. 2115579 Российская Федерация, В61К9/00. Устройство для обнаружения перегрева буксы.

10. www.dimonchiks1.narod.ru/10_sem/Kolyuchkin/teploviz.pdf

11. www.tstu.ru

УДК 519.62

Н. Г. Бандурин

ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМ СУЩЕСТВЕННО НЕЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ (ДВУМЕРНЫЕ ЗАДАЧИ)

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

bandurin_ng@mail.ru

Кратко описывается разработанный автором ранее численный метод и программа для автоматического решения двумерных существенно нелинейных систем дифференциально-алгебраических уравнений. Достаточно высокая эффективность предложенной процедуры показана в результате решения четырех тестовых задач.

Ключевые слова: нелинейные дифференциально-алгебраические уравнения, численные методы, компьютерные программы.

N. G. Bandurin

PPROGRAM FOR AUTOMATIC SOLUTION OF ESSENTIAL NONLINEAR DIFFERENTIAL ALGEBRAIC EQUATIONS SYSTEMS (TWO-DIMENSIONAL PROBLEMS)

Volgograd State Architecture and Civil Engineering University

A numerical method and a program for automatic solution of two-dimensional essentially nonlinear differential algebraic equations systems designed by the author previously are briefly outlined. Considerably high efficiency of the offered method is illustrated by the solution of four test problems.

Keywords: nonlinear differential-algebraic equations, numerical methods, computer programs.

Численное решение систем нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) связано с рядом специфических трудностей, поэтому автору известно небольшое число работ, посвященных этому направлению вычислительной математики, например, [1, 2, 3], а широко применяемые программные комплексы (Maple, Macsyma, Mathematica, Reduce, Matlab и другие) изначально не предназначались для решения ДАУ. Метод и пакет программ для автоматического решения систем обыкновенных нелинейных интегро-дифференциально алгебраических уравнений достаточно общего вида приведены в [4].

Ниже кратко описываются метод и программа для решения корректной краевой задачи следующей системы N в общем случае существенно нелинейных, то есть не разрешенных относительно старших производных [5, с. 951], дифференциально-алгебраических уравнений, содержащих P алгебраических функций, определенных на области $(a \leq x \leq b, c \leq y \leq d)$

в общем случае криволинейной системы координат (x, y)

$$\mathbf{F}[x, y, \mathbf{V}, \mathbf{W}, \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial x}, \frac{\partial \mathbf{W}}{\partial y}, \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial x \partial y}, \frac{\partial^2 \mathbf{W}}{\partial y^2}, \dots, \dots, \frac{\partial^m \mathbf{W}}{\partial x^m}, \frac{\partial^n \mathbf{W}}{\partial y^n}] = \mathbf{0}; \quad (1)$$

Здесь: $\mathbf{F}$ – вектор-столбец размером N ; $\mathbf{V} = v_1(x, y), v_2(x, y), \dots, v_P(x, y)$; $\mathbf{W} = w_1(x, y), w_2(x, y), \dots, w_{N-P}(x, y)$.

Предполагается, что для функций $w_1, w_2, \dots$ задано m условий на краях $x = a$ и $x = b$, а также n условий на краях $y = c$ и $y = d$.

Ставится задача найти решение системы (1) на равномерной сетке $(ix \times jy)$.

Метод решения. Для преобразования дифференциально-алгебраической задачи (1) к системе нелинейных алгебраических уравнений относительно узловых значений функций, которые затем должны быть решены известными методами, используется формула

дифференцирования для функций $\mathbf{W}$, которая в одномерном случае имеет вид [4, 6, 7]:

$$\mathbf{W}^{(r)} = \sum_{i=0}^{r-1} D^i (E - DS) \mathbf{I} w_1^{(r-i)} + D^r \mathbf{W}. \quad (2)$$

Здесь: $\mathbf{W}^{(r)}, \mathbf{W}, \mathbf{I}$ – вектор узловых значений производных функций порядка r размером $N - P$, вектор узловых значений функций и единичный вектор соответственно; S, D, E – матрицы интегрирования, дифференцирования и единичная матрица соответственно; w_1^{r-1} – значения функций и их производных при $x = a$.

Выражения узловых значений смешанных производных получаются в результате повторного применения формулы дифференцирования (2) в другом направлении.

Разработанная для решения систем двумерных дифференциально-алгебраических уравнений общего вида программа BOUNDS2 работает на основе минимума исходных данных, то есть без необходимости разрабатывать программу для решения каждой задачи и выполнять ее отладку. Для работы программы следует ввести в память ПК следующие данные: число уравнений N , параметры сетки узлов nx и ny , числа a, b, c и d , максимальные значения порядка производных m и n , точные выражения для искомых функций (если они известны), начальное приближение, краевые условия и тексты решаемых ДАУ. Перед заполнением очередной строки исходных данных на дисплей выводится подсказка о содержимом данной строки. После ввода строки выполняется проверка правильности этого содержимого, а в случае обнаружения ошибки ввод прекращается и на экран выводится соответствующее сообщение.

В отличие от всех известных программных комплексов программа BOUNDS2 не только вычисляет и выводит на печать узловые значения функций, но также их производные, в том числе, возможно, смешанные.

Тестовые примеры

Все приведенные ниже ДАУ задачи решаются с помощью программы BOUNDS2 в те-

чение нескольких минут, включая и время для подготовки исходных данных.

Пример 1. Система существенно нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ) относительно трех неизвестных функций $u(x, y)$, $v(x, y)$, $w(x, y)$:

$$2u_{xx} + u_{yy} + u + \sin w - \sin(x - y) + 2\sin(x + y) = 0,$$

$$v_x + v_y + w - 2x = 0,$$

$$w + v_x - v_y - \sin(u_{xx}) - \sin(\sin(x + y)) = 0.$$

Решение следует найти в квадрате ($0 \leq x, y \leq \pi/2$).

Краевые условия:

на краях $x = 0, x = \pi/2$ заданы нелинейные краевые условия:

$$u(0, y) + \exp(u_x(0, y)) - \sin y - \exp(\cos y) = 0,$$

$$u(\pi/2, y) - \cos y = 0, \quad v(0, y) = 0;$$

на краях $y = 0, y = \pi/2$:

$$u(x, 0) - \sin x = 0, \quad u(x, \pi/2) - \cos x = 0,$$

$$v(x, 0) = 0.$$

Точное решение:

$$u(x, y) = \sin(x + y), \quad v(x, y) = xy, \quad w(x, y) = x - y.$$

Начальное приближение: $u_0 = v_0 = w_0 = 1$.

В результате решения максимальное отклонение приближенного решения от точного Δ получено для третьей функции w . Для разных сеток ($nx \times ny$) значения этого отклонения оказались равными:

$$\Delta_{(7 \times 7)} = 1.8 \cdot 10^{-3}, \quad \Delta_{(13 \times 13)} = 7.1 \cdot 10^{-8},$$

$$\Delta_{(13 \times 7)} = 3.0 \cdot 10^{-5}, \quad \Delta_{(7 \times 13)} = 1.8 \cdot 10^{-3}.$$

Измельчение сетки выше 15×15 практически не повышает точность расчета, что объясняется нарастанием погрешности в процессе выполнения большого числа арифметических операций при интерполировании решения алгебраическими полиномами высокой степени ($n = 9$), но сравнительно небольшой точности арифметического устройства ПК.

Пример 2. Система трех существенно нелинейных ДАУ:

$$u_{xx} + u_{yy} + \sin(u_{xx}) + w^3 - 0.5 \exp((x - y)/2) - \sin(0.25 \exp((x - y)/2) - (x - y)^2) = 0,$$

$$v_x + v_y + u^2 - (0.5 \exp((x - y)/2))^2 = 0,$$

$$w + v + \cos u + u_{xy} - \cos(\exp((x - y)/2)) + 0.25 \exp((x - y)/2) - 2x = 0.$$

Решение следует найти в прямоугольнике
 $(0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 2)$.

Краевые условия:

на краях $x = 0, x = 1$:

$$u(0, y) - \exp(-y/2) = 0,$$

$$(1, y) - \exp((1 - y)/2) = 0, \quad v(0, y) + y = 0;$$

на краях $y = 0, y = 2$:

$$u(x, 0) - \exp(x/2) = 0,$$

$$u(x, 2) - \exp((x - 2)/2) = 0, \quad v(x, 0) - x = 0.$$

Точное решение:

$$u_{xxxx} + u_{yy} + \sin w + 6(x + y)^2 / v + (x + y)^{-2} - \sin(x - y) = 0,$$

$$v + u_{xxxx} - (x + y)^2 + 6(x + y)^4 = 0,$$

$$w - u + u_{xy} + \ln(x + y) + (x + y)^2 + y = 0.$$

Решение следует найти в квадрате $(1 \leq x, y \leq 2)$.

Краевые условия:

на краях $x = 1, x = 2$:

$$u(1, y) - \ln(1 + y) - 1 = 0, \quad u(2, y) - \ln(2 + y) - 2 = 0,$$

$$u_x(1, y) - 1/(1 + y) - 1 = 0,$$

$$u_x(2, y) - 1/(2 + y) - 1 = 0;$$

на краях $y = 1, y = 2$:

$$u(x, 1) - \ln(x + 1) - x = 0, \quad u(x, 2) - \ln(x + 2) - x = 0.$$

Точное решение:

$$u(x, y) = \exp((x - y)/2), \quad v(x, y) = x - y,$$

$$w(x, y) = x + y.$$

Начальное приближение: $u_0 = v_0 = w_0 = 0$.

Максимальное отклонение приближенного решения от точного Δ получено для второй функции v . Значения этого отклонения:

$$\Delta_{(5 \times 5)} = 1.0 \cdot 10^{-3}, \quad \Delta_{(9 \times 9)} = 3.7 \cdot 10^{-8},$$

$$\Delta_{(5 \times 9)} = 9.8 \cdot 10^{-4}, \quad \Delta_{(9 \times 5)} = 9.3 \cdot 10^{-4}.$$

Пример 3. Система трех нелинейных ДАУ:

$$u(x, y) = \ln(x + y) + x, \quad v(x, y) = (x + y)^2,$$

$$w(x, y) = x - y.$$

Начальное приближение: $u_0 = v_0 = w_0 = 0$.

Максимальное отклонение приближенного решения от точного Δ получено для третьей функции w . Значения этого отклонения:

$$\Delta_{(9 \times 9)} = 1.9 \cdot 10^{-4}, \quad \Delta_{(15 \times 15)} = 1.8 \cdot 10^{-5},$$

$$\Delta_{(15 \times 9)} = 2.2 \cdot 10^{-4}, \quad \Delta_{(9 \times 15)} = 2.2 \cdot 10^{-4}.$$

Пример 4. Система двух существенно нелинейных ДАУ высокого порядка:

$$u_{xxxxx} + u_{yyyyy} + u_{yy} + \cos v - 30(x - y)^4 - \cos(x + y)^2 - 1440 = 0,$$

$$v + \sin(u_{xxxxx}) + v^2 - (x + y)^4 - (x + y)^2 - \sin 720 = 0.$$

Решение следует найти в квадрате $(0 \leq x, y \leq 1)$.

Краевые условия:

на краях $x = 0, x = 1$:

$$u(0, y) - y^6 + y = 0, \quad u(1, y) - (1 - y)^6 + 1 + y = 0,$$

$$u_x(0, y) - 6y^5 + 1 = 0,$$

$$u_x(1, y) - 6(1 - y)^5 + 1 = 0, \quad u_{xx}(0, y) - 30y^4 = 0,$$

$$u_{xx}(1, y) - 30(1 - y)^4 = 0;$$

на краях $y = 0, y = 1$:

$$u(x, 0) - x^6 + x = 0, \quad u(x, 1) - (x - 1)^6 + x + 1 = 0,$$

$$u_y(x, 0) + 6x^5 + 1 = 0,$$

$$u_y(x, 1) - 6(x - 1)^5 + 1 = 0, \quad u_{yy}(x, 0) - 30x^4 = 0,$$

$$u_{yy}(x, 1) - 30(x - 1)^4 = 0.$$

Точное решение:

$$u(x, y) = (x - y)^6 - x - y, \quad v(x, y) = (x + y)^2.$$

Начальное приближение: $u_0 = v_0 = 0$.

Решение этой задачи удалось получить только на сетке 7×7 , причем для первой и второй функций отклонения приближенного решения от точного оказались равными $\Delta_{(7 \times 7)} = 1.0 \cdot 10^{-17}$

и $\Delta_{(7 \times 7)} = 2.3 \cdot 10^{-11}$ соответственно. Видно, что погрешность вычисления значений первой функции соответствует точности арифметических операций ПК, так как погрешность метода равна нулю ввиду того, что точное решение выражается алгебраическими полиномами степени $6 < 9$. Появление некоторой погрешности для второй функции можно объяснить наличием во втором уравнении производной высокого порядка в качестве аргумента тригонометрической функции.

Опыт использования рассматриваемых программ показывает, что для корректно записанных уравнений, которые адекватно моделируют

реальные физические процессы, по программам можно получить достаточно точные решения. И наоборот: тестовые задачи, для которых итерационный процесс неустойчив, не способны моделировать реальный физический процесс. Например, уравнение

$$W_{xx} + aW_t + F(x, t) = 0$$

при $a > 0$ описывает устойчивый процесс распространения тепла в стержне и имеет устойчивое решение. Если $a < 0$, то решение крайне неустойчиво, так как в этом случае уравнение «моделирует» процесс передачи тепла от холодной части стержня к более нагретой его области.

В заключение следует отметить, что точность полученных результатов может оказаться приемлемой при решении нелинейных прикладных задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хайпер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи / Э. Хайпер, Г. Ваннер. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
2. Банах, Л. Я. Условия разбиения системы дифференциально-алгебраических уравнений на слабосвязанные подсистемы / Л. Я. Банах, А. С. Горобцов, О. К. Чесноков // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2006. – № 12. – С. 2223–2227.
3. Бояринцев, Ю. Е. О нелинейных алгебро-дифференциальных системах (АДС), допускающих сведение к невырожденным системам обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Теория и численные методы решения / Ю. Е. Бояринцев // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2010. – № 1. – С. 15–21.
4. Бандурин, Н. Г. Метод и пакет программ для численного решения систем существенно нелинейных обыкновенных интегро-дифференциально-алгебраических уравнений / Н. Г. Бандурин, Н. А. Гуреева // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24. – № 2. – С. 3–16.
5. Математическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1982. – Т. 3.
6. Бандурин, Н. Г. Новый численный метод порядка n для решения интегро-дифференциальных уравнений общего вида / Н. Г. Бандурин // Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7. – № 2. – С. 3–10.
7. Бандурин, Н. Г. Пакет программ для решения систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений (одно-, двух- и трехмерные начально-краевые задачи) / Н. Г. Бандурин, В. А. Игнатьев // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 2. – С. 105–112.

УДК 536.423.1

П. С. Васильев, С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЛЯ ИСПАРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ ЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА

Волгоградский государственный технический университет

nestorvv@mail.ru, maser7@bk.ru, pahp@vstu.ru

В статье на основе экспериментальных данных представлена физическая модель тепло-массообменного процесса капельного кипения и получена математическая модель в критериальном виде, описывающая зависимость коэффициента теплоотдачи от физических параметров капли: начального диаметра капли, высоты падения капли, теплового напора и теплофизических свойств жидкости.

Ключевые слова: капельное кипение, физическая модель, математическая модель, метод наименьших квадратов, число подобия.

P. S. Vasiliev, S. L. Reva, L. S. Reva, A. B. Golovanchikov

SIMILARITY CRITERION FOR THE DEPENDENCE OF EVAPORATION OF SINGLE DROP LIQUID ON THE HEAT SURFACE

Volgograd State Technical University

In this paper on a basis of the experimental data presents physical model of heat and mass transfer process of drop boiling and mathematical model in the similarity criterion form which describes dependence of the heat transfer coefficient from the physical parameters of drop such as droplet initial diameter, height of fall of drop, thermal head and physical and chemical properties of the liquid.

Keywords: drop boiling, physical model, mathematical model, least square method, the number of similarity.

Анализ литературных источников [1–4] и опыт практического наблюдения показывают, что одним из направлений интенсификации процесса испарения является переход от испарения жидкости в большом объеме или испарения при пленочном течении жидкости к испарению в режиме кипения жидкости, подаваемой на поверхность нагрева в виде капель – капельному кипению.

Для исследования капельного кипения с поверхности нагрева была разработана и создана экспериментальная установка [5]. Установка

Для исследования капельного кипения с поверхности нагрева была разработана и создана экспериментальная установка [5]. Установка

включает аппарат с обогреваемой поверхностью, который представляет из себя плоскую пластину из углеродистой стали размером $553 \times 82 \times 8$ мм. Поверхность пластины дополнительно специально не обрабатывалась и имела шероховатость, соответствующую листовому прокату. Температура поверхности измерялась хромель-копелевыми термопарами, ЭДС которых измерялась с точностью до десятых долей милливольты высокоточными электронными милливольтметрами ИРТ 1730D и контролировалась инфракрасным термометром – пирометром АКИП-9302, позволяющим проводить измерения бесконтактным способом. Картина поведения капли и время испарения определялись с помощью высокоскоростной видеокамеры VS-FAST/G6 с максимальной частотой съемки до 5000 кадров в секунду. Видеокамера связана с монитором компьютера, на экране которого с необходимой детализацией и точностью наблюдалась вся картина процесса испарения, с которой можно было производить различные манипуляции: останавливать кадр, осуществлять покадровый просмотр, возвращаться к любому интересующему моменту, увеличивать и переворачивать изображение, записывать на компьютере видео- и фотоизображение процесса. Эти возможности позволяли с высокой точностью измерять время протекания процесса и необходимые линейные размеры.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении; использовались капли дистиллированной воды. Начальная температура воды составляла 20°C . Высота падения капли изменялась с $h=40$ мм и до $h=400$ мм. Размеры ка-

пель, получаемые из калиброванных насадок, для каждой серии опытов определялись как среднестатистические весовым методом и составляли: $d_k=2,567$ мм; $d_k=2,800$ мм; $d_k=3,783$ мм; $d_k=4,234$ мм; $d_k=4,840$ мм; $d_k=5,692$ мм.

Использование технического оснащения экспериментальной установки позволило детально выяснить физическую картину поведения кипящей капли жидкости на поверхности нагрева [6].

При падении капли на поверхность с некоторой высоты с ней происходят следующие изменения. В начальный момент контакта с поверхностью капля как бы «расплющивается» и приобретает форму, близкую к тороиду, со сплошной пленкой жидкости внутри тороида. Далее она под действием силы поверхностного натяжения трансформируется и приобретает вид приплюснутой полусферы с определенным диаметром пятна контакта с поверхностью нагрева. Затем происходит процесс испарения жидкости как с поверхности, так и ее кипения в основном объеме капли, более или менее бурный в зависимости от температуры поверхности нагрева, то есть, в итоге, от температурного напора Δt (разности температур поверхности нагрева и температуры кипения жидкости). Необходимо отметить, что при этом площадь пятна контакта капли с поверхностью нагрева остается примерно постоянной. После испарения основного объема жидкости на поверхности остается влажное пятно. Последний этап характеризуется постепенным полным высыханием влажного пятна, причем испарение идет с поверхности пленки жидкости (рис. 1, 2).

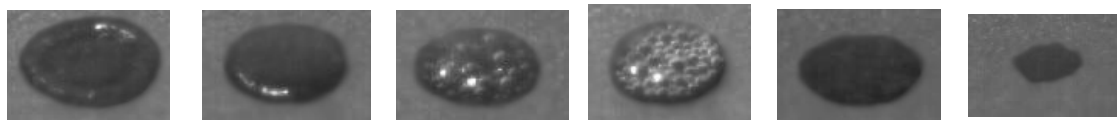


Рис. 1. Кинограмма испарения капли при $\Delta t=10\text{--}20^\circ\text{C}$

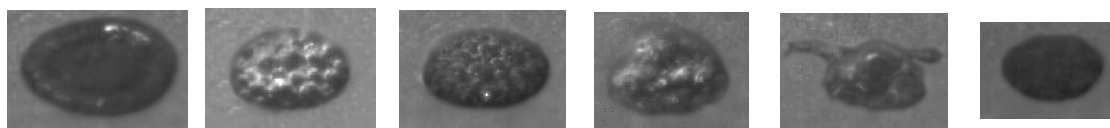


Рис. 2. Кинограмма испарения капли при $\Delta t=30\text{--}80^\circ\text{C}$

При температурах поверхности нагрева, для воды равных примерно $240\text{--}260^\circ\text{C}$ ($\Delta t=140\text{--}160^\circ\text{C}$), капля жидкости перестает контактировать с поверхностью и стягивается в сфероид,

начинающий хаотично двигаться по ней. В этом случае испарение жидкости идет с поверхности сфероида без наличия центров парообразования внутри его (рис. 3).

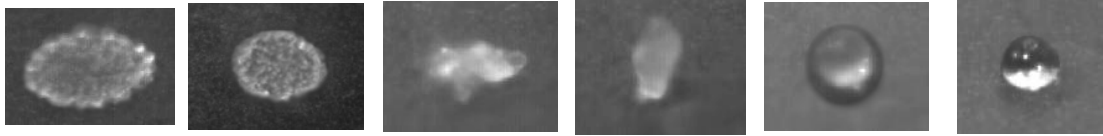


Рис. 3. Кинограмма испарения капли при $\Delta t=140\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$, образование одиночного сфероида

Также возможны варианты, когда первоначально образовавшийся тороид разрывается и, в итоге, образуется не один, а несколько более

мелких сфероидов, «разбегающихся» и испаряющихся на поверхности нагрева (рис. 4).

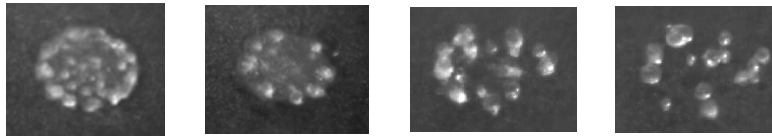


Рис. 4. Кинограмма испарения капли при $\Delta t=140\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$, образование нескольких сфероидов

На рис. 5 представлены возможные варианты поведения капли при ее кипении. Отметим следующее. Первый период – образование тороида при соударении капли с поверхностью характеризуется временем существования, порядка 5–10 мс. Второй период – трансформация тороида в полусферу и ее прогрев до температуры кипения в общем времени испарения занимает порядка 15–20 %. Третий период – непосредственно кипение капли вплоть до выкипания основного объема жидкости занимает большую часть времени. При этом площадь пятна контакта кипящей капли остается при-

мерно постоянной. После выкипания основного объема капли на поверхности остается влажное пятно. Четвертый период – высыхание влажного пятна в среднем составляет порядка 15–20 % от общего времени испарения, при этом отсутствует кипение жидкости, а испарение идет с поверхности пятна. Также необходимо отметить, что возможны варианты, когда диаметр тороида больше диаметра полусферы (рис. 5, а), то есть тороид стягивается в полусферу, и когда диаметр полусферы может быть больше диаметра тороида, то есть происходит его «распухание» (рис. 5, б).

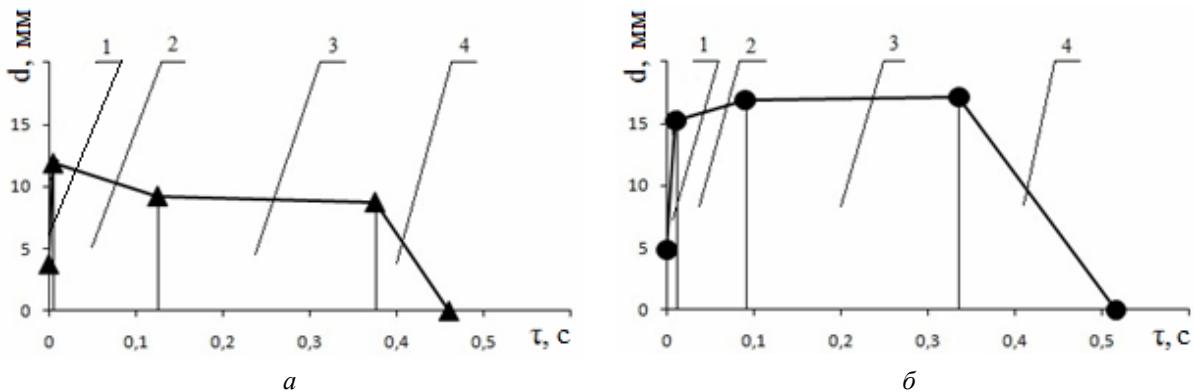


Рис. 5. Изменение диаметра пятна контакта кипящей капли с поверхностью нагрева:
а – $d_k=3,782\text{ мм}$; $h=100\text{ мм}$; $\Delta t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$; б – $d_k=4,840\text{ мм}$; $h=40\text{ мм}$; $\Delta t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
1, 2, 3, 4 – периоды процесса испарения капли

В каждом периоде можно выделить как средний диаметр и, соответственно, площадь контакта кипящей капли с поверхностью нагрева, так и определить усредненный интегральный диаметр (площадь) за весь период процесса кипения. Эти обстоятельства определяют дальнейшую математическую обработку экспе-

риментальных данных [7]. В общем случае необходимое количество тепла для испарения капли определяется как

$$Q = Q_1 + Q_2 \text{ или } Q = m_k \cdot c_p \cdot (t_{\text{кип}} - t_n) + m_k \cdot r, \quad (1)$$

где Q – общее количество тепла; Q_1 – количество тепла, необходимое для нагрева жидкости

до температуры кипения; Q_2 – количество тепла, необходимое для осуществления фазового перехода из жидкого состояния в парообразное (теплофизические параметры жидкости см. в таблице).

Количество тепла для каждого из периодов рассчитывается пропорционально времени испарения существования периода.

Площадь теплообмена F_n кипящей капли с поверхностью нагрева (площадь пятна контакта) рассчитывалась по усредненному диаметру пятна контакта d_n , измеренному во время видеосъемки:

$$F_n = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}. \quad (2)$$

Тепловая нагрузка определялась как

$$N = \frac{Q}{\tau}, \quad (3)$$

где τ – время испарения.

Удельный тепловой поток

$$q = \frac{N}{F_n}. \quad (4)$$

Температурный напор

$$\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{кип}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{ст}}$; $t_{\text{кип}}$ – температуры поверхности нагрева и кипения жидкости.

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t \cdot F_n \cdot \tau}. \quad (6)$$

Коэффициент теплоотдачи, являющийся рассчитываемым параметром, входит в определяемое число подобия Нуссельта $Nu = \frac{\alpha \cdot d_k}{\lambda}$,

зависящий от d_k – начального диаметра капли, Δt – температурного напора, w – скорости падения капли в момент ее соударения с поверхностью нагрева, а также теплофизических свойств жидкости (см. таблицу), из которых можно сформировать три определяющих числа подобия: Грасгофа $Gr = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot d_k^3}{\mu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$; Онезорге

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot d_k}}; \text{ Рейнольдса } Re = \frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}.$$

Определяемое число подобия Нуссельта ищется в виде:

$$Nu = A \cdot Gr^{b_1} \cdot Oh^{b_2} \cdot Re^{b_3}, \quad (7)$$

где A – безразмерный коэффициент; b_1, b_2, b_3 – соответствующие показатели степеней, входящих в уравнение чисел подобия.

Отметим, что скорость падения капли в момент соударения с поверхностью нагрева, входящая в число подобия Рейнольдса, определялась по алгоритму [8] в зависимости от начального диаметра капли, высоты падения, теплофизических свойств жидкости и параметров окружающей среды.

В линеаризированной системе координат критериальное уравнение (7) примет вид:

$$y = a + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3, \quad (8)$$

где $y = \ln Nu$; $a = \ln A$; $x_1 = \ln Gr$; $x_2 = \ln Oh$; $x_3 = \ln Re$.

Уравнение (8) решается стандартным методом Крамера [9]. Запишем в матричном виде

$$A \cdot X = B,$$

$$A = \begin{pmatrix} n & \sum_1^n x_1 & \sum_1^n x_2 & \sum_1^n x_3 \\ \sum_1^n x_1 & \sum_1^n x_1^2 & \sum_1^n (x_1 x_2) & \sum_1^n (x_1 x_3) \\ \sum_1^n x_2 & \sum_1^n (x_1 x_2) & \sum_1^n x_2^2 & \sum_1^n (x_2 x_3) \\ \sum_1^n x_3 & \sum_1^n (x_1 x_3) & \sum_1^n (x_2 x_3) & \sum_1^n x_3^2 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_1^n y_3 \\ \sum_1^n (y_3 x_1) \\ \sum_1^n (y_3 x_2) \\ \sum_1^n (y_3 x_3) \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix},$$

где n – число независимых опытов.

Путем замены каждого столбца матрицы A на матрицу B , получим еще четыре матрицы A_1, A_2, A_3, A_4 . Найдем определители матриц $\Delta = |A|$; $\Delta_1 = |A_1|$; $\Delta_2 = |A_2|$; $\Delta_3 = |A_3|$; $\Delta_4 = |A_4|$ и определим значения неизвестных параметров как

$$a = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad b_1 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad b_2 = \frac{\Delta_3}{\Delta}; \quad b_3 = \frac{\Delta_4}{\Delta}.$$

В соответствии с уравнением (8) безразмерный коэффициент равен $A = \exp(a)$.

Подставляя найденные значения A, b_1, b_2, b_3 в (7), получим критериальную зависимость для испарения одиночной капли жидкости на поверхности нагрева. Определим относительную ошибку по определяемому числу подобия Нуссельта, а также среднюю относительную ошибку

ку и доверительный интервал значений полученных параметров.

В таблице приведены исходные и справочные

данные для получения критериальной зависимости для испарения одиночной капли жидкости при числе независимых опытов равном 50.

Исходные и справочные данные для получения определяющей критериальной зависимости для испарения одиночной капли жидкости

Наименование	Размерность	Обозначение	Величина
<i>Исходные и справочные данные</i>			
1. Начальная температура жидкости	°C	$t_{\text{нач}}$	20
2. Температура кипения жидкости	°C	$t_{\text{кип}}$	100
3. Плотность жидкости при температуре кипения	кг/м ³	ρ	958
4. Динамический коэффициент вязкости жидкости при температуре кипения	Па·с	μ	$2,838 \cdot 10^{-5}$
5. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости при температуре кипения	Н/м	σ	$5,89 \cdot 10^{-2}$
6. Коэффициент объемного расширения жидкости при температуре кипения	К ⁻¹	β	$7,5 \cdot 10^{-5}$
7. Коэффициент теплопроводности жидкости при температуре кипения	Вт/(м·°C)	λ	0,683
8. Удельная теплоемкость жидкости при температуре кипения	Дж/(кг·°C)	c_p	4230
9. Теплота фазового перехода жидкости при температуре кипения	Дж/кг	r	$2,258 \cdot 10^6$
10. Ускорение свободного падения	м/с ²	g	9,81
11. Минимальный начальный диаметр капли	м	$d_{k \text{ min}}$	$2,567 \cdot 10^{-3}$
12. Максимальный начальный диаметр капли	м	$d_{k \text{ max}}$	$5,692 \cdot 10^{-3}$
13. Минимальная начальная масса капли	кг	$m_{k \text{ min}}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$
14. Максимальная начальная масса капли	кг	$m_{k \text{ max}}$	$9,63 \cdot 10^{-5}$
15. Минимальное полное время испарения капли	с	τ_{min}	0,230
16. Максимальное полное время испарения капли	с	τ_{max}	14,360
17. Минимальный средний диаметр при испарении капли жидкости	м	$d_n \text{ min}$	$4,424 \cdot 10^{-3}$
18. Максимальный средний диаметр при испарении капли жидкости	м	$d_n \text{ max}$	$2,612 \cdot 10^{-2}$
19. Минимальная температура поверхности нагрева	°C	$t_{\text{cm min}}$	110,0
20. Максимальная температура поверхности нагрева	°C	$t_{\text{cm max}}$	232,0
21. Минимальная скорость падения капли в момент соударения с поверхностью нагрева	м/с	w_{min}	0,880
22. Максимальная скорость падения капли в момент соударения с поверхностью нагрева	м/с	w_{max}	2,586
23. Число независимых опытов	-	n	50
<i>Расчетные параметры</i>			
1. Минимальное количество тепла, необходимое для испарения капли жидкости	Дж	Q_{min}	22,8
2. Максимальное количество тепла, необходимое для испарения капли жидкости	Дж	Q_{max}	249,8
3. Минимальная площадь теплообмена кипящей капли с поверхностью нагрева	м ²	$F_n \text{ min}$	$1,536 \cdot 10^{-5}$
4. Максимальная площадь теплообмена кипящей капли с поверхностью нагрева	м ²	$F_n \text{ max}$	$5,354 \cdot 10^{-4}$
5. Минимальный температурный напор	°C	Δt_{min}	10,0
6. Максимальный температурный напор	°C	Δt_{max}	132,0
7. Минимальный коэффициент теплоотдачи	Вт/(м ² ·°C)	α_{min}	5158

Окончание таблицы

Наименование	Размерность	Обозначение	Величина
8. Максимальный коэффициент теплоотдачи	Вт/(м ² ·°C)	$\alpha_{\max}$	53653
9. Безразмерный коэффициент критериального уравнения	-	A	$8,97 \cdot 10^{14}$
10. Показатель степени числа подобия Грасгофа	-	b_1	0,88
11. Показатель степени числа подобия Онезорге	-	b_2	4,41
12. Показатель степени числа подобия Рейнольдса	-	b_3	0,01
13. Средняя относительная ошибка	%	δ	3,48
14. Минимальное отклонение по числу подобия Нуссельта	%	$\varepsilon_{\min}$	-10,96
15. Максимальное отклонение по числу подобия Нуссельта	%	$\varepsilon_{\max}$	+19,59

Как видно из таблицы, для числа независимых опытов $n=50$ средняя относительная ошибка по определяемому числу подобия Нуссельта не превышает 3,48 %; максимальное отклонение единичных точек составляет +19,59 %, а минимальное – 10,96 %.

Таким образом, уравнение (7) примет вид

$$Nu = 8,97 \cdot 10^{14} \cdot Gr^{0,88} \cdot Oh^{4,41} \cdot Re^{0,01}.$$

Аналогично можно получить критериальные уравнения и для каждого периода испарения капли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кутателадзе, С. С. Тепломассообмен и волны в газодинамических системах / С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков. – Новосибирск : Наука, 1984. – 301 с.
2. Скрипов, В. П. Капля на горячей плите: появление 1/f-шума при переходе к сфероидальной форме / В. П. Скрипов [и др.] // ЖЭТФ. – 2003. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 21–23.
3. Анохина, Е. В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей / Е. В. Анохина // ЖТФ. – 2010. – Т. 80. – Вып. 8. – С. 32–37.
4. Manzello, S. L. An experimental study of high Weber of high Weber number impact of methoxy-nonafluorobutane C₄F₉OCH₃ (HFE-7100) and n-heptane droplets on a heated solid surface / S.L. Manzello, J.C. Yang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – № 45. – P. 3961–3971.
5. Рева, С. Л. Экспериментальная установка для исследования процесса капельного испарения / С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 40–43.
6. Экспериментальное исследование испарения капли с поверхности нагрева / С. Л. Рева, П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Инновационные наукоемкие технологии: теория, эксперимент и практические результаты : докл. междунар. науч.-практич. конф. / под общ. ред. чл.-кор. РАН В. П. Мешалкина. – М., Тула : ТулГУ, 2010. – 103 с.
7. Методика обработки экспериментальных исследований капельного кипения / С. Л. Рева, П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 5). – С. 42–45.
8. Голованчиков, А. Б. Моделирование нестационарного падения капли в поле сил тяжести / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 13). – С. 8–12.
9. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М., 1957. – 608 с.

УДК 66.063

А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, В. В. Миняйло

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСРЕДНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ В АППАРАТАХ С КОМБИНИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ ПОТОКОВ

Волгоградский государственный технический университет

pahp@vstu.ru

Предложены физическая и математическая модели структуры потоков для аппаратов-усреднителей концентрации, основанные на комбинации последовательного соединения зон идеального смешения и идеального вытеснения. Проведено сравнение эффективности усреднения концентрации для каждой модели при секционировании общего объема.

Математически описан и объяснен эффект, связанный с невозможностью постоянного снижения диапазона колебаний концентрации с ростом объема усреднителя в связи с уменьшением доли объема зоны идеального смешения.

Ключевые слова: усреднение концентрации, структура потоков, диапазон колебаний.

A. B. Golovanchikov, N. A. Dulkina, V. V. Minyailo

SIMULATION OF AVERAGING CONCENTRATION IN THE APPARATUS WITH A COMBINED FLOW STRUCTURE

Volgograd State Technical University

A physical and mathematical models of flow structure for apparatus Comrade averager concentration, based on a combination of serial connection zones ideal mixing and ideal displacement. A comparison of the effectiveness of averaging concentrations for each model in the partitioning of the total.

Mathematically described and explained by the effect associated with the inability of the Permanent reduction of oscillation amplitude with increasing volume concentration averager due to the reduced volume fraction ideal mixing zone.

Keywords: average concentration, the structure of flows, the magnitude of the oscillations.

Одним из важных вспомогательных процессов, применяемых в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, является усреднение концентрации компонентов перед их подачей в массообменные аппараты и химические реакторы. При этом вводятся ограничения по допустимым колебаниям концентрации, например $\pm 2\%$, при возможных колебаниях этих концентраций на входе в аппараты-усреднители до 10 и более процентов [1, 2].

Обычно в качестве аппаратов-усреднителей концентраций применяются аппараты с мешалками, так как в объектах идеального вытеснения концентрационные характеристики переносятся от входа к выходу без изменения с запаздыванием, равным среднему времени пребывания [3–9]:

$$\tau_c = V/q_v \quad (1)$$

(обозначения, размерность и величина параметров приведены в таблице 1), то есть изменения диапазона колебаний не происходит.

Известно, что наилучшим усреднителем является аппарат со структурой потоков идеального смешения, математическая модель которого имеет вид [3; 10–12]:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{C_B}{\tau} \quad (2)$$

Математическая модель идеального смешения (2) в компьютерном виде при замене дифференциалов конечными разностями приобретает вид:

$$C(\tau) = \frac{C(i-1) + C_B(i) \left(\frac{\Delta\tau}{\tau_c} \right)}{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_c}} \quad (3)$$

На рис. 1 представлен фрагмент характерной зависимости колебаний концентрации во времени на входе в усреднитель (кривая 1), а также эта концентрационная зависимость на выходе из усреднителя, когда его структура потока соответствует режиму идеального смешения (кривая 2). Как видно из графиков на рис. 1, при объеме усреднителя $V = 2,06 \text{ м}^3$ и расходе $q_v = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, максимальные отклонения концентрации $|\delta|$ регистрируемого компонента уменьшаются с 13,3 % на входе до 2 %, где

$$|\delta|\% = [C(i) - 1] \cdot 100.$$

Еще больший эффект выравнивания концентраций достигается при установке аппаратов-усреднителей последовательно друг за другом в каскад.

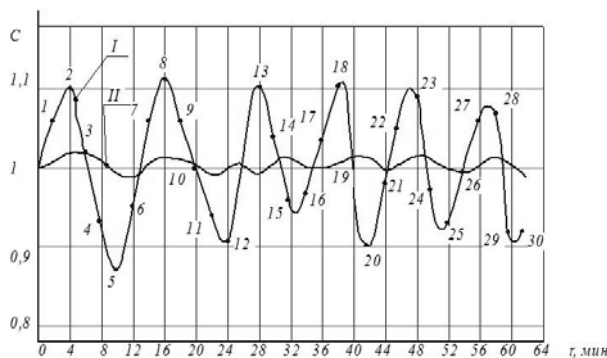


Рис. 1. Колебания относительных концентраций во времени: *I* – на входе в усреднитель; *II* – на выходе из усреднителя при числе секций $m = 1$ (объем усреднителя $V = 2,06 \text{ м}^3$; $|\delta_m| \leq 2 \%$; 1–30 – нумерация *i*-точек)

На рис. 2 приведены графики зависимостей наибольших по абсолютной величине отклонений концентраций на выходе из каскада усреднителей. Как видно из сравнения графиков *I* и *II*, для уменьшения наибольшей величины отклонений относительной концентрации в $|\delta_m| = 2 \%$ для двух усреднителей, установленных в каскад, достаточно суммарного их объема $1,38 \text{ м}^3$ против $2,06 \text{ м}^3$, когда усреднитель один и занимает весь этот объем, то есть уменьшение объема составляет 33 %. Дальнейшее секционирование с созданием каскада $m = 3$ или $m = 4$ нецелесообразно, кривые 2–4 до $|\delta_m| = 1 \%$ практически одинаковые (общий объем секций уменьшается незначительно) (рис. 2).

Еще больший эффект достигается, когда требования по выравниванию концентраций ужесточаются. Например, вместо допускаемых колебаний $|\delta_m| = \pm 2 \%$ вводится допуск $|\delta_m| = \pm 1 \%$. В этом случае объем одного усреднителя должен быть равен $V_1 = 4,75 \text{ м}^3$ (рис. 2, кривая 1), а объем двух усреднителей, установленных в каскад, $V_2 = 2,17 \text{ м}^3$, то есть суммарный объем может быть уменьшен в 2,2 раза.

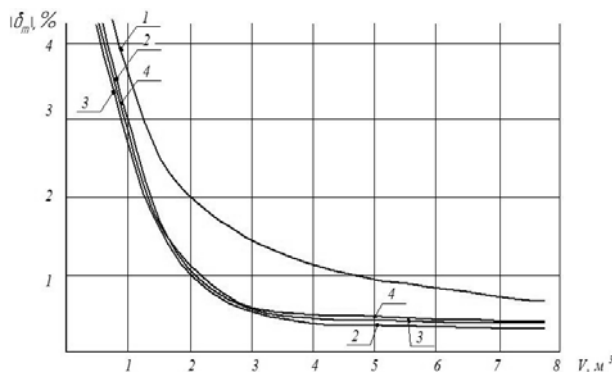


Рис. 2. Зависимости наибольших по абсолютному значению относительных концентраций от общего объема усреднителя идеального смешения для числа секций: кривая 1 – $m = 1$; кривая 2 – $m = 2$; кривая 3 – $m = 3$; кривая 4 – $m = 4$

Кроме того известно, что обеспечить идеальное смешение в больших по объему усреднителях невозможно, особенно для жидкостей с высокой вязкостью или неньютоновских и структурированных жидкостей, структура потоков которых описывается комбинированной моделью с последовательно установленными зонами идеального смешения и вытеснения, причем последовательность зон не оказывает влияние на выходную концентрацию [3, 11, 12].

Экспериментально при снятии кривых отклика в аппаратах с мешалками, время запаздывания, пропорциональное доле объема зоны вытеснения в общем объеме смесителя, увеличивается с ростом среднего времени пребывания [13, 14]. Например, в наших опытах с аппаратом объемом 5 л и пропеллерной мешалкой при числе оборотов $\omega = 100 \text{ об/мин}$ при перемешивании водно-глицеринового раствора вязкостью $\mu = 122 \text{ сПз}$ зависимость безразмерного времени запаздывания может быть описана формулой

$$\theta_3 = 1 - \exp\left(-\frac{\tau_c}{\tau_0}\right), \quad (4)$$

где θ_3 – относительное время запаздывания, численно равное доле объема зоны идеального вытеснения.

Тогда доля объема зоны идеального смешения может быть представлена в виде

$$\theta_c = \exp\left(-\frac{\tau_c}{\tau_0}\right), \quad (5)$$

где $\tau_0 = 0,72 \text{ ч}$.

Физический смысл τ_0 – это среднее время пребывания τ_c в аппарате с мешалкой, в котором зона идеального смешения составляет 36,6 % от всего объема аппарата.

С учетом выражения (5) математическая модель рассматриваемой комбинированной структуры потока запишется в виде формулы

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{C_1 - C}{\tau_c \cdot \theta_c}, \quad (6)$$

которая в компьютерном виде для произвольного входного сигнала типа, представленного на рис. 1 (кривая *I*), преобразуется к виду:

$$C(i) = \frac{C(i-1) + C_1(i) \frac{\Delta\tau}{\tau_c \cdot \theta_c}}{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_c \cdot \theta_c}}. \quad (7)$$

Таким образом, на усреднение концентрации компонентов работает не весь объем аппарата с мешалкой, а только доля объема, соответствующая режиму идеального смешения.

Как видно из графиков рис. 3, учет реальной структуры потоков с зонами идеального вытес-

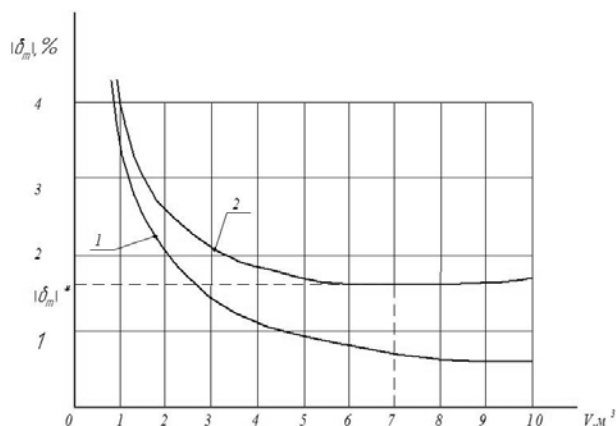


Рис. 3. Зависимости наибольших по абсолютному значению относительных концентраций от объема усреднителя:
1 – комбинированная модель структуры потоков идеального вытеснения и смешения с долей зоны смешения θ_c (уравнение 7);
2 – модель идеального смешения для всего объема усреднителя, $\theta_c = 1$ (уравнение (2))

нения и смешения значительно снижает эффективность работы усреднителя. Так, для достижения колебаний относительных концентраций, не превышающих 2 %, потребуется объем усреднителя не 2,06, а 3,33 м³, то есть в 1,6 раза больше.

Кроме того, математически описывается важный эффект, объясняющий невозможность постоянного снижения допускаемой наибольшей относительной концентрации с ростом объема усреднителя (рис. 2, кривая 1 и рис. 3, кривая 2). Существует предел, при котором рост объема усреднителя нивелируется уменьшением зоны смешения и ее доли в общем объеме аппарата (рис. 3, кривая 1). Так, для рассматриваемого случая наименьшее значение $|\delta_m|^* = 1,6 \%$ при объеме усреднителя $V^* = 7 \text{ м}^3$. При дальнейшем росте объема усреднителя V относительное значение $|\delta_m|$ растет.

Для уменьшения наибольших значений $|\delta_m|$ в этом случае надо идти не по пути увеличения объема усреднителя, а по пути секционирования его объема, так как в этом случае доля объема идеального смешения в каждой секции, а значит и всего объема смешения в усреднителе концентрации, будет возрастать.

В таблице приведены зависимости основных выходных параметров усреднителя с комбинированной структурой потоков с последовательно установленными зонами идеального смешения и идеального вытеснения от числа секций.

Зависимость основных параметров усреднителя от числа секций с зонами идеального смешения и идеального вытеснения

Число секций, m	1	2	3	4	5	6
Наименьшая возможная относительная концентрация на выходе из усреднителя $ \delta_m ^*$, %	1,6	0,364	0,304	0,21	0,187	0,139
Общий объем усреднителя V , соответствующий $ \delta_m ^*$, м ³	7,2	14,4	21,6	28,8	36	43,2
Доля зоны смешения в каждой секции θ_c	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367	0,367
Среднее время пребывания τ_c , ч	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72

Как видно из данных таблицы, секционирование всего объема усреднителя на равные части со структурами потоков идеального вытеснения и смешения в каждой секции позволяет уже при $m = 2$ снизить значение $|\delta_m|^*$ с 1,6 % до 0,36 %, то есть в 4,4 раза; общий объем усреднителя должен составить 14,4 м³. По данным таблицы можно заметить характерную зависимость возрастания общего объема V от числа секций, при этом доля зоны смешения в каждой секции и среднее время пребывания в них перемешиваемой жидкости остаются постоянными.

Попытаемся это объяснить, анализируя формулу связи объема зоны перемешивания с объемом всего усреднителя. Из формулы (5) получаем

$$V_c = V \exp\left(-\frac{V}{q_V \tau_0}\right). \quad (8)$$

Для определения экстремума возьмем производную $\frac{d m_{\Pi}}{d m}$ и приравняем ее к нулю. После алгебраических преобразований приходим к условию максимума объема зоны перемешивания в усреднителе

$$V = q_V \tau_0 \quad (9)$$

$$\text{или } \tau_c = \tau_0 = 0,72 \text{ ч.}$$

Таким образом, моделирование структуры потоков в усреднителях концентрации с последовательно расположенными зонами идеального вытеснения и смешения позволяет определить оптимальный общий объем, обеспечивающий заданную величину допустимых колебаний концентраций компонентов на выходе из аппарата и, кроме того, объяснить эффект пре-

дельного снижения этих колебаний концентраций в аппаратах с мешалками. Секционирование усреднителя, связанное с разделением всего объема на равные части с последовательным соединением секций друг с другом, позволяет увеличить зону идеального смешения в каждой секции и уменьшить предельные колебания концентрации на выходе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. В 3 т. Т. 2 : справочник / А. С. Тимонин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 1028 с.
2. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки : справочник / Е. Н. Судаков ; под ред. Е. Н. Судакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1979. – 568 с.
3. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1968. – 379 с.
4. Березин, А. С. Механизмы растворения целлюлозы в прямых водных растворителях (обзор) / А. С. Березин, О. И. Тужигов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Химия и технология элементоорганических и полимерных материалов»). – С. 5–24.
5. Федотова, Н. В. Разработка математической модели сточных вод, загрязненных смазочно-охлаждающими жидкостями / Н. В. Федотова, Д. А. Кривошеин, В. П. Дмитриенко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 (35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 3). – С. 27–31.
6. Моделирование промышленных электрофлотаторов с учетом структуры потоков / А. Б. Голованчиков

[и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 (35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 3). – С. 15–17.

7. Сиволобова, Н. О. Влияние структуры потоков на степень обеззараживания воды в электрическом поле / Н. О. Сиволобова, А. Б. Голованчиков, М. Г. Новиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (37) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Реология. Процессы и аппараты химической технологии»; вып. 1). – С. 23–27.

8. Оптимизация структуры потоков в химических реакторах / А. Б. Голованчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (49) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Реология. Процессы и аппараты химической технологии»; вып. 2). – С. 5–8.

9. Голованчиков, А. Б. Моделирование структуры потока в неизотермических реакторах вытеснения / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (61) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Реология. Процессы и аппараты химической технологии»; вып. 3). – С. 82–86.

10. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. В 2 ч. Ч. 2. Моделирование гидромеханических процессов : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 1995. – 122 с.

11. Закгейм, А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. Математическое описание процессов / А. Ю. Закгейм. – М. : Химия, 1969. – 223 с.

12. Левеншиль, О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншиль. – М. : Химия, 1969. – 223 с.

13. Тябин, Н. В. Методы кибернетики в реологии и химической технологии : учеб. пособие / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград : Волгоградская правда, 1983. – 376 с.

14. Голованчиков, А. Б. Моделирование структуры потоков в химических реакторах : монография / А. Б. Голованчиков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 240 с.

УДК 66.045.54

А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, Я. А. Орлянкина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ГРАДИРНЕ С КАПЕЛЬНЫМ ОРОШЕНИЕМ И ПРОВОЛОЧНОЙ НАСАДКОЙ

Волгоградский государственный технический университет

steeple@mail.ru

Предложена физическая и математическая модели вентиляторной градирни с капельным орошением и проволочной насадкой, выполненной из металлической проволоки или полимерных волокон. Разработан алгоритм расчета на ЭВМ коэффициентов тепло- и массопередачи, которые необходимы для проектирования промышленных вентиляторных градирен.

Ключевые слова: вентиляторные градирни, капельное орошение, проволочная насадка, коэффициенты тепло- и массопередачи.

A. B. Golovanchikov, N. A. Merentsov, V. A. Balashov, J. A. Orlyankina

MODELING HYDROMECHANICAL AND HEAT- AND MASS TRANSFER PROCESSER IN VENTILATORY COOLING TOWER WITH DRIP IRRIGATION AND THE WIRE NOZZLE

Volgograd State Technical University

The physical and mathematical model of the ventilator cooling tower of drip irrigation and wire nozzle made of metal wire or polymer fibers is proposed. Calculation algorithm is developed on the computer coefficients of heat- and mass transfer, which are necessary for the design of industrial ventilation cooling towers.

Keywords: ventilation cooling tower, drip irrigation, wire nozzle, coefficients of heat- and mass transfer.

В последнее время все большее распространение получают вентиляторные градирни с капельным орошением и проволоочной насадкой, имеющие значительные преимущества по сравнению с традиционными градирнями с пленочным орошением и листовыми или хордовыми насадками за счет интенсификации гидромеханических, тепло- и массообменных процессов [1, 2].

Они объясняются значительно большей поверхностью капель по сравнению с пленкой жидкости, скоростью ее падения и обдувания потоком воздуха, турбулизацией жидкого и воздушного потоков, движущихся навстречу друг другу, переходам лимитирующих процессов тепло- и массоотдачи от жидкого ядра пленки к границе раздела фаз к процессам, лимитирующим тепло- и массоотдачу от границы раздела фаз к ядру потока воздуха [3, 4].

Однако существующие методики для расчета промышленных градирен с пленочным орошением насадки априори предполагают лимитирующей стадией массообменные процессы, связанные с испарением капель. Для них в лабораторных исследованиях находят коэффициенты массоотдачи и массопередачи, затем определяют геометрические размеры промышленной градирни и подтверждают правильность допущения об автомодельности по теплопередаче. В капельных градирнях в связи с интенсификацией одновременно и массообменного и теплообменного процессов нельзя заранее предсказать какой из этих процессов основной, поэтому целью исследований является разработка методики одновременного определения коэффициентов тепло- и массопередачи, а также средней скорости капель по экспериментальным данным лабораторных исследований, необходимых для расчета и проектирования промышленной вентиляторной градирни с капельным орошением и новой проволоочной насадкой.

В лабораторном аппарате, моделирующем проектируемую промышленную градирню, при проведении экспериментов необходимо установить удельные расходы воды и воздуха, температуру воды и воздуха на входе, соответствующие работе промышленной градирни,

и экспериментально определить объем капель воды в лабораторном аппарате, а также температуры воды и воздуха на выходе из него (рис. 1). В этом случае результаты расчетов коэффициентов тепло- и массопередачи, полученные экспериментально в лабораторных условиях можно использовать при расчетах и проектировании промышленной градирни, так как все определяющие критерии подобия (число Рейнольдса, Прандтля, Шмидта) будут одинаковыми в модели и натуре [5–8].

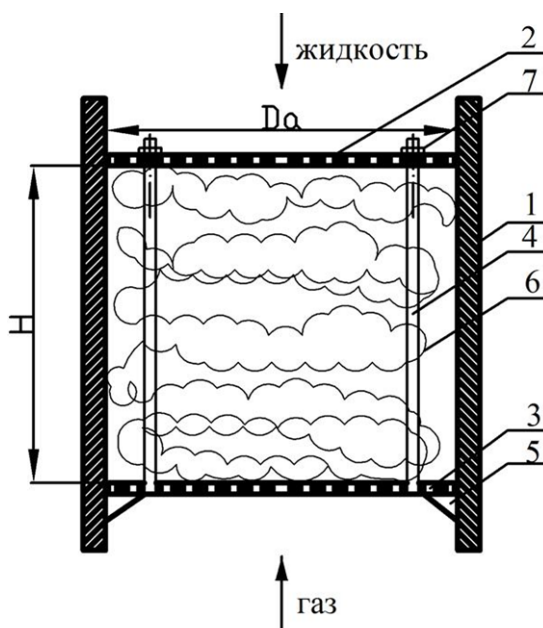


Рис. 1. Схема лабораторной установки с проволоочной насадкой:

1 – корпус; 2, 3 – верхний и нижний перфорированный диск; 4 – болты; 5 – опора под нижний диск; 6 – проволоочная насадка; 7 – гайка

Каждый эксперимент на лабораторной установке, при фиксированных значениях исходных параметров, повторялся три раза и по известной методике определялась дисперсия воспроизводимости, которая оказывалась меньше табличного значения Кохрена. Температуры воды и воздуха на входе и выходе из аппарата фиксировались с помощью платиновых датчиков ДТС 105–Pt 100. АЗ (повышенного класса точности), сигнал от которых преобразуется в микропроцессорных приборах измерения 2ТРМ0 и регулирования ТРМ10.

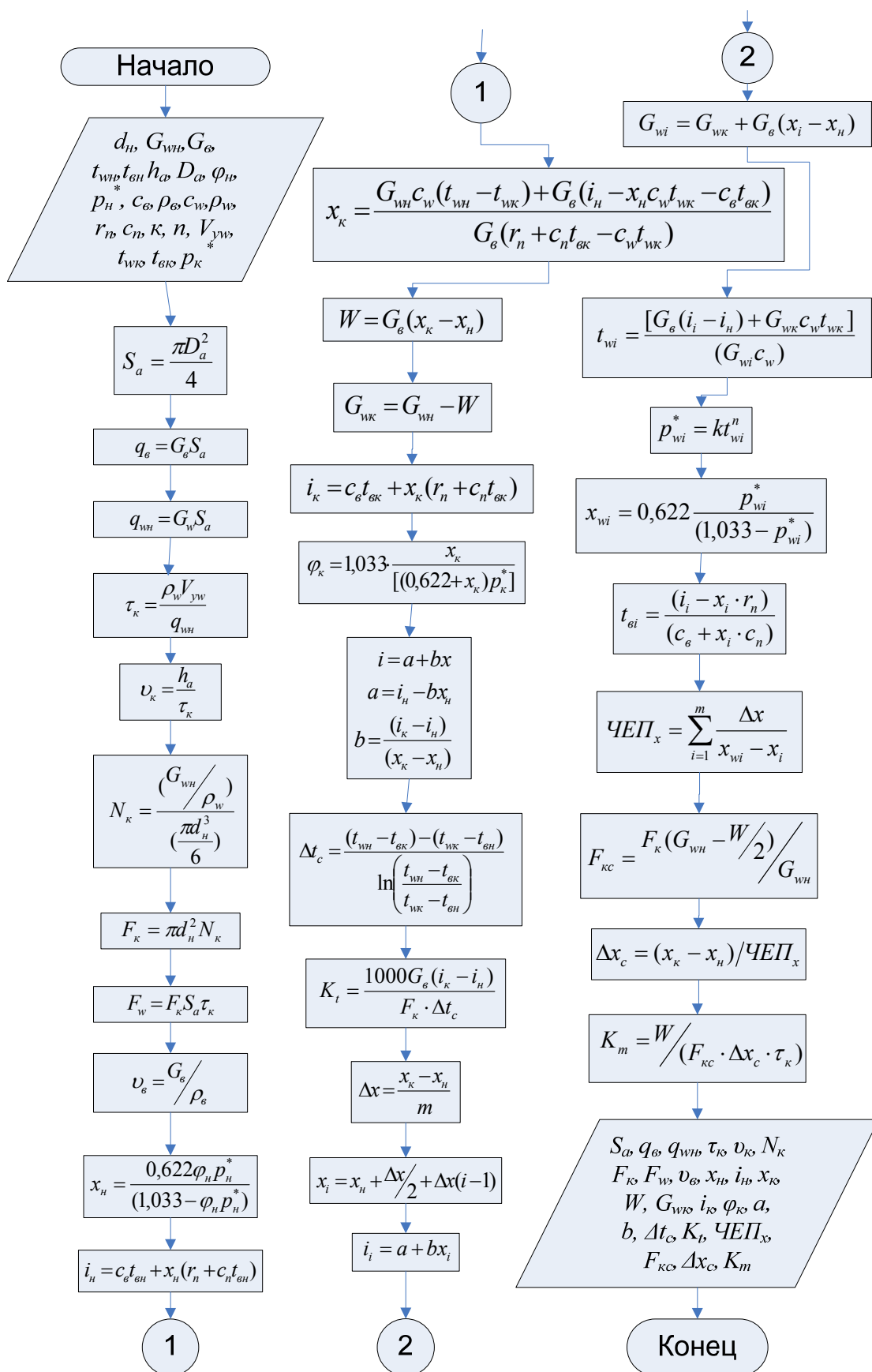


Рис. 2. Блок-схема для расчета коэффициентов тепло- и массопередачи по результатам экспериментальных исследований в лабораторном аппарате

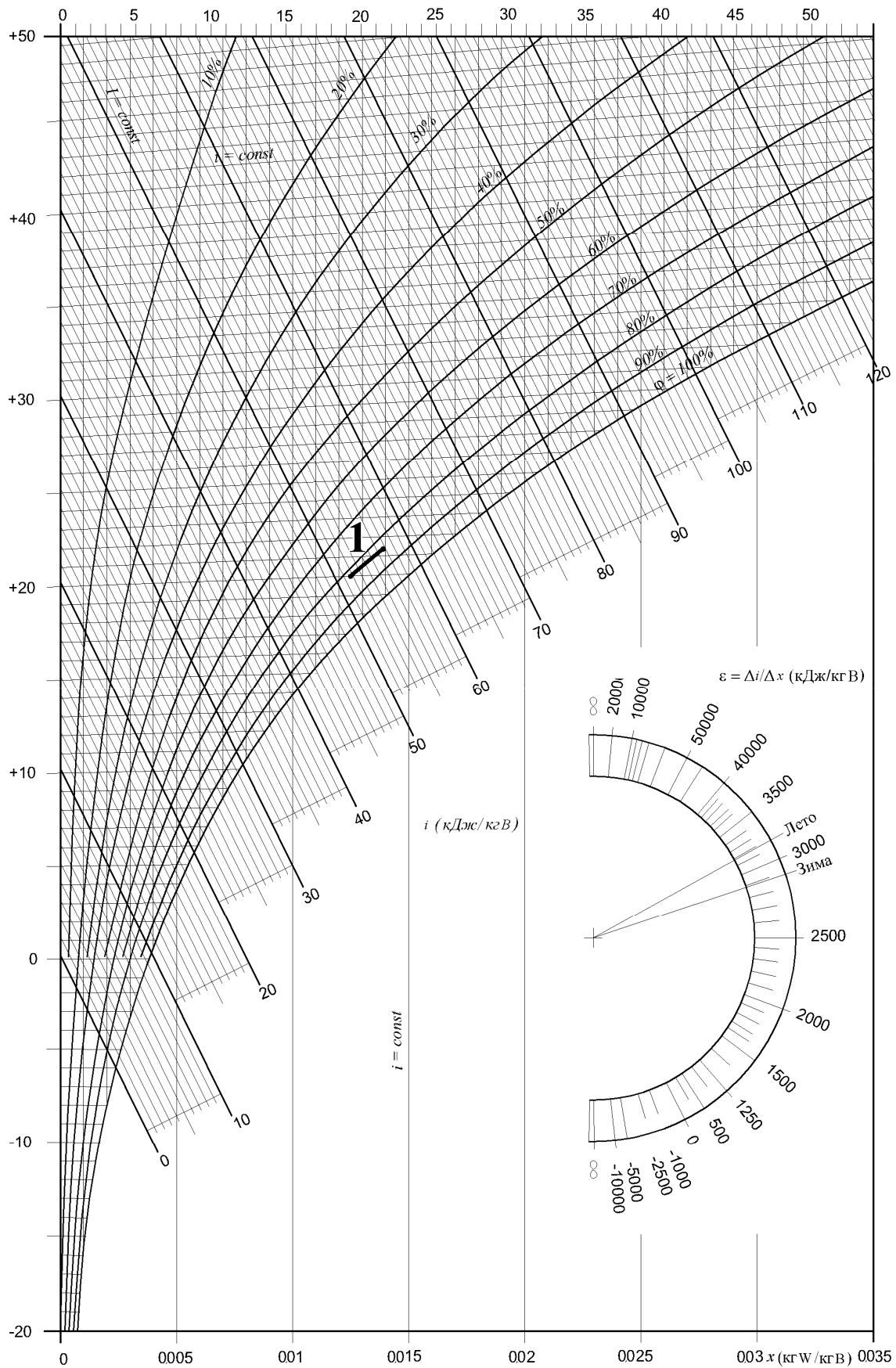


Рис. 3. Рабочая линия (1) зависимости энтальпии от влагосодержания воздуха на i - x диаграмме Рамзина

Таблица 1

Исходные, справочные данные и расчетные параметры коэффициентов тепло- и массопередачи по экспериментальным данным лабораторного аппарата с капельным орошением и проволоочной насадкой

№	Наименование	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	6
<i>Исходные справочные данные</i>				
1	Диаметр капель (2÷5 мм)	м	d_n	$3 \cdot 10^{-3}$
2	Удельный расход воды на входе [1]	кг/м ² ·с	G_{wn}	2,4
3	Удельный расход воздуха	кг/м ² ·с	G_v	3,5
4	Температура воды на входе	°С	t_{wn}	50
5	Температура воздуха на входе	°С	t_{vn}	20
6	Высота насадки в аппарате	м	h_a	1,5
7	Диаметр аппарата	м	D_a	0,1
8	Относительная влажность воздуха на входе	—	φ_n	0,85
9	Давление насыщенных паров воздуха на входе	ат	p_n^*	0,0238
10	Теплоемкость сухого воздуха	кДж/кг·К	c_v	1,01
11	Плотность воздуха	кг/м ³	ρ_v	1,2
12	Теплоемкость воды	кДж/кг·К	c_w	4,19
13	Плотность воды	кг/м ³	ρ_w	994
14	Удельная теплота парообразования при 0 °С	кДж/кг	r_n	2493
15	Теплоемкость пара	кДж/кг·К	c_n	1,97
16	Коэффициенты степенного уравнения в зависимости давления насыщенных паров от температуры (определены МНК для табличной зависимости $p^*=p^*(t_e)$)	ат —	κ n	$3,5 \cdot 10^{-5}$ 2,086
<i>Параметры, получаемые экспериментально</i>				
1	Удерживающая способность по воде (объем капель в аппарате)	м ³	V_{yw}	$1,95 \cdot 10^{-5}$
2	Температура воды на выходе	°С	t_{wk}	48,1
3	Температура воздуха на выходе	°С	t_{vk}	21,5
4	Давление насыщенных паров воды в воздухе, соответствующих t_{vk}	ат	p_k^*	0,026
<i>Расчетные параметры</i>				
1	Площадь сечения лабораторного аппарата	м ²	S_a	$7,85 \cdot 10^{-4}$
2	Массовый расход воздуха	кг/с	q_v	$2,75 \cdot 10^{-2}$
3	Массовый расход воды на входе в аппарат	кг/с	q_{wn}	$1,88 \cdot 10^{-2}$
4	Среднее время пребывания капель в лабораторном аппарате	с	τ_k	1,029
5	Средняя скорость капель	м/с	v_k	0,486
6	Число капель удельное	шт/м ² ·с	N_k	170985
7	Удельная площадь потока капель	м ² /м ² ·с	F_k	4,83
8	Поверхность капель в лабораторном аппарате	м ²	F_w	$3,9 \cdot 10^{-2}$
9	Фиктивная скорость воздуха	м/с	v_v	2,92
10	Начальное влагосодержание воздуха	кг/кг	x_n	0,0124
11	Начальное теплосодержание воздуха	кДж/кг	i_n	51,66
12	Конечное влагосодержание воздуха	кг/кг	x_k	$1,409 \cdot 10^{-2}$
13	Удельный расход испаряемой при массопередаче воды	кг/м ² ·с	W	$5,84 \cdot 10^{-3}$
14	Удельный расход воды на входе	кг/м ² ·с	G_{wk}	2,394
15	Конечное теплосодержание воздуха	кДж/кг	i_k	57,44
16	Конечная относительная влажность воздуха	—	φ_k	0,88

Окончание табл. 1

№	Наименование	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	6
17	Коэффициенты рабочей линии $i=i(x)$ в виде $i=a+bx$	кДж/кг	a b	8,607 3465,5
18	Средняя движущая сила процесса теплопередачи	°С	Δt_c	28,3
19	Коэффициент теплопередачи	Вт/м ² ·К	K_t	147,07
20	Число единиц переноса по влагосодержанию воздуха	–	χ_{EP_x}	2,75
21	Средняя удельная поверхность потока капель	м ² /м ² ·с	F_{kc}	4,826
22	Средняя движущая сила по влагосодержанию воздуха	кг/кг	Δx_c	$6,063 \cdot 10^{-2}$
23	Коэффициент массопередачи	кг/м ² ·с· (кг/кг)	K_m	0,0194

Таблица 2

**Зависимость основных расчетных параметров капель воды и воздуха вдоль рабочей линии
от влагосодержания воздуха (рис. 3)**

Наименование	Размерность	Обозначение	Величина									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Влагосодержание воздуха	кг/кг	$x_i \cdot 10^2$	1,24	1,26	1,28	1,29	1,31	1,33	1,34	1,36	1,38	1,39
2. Энтальпия воздуха	кДж/кг	i_i	51,66	52,24	52,82	53,40	53,98	54,55	55,13	55,71	56,29	56,87
3. Температура воздуха	°С	t_{ei}	20	20,15	20,63	20,45	20,6	20,75	20,9	21,05	21,2	21,35
4. Давление насыщенных паров для температуры воздуха	ат·10 ²	p_i	2,34	2,37	2,40	2,42	2,45	2,47	2,50	2,53	2,55	2,58
5. Относительная влажность	–	ϕ_i	0,85	0,852	0,853	0,855	0,857	0,858	0,860	0,862	0,863	0,865
6. Влагосодержание воздуха у поверхности капель воды	кг/кг	$x_{wi} \cdot 10^2$	7,64	7,71	7,78	7,85	7,93	8	8,07	8,15	8,22	8,29
7. Температура капель воды	°С	t_{wi}	48,1	48,29	48,48	48,67	48,86	49,05	49,24	49,43	49,64	49,81
8. Удельный расход капель воды	кг/м ² ·с	G_{wi}	2,394	2,395	2,395	2,396	2,397	2,397	2,398	2,398	2,399	2,399
9. Давление насыщенных паров при температуре капель воды t_{wi}	ат·10 ²	p_{wi}	11,2	11,79	11,48	11,58	11,67	11,77	11,86	11,96	12,56	12,15

Как видно из табл. 1 и 2 коэффициенты тепло- и массопередачи в аппаратах с капельным орошением и проволоочной насадкой превосходят эти же коэффициенты в градириях с пленочным орошением на листовой или хордовой насадкой в 1,3–1,6 раза, что соответственно снижает габариты промышленных градирен [1–3; 9; 10].

Поэтому разработанную методику и алгоритм расчета коэффициентов тепло- и массопередачи целесообразно использовать при проектировании и расчетах на ЭВМ вентиляторных градирен с капельным орошением, так как она не требует дополнительных экспериментальных исследований по изменению относительной влажности воздуха или парциального давления водяных паров, температур воды и воздуха внутри аппарата и их изменение по высоте насадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко, В. С. Градири промышленных и энергетических предприятий: справочное пособие / В. С. Пономаренко Ю. И. Арефьев ; под ред. В. С. Пономаренко. – М.: Энерготомиздат, 1998. – 376 с.
2. Ваганов, А. А. Тепломассообменные испытания сетчатой насадки / А. А. Ваганов, А. С. Тимонин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 32–36.
3. Ваганов, А. А. Исследование тепломассообменных характеристик сетчатой насадки / А. А. Ваганов, А. С. Тимонин // Безопасность в техносфере. – 2010. – № 2. – С. 37–42.
4. Ваганов, А. А. Гидравлические испытания сетчатой насадки / А. А. Ваганов, А. С. Тимонин, И. И. Сидельников // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 41–42.
5. Пат. 109015 Российская Федерация, МПК B01119/32, B01D45/00. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Н. А. Дулькина, Е. Г. Фетисова, Ю. О. Ужва, А. А. Решетников ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский го-

сударственный технический университет». – 2011118810/05 ; заяв. 10.05.2011, опуб. 10.10.2011, Бюл. № 21 (III ч.)

6. Проектирование и оптимизация режима работы напорной ветроэнергетической установки / А. Б. Голованчиков [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 (35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – 155 с. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 3). – С. 13–15.

7. Гурская, Т. Г. Энерго-информационная модель для эффекта потенциала течения / Т. Г. Гурская, В. М. Заринова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 (35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – 155 с. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 3). – С. 104–107.

8. Рева, С. Л. Экспериментальная установка для исследования работы жидкостно-газового струйного аппа-

рата / С. Л. Рева, Л. С. Рева, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (37) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – 150 с. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 40–43.

9. Гидродинамика пленочных абсорберов с регулярной насадкой / Г. В. Рябчук [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (49) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 148 с. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 2). – С. 54–56.

10. Меренцов, Н. А. Автономные системы оборотного водоснабжения для малотоннажных химических производств / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(74) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 120 с. (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 102–104.

УДК 539.3

Ю. В. Клочков, А. П. Николаев, Т. А. Киселева

АНАЛИЗ НДС ПРОИЗВОЛЬНОЙ НЕПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ В ФОРМЕ КОМПЕНСАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕКТОРНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПОЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Волгоградский государственный аграрный университет

Klotchkov@bk.ru

Изложен алгоритм расчета произвольной непологой оболочки в форме компенсатора на основе МКЭ с вариативным использованием способов интерполяции перемещений. Для расширения границ применения разработанного алгоритма в статье предложена новая формула для радиус-вектора срединной поверхности компенсатора. Показано, что использование векторного способа интерполяции перемещений позволило получить более точное решение рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: произвольная оболочка, векторная интерполяция, четырехугольный конечный элемент, компенсатор.

J. V. Klochkov, A. P. Nikolaev, T. A. Kiseleva

ANALYSIS OF VAT OF ARBITRARY NO SHALLOW SHELL IN THE FORM OF COMPENSATOR WITH THE USE OF VECTORALLY INTERPOLATION OF FIELDS MOVEMENTS

Volgograd State Agricultural University

The algorithm of calculation of arbitrary no shallow shell in the form of compensator based FEM with the use of variation methods of interpolation of displacements is described. To expand the boundaries of application of the algorithm in the paper proposed a new formula for the radius-vector of the middle surface of the compensator. It is shown that the use of the vector displacement interpolation method made it possible to obtain a more accurate solution of the problem.

Keywords: arbitrary shell, vectorally interpolation, quadrangular finite element, compensator.

На сегодняшний день оболочечные конструкции широко применяются в машиностроении и строительстве. Расчет прочности таких конструкций с помощью аналитических формул представляет затруднение, поскольку аналитическое решение имеется для узкого класса задач. Поэтому наибольшую распространенность получили численные методы анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочечных конструкций. Одним из наиболее эффективных численных методов расчета сложных оболочечных конструкций является метод конечных элементов (МКЭ).

В данной работе изложен алгоритм расчета произвольной непологой оболочки в форме компенсатора на основе МКЭ с использованием четырехугольного конечного элемента с векторной аппроксимацией перемещений.

Срединная поверхность произвольной непологой оболочки в исходном состоянии может быть задана в декартовой системе координат радиус-вектором

$$\vec{R}^0 = x\vec{i} + y\vec{j} + z(x, y)\vec{k}. \quad (1)$$

В качестве примера произвольной непологой оболочки рассмотрим компенсатор (см. рисунок).

$$\begin{cases} z = A + B \cos \frac{x}{C}, \\ y = D + E \cos \frac{x}{C}, \end{cases}$$

где $A \geq B$, $D \geq E$.

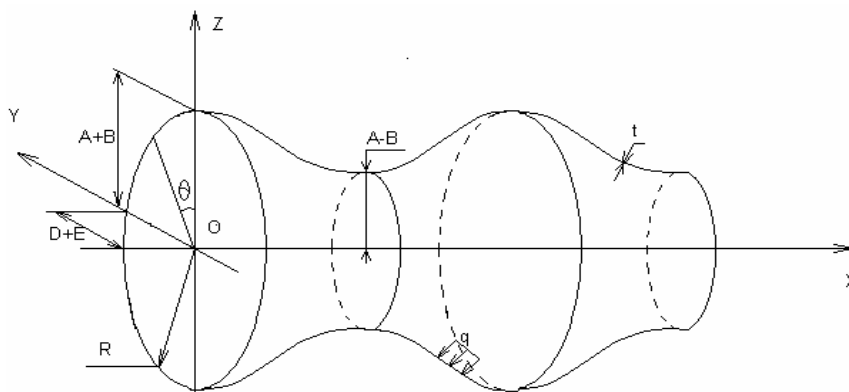
Радиус-вектор, определяющий срединную по-

верхность компенсатора, будем задавать в следующем виде:

$$\vec{R}^0 = x\vec{i} + r(x, \theta)\sin\theta\vec{j} + r(x, \theta)\cos\theta\vec{k}, \quad (2)$$

где θ – угол, отсчитываемый от оси Oz против хода часовой стрелки;

$$r(x, \theta) = \frac{\left(A + B \cos \frac{x}{C}\right) \cdot \left(D + E \cos \frac{x}{C}\right)}{\sqrt{\left(D + E \cos \frac{x}{C}\right)^2 \cos^2 \theta + \left(A + B \cos \frac{x}{C}\right)^2 \sin^2 \theta}}.$$



При использовании формулы (2) можно выполнить расчет компенсатора без каких-либо существенных ограничений его размеров.

В результате дифференцирования (2) по глобальным криволинейным координатам x , θ можно получить ковариантные векторы локального базиса

$$\vec{a}_\alpha^0 = \vec{R}_{,\alpha}^0. \quad (3)$$

Здесь и далее греческие индексы принимают значения 1, 2, причем цифра 1 соответствует координате x , а цифра 2 – θ .

Орт нормали к срединной поверхности оболочки определится векторным произведением

$$\vec{a}^0 = \vec{a}_1^0 \times \vec{a}_2^0 / \sqrt{a^0}, \quad (4)$$

где $a^0 = a_{11}^0 a_{22}^0 - (a_{12}^0)^2$ – детерминант метрического тензора, отнесенного к срединной поверхности компенсатора, ковариантные компоненты которого определяются скалярными произведениями ковариантных векторов локального базиса

$$a_{\alpha\beta}^0 = \vec{a}_\alpha^0 \cdot \vec{a}_\beta^0. \quad (5)$$

Ковариантные и смешанные компоненты тензора кривизны определяются выражениями

$$b_{\alpha\beta}^0 = \vec{R}_{,\alpha\beta}^0 \cdot \vec{a}^0; \quad b_\alpha^{0\beta} = a^{0\beta\lambda} b_{\lambda\alpha}^0. \quad (6)$$

Ковариантные компоненты тензора деформаций в произвольном слое оболочки определяются на основе уравнения механики сплошной среды [1]:

$$\varepsilon_{\alpha\beta}^\varsigma = (g_{\alpha\beta} - g_{\alpha\beta}^0) / 2, \quad (7)$$

где $g_{\alpha\beta}$, $g_{\alpha\beta}^0$ – ковариантные компоненты метрического тензора в деформированном и исходном состояниях.

Входящие в (7) $g_{\alpha\beta}$ и $g_{\alpha\beta}^0$ определяются скалярными произведениями базисных векторов $\vec{g}_\alpha$, $\vec{g}_\alpha^0$, которые, в свою очередь, могут быть получены дифференцированием радиус-векторов, определяющих положение точки, отстоящей от срединной поверхности на расстоянии ς в исходном и деформированном состояниях:

$$\vec{R}^\varsigma = \vec{R}^0 + \vec{V}; \quad \vec{g}_\alpha = \vec{R}_{,\alpha}^\varsigma = \vec{g}_\alpha^0 + \vec{V}_{,\alpha}, \quad (8)$$

где $\vec{V}$ – вектор перемещения точки, отстоящей от срединной поверхности на расстоянии ς . С учетом гипотезы прямых нормалей [2] соотношение (8) может быть записано в виде:

$$\vec{g}_\alpha = \vec{g}_\alpha^0 + \vec{v}_\alpha + \varsigma(\vec{a} - \vec{a}^0), \quad (9)$$

где $\vec{v}$ – вектор перемещения точки срединной поверхности; $\vec{a} = \frac{\vec{a}_1 \times \vec{a}_2}{\sqrt{a}}$ – орт нормали к срединной поверхности в деформированном состоянии.

Входящий в (9) вектор перемещения произвольной точки срединной поверхности и его производные могут быть представлены в текущем локальном базисе следующим образом:

$$\begin{aligned} \left\{ \vec{v}_y^L \right\}_{1 \times 24}^T &= \{ \vec{v}^i \vec{v}^j \vec{v}^k \vec{v}^l \vec{v}_{,\xi}^i \vec{v}_{,\xi}^j \vec{v}_{,\xi}^k \vec{v}_{,\xi}^l \vec{v}_{,\eta}^i \vec{v}_{,\eta}^j \vec{v}_{,\eta}^k \vec{v}_{,\eta}^l \vec{v}_{,\xi\xi}^i \vec{v}_{,\xi\xi}^j \vec{v}_{,\xi\xi}^k \vec{v}_{,\xi\xi}^l \vec{v}_{,\eta\eta}^i \vec{v}_{,\eta\eta}^j \vec{v}_{,\eta\eta}^k \vec{v}_{,\eta\eta}^l \vec{v}_{,\xi\eta}^i \vec{v}_{,\xi\eta}^j \vec{v}_{,\xi\eta}^k \vec{v}_{,\xi\eta}^l \}, \\ \left\{ \vec{v}_y^\Gamma \right\}_{1 \times 24}^T &= \{ \vec{v}^i \vec{v}^j \vec{v}^k \vec{v}^l \vec{v}_{,1}^i \vec{v}_{,1}^j \vec{v}_{,1}^k \vec{v}_{,1}^l \vec{v}_{,2}^i \vec{v}_{,2}^j \vec{v}_{,2}^k \vec{v}_{,2}^l \vec{v}_{,11}^i \vec{v}_{,11}^j \vec{v}_{,11}^k \vec{v}_{,11}^l \vec{v}_{,22}^i \vec{v}_{,22}^j \vec{v}_{,22}^k \vec{v}_{,22}^l \vec{v}_{,12}^i \vec{v}_{,12}^j \vec{v}_{,12}^k \vec{v}_{,12}^l \}. \end{aligned} \quad (11)$$

Между столбцами векторных узловых неизвестных $\left\{ \vec{v}_y^L \right\}$ и $\left\{ \vec{v}_y^\Gamma \right\}$ можно установить матричную зависимость

$$\left\{ \vec{v}_y^L \right\}_{24 \times 1} = [M]_{24 \times 24} \left\{ \vec{v}_y^\Gamma \right\}_{24 \times 1}. \quad (12)$$

Столбец векторных узловых неизвестных в глобальной системе координат может быть представлен матричным соотношением

$$\left\{ \vec{v}_y^\Gamma \right\}_{24 \times 1} = [\vec{N}]_{24 \times 72} \{ n_y \}_{72 \times 1}, \quad (13)$$

где $[\vec{N}]$ – квазидиагональная матрица, содержащая узловые векторы локального базиса; $\{ n_y \}$ – столбец, содержащий узловые значения компонент вектора перемещений, а также узловые компоненты первых и вторых производных вектора перемещения.

Соотношение (12) с учетом (13) можно записать в виде:

$$\left\{ \vec{v}_y^L \right\}_{24 \times 24} = [M]_{24 \times 24} [\vec{N}]_{24 \times 72} \{ n_y \}_{72 \times 1} = [\vec{N}]_{24 \times 72} [GM]_{72 \times 72} \{ n_y \}_{72 \times 1}. \quad (14)$$

Вектор перемещения внутренней точки дискретного элемента с учетом (14) можно представить выражением

$$\begin{aligned} \vec{v}_{,\alpha} &= \left(\{ \varphi_{,\xi} \}^T \xi_{,\alpha} + \{ \varphi_{,\eta} \}^T \eta_{,\alpha} \right) \cdot \left(\vec{a}_1^0 [N_1] + \vec{a}_2^0 [N_2] + \vec{a}^0 [N_3] \right) \{ Z_y \}; \\ \vec{v}_{,\alpha\alpha} &= \left(\{ \varphi_{,\xi\xi} \}^T \xi_{,\alpha}^2 + 2 \{ \varphi_{,\xi\eta} \}^T \xi_{,\alpha} \eta_{,\alpha} + \{ \varphi_{,\eta\eta} \}^T \eta_{,\alpha}^2 + \{ \varphi_{,\xi} \}^T \xi_{,\alpha\alpha} + \{ \varphi_{,\eta} \}^T \eta_{,\alpha\alpha} \right) \times \\ &\times \left(\vec{a}_1^0 [N_1] + \vec{a}_2^0 [N_2] + \vec{a}^0 [N_3] \right) \{ Z_y \}; \\ \vec{v}_{,\alpha\beta} &= \left(\{ \varphi_{,\xi\xi} \}^T \xi_{,\alpha} \xi_{,\beta} + \{ \varphi_{,\xi\eta} \}^T \xi_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{ \varphi_{,\eta\eta} \}^T \eta_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{ \varphi_{,\xi} \}^T \xi_{,\alpha\beta} + \{ \varphi_{,\eta} \}^T \eta_{,\alpha\beta} \right) \times \\ &\times \left(\vec{a}_1^0 [N_1] + \vec{a}_2^0 [N_2] + \vec{a}^0 [N_3] \right) \{ Z_y \}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\vec{v} = v^p \vec{a}_p^0 + v \vec{a}^0, \quad \vec{v}_{,x} = t_1^p \vec{a}_p^0 + t_1 \vec{a}^0, \quad \vec{v}_{,\theta} = t_2^p \vec{a}_p^0 + t_2 \vec{a}^0, \quad (10)$$

$$\vec{v}_{,xx} = t_{11}^p \vec{a}_p^0 + t_{11} \vec{a}^0, \quad \vec{v}_{,x\theta} = t_{12}^p \vec{a}_p^0 + t_{12} \vec{a}^0, \quad \vec{v}_{,\theta\theta} = t_{22}^p \vec{a}_p^0 + t_{22} \vec{a}^0.$$

В качестве элемента дискретизации используется четырехугольный фрагмент срединной поверхности с узлами i, j, k и l . Столбец основных узловых неизвестных для элемента 72×72 с векторной интерполяцией перемещений в локальной ξ, η и глобальной x, θ системах координат выбирается в следующем виде

$$\vec{v} = \{ \varphi \}_{1 \times 24}^T [\vec{N}]_{24 \times 72} [GM]_{72 \times 72} \{ n_y \}_{72 \times 1}. \quad (15)$$

Квазидиагональная матрица $[\vec{N}]$, включающая в свою структуру узловые векторы локального базиса, может быть представлена суммой

$$[\vec{N}]_{24 \times 72} = \vec{a}_1^0 [N_1]_{24 \times 72} + \vec{a}_2^0 [N_2]_{24 \times 72} + \vec{a}^0 [N_3]_{24 \times 72}. \quad (16)$$

Представляя вектор перемещения в левой части (15) компонентами локального базиса и принимая во внимание (16), соотношение (14) может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} v^1 \vec{a}_1^0 + v^2 \vec{a}_2^0 + v \vec{a}^0 &= \\ &= \{ \varphi \}^T \left(\vec{a}_1^0 [N_1] + \vec{a}_2^0 [N_2] + \vec{a}^0 [N_3] \right) [GM] \{ n_y \}. \end{aligned} \quad (17)$$

Из (17) могут быть получены искомые интерполяционные зависимости

$$\begin{aligned} v^1 &= \{ \varphi \}^T [N_1] \{ Z_y \}; \quad v^2 = \{ \varphi \}^T [N_2] \{ Z_y \}; \\ v &= \{ \varphi \}^T [N_3] \{ Z_y \}, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\{ Z_y \} = [GM] \{ n_y \}$.

Первые и вторые производные вектора перемещения могут быть получены в результате дифференцирования (18):

Представляя левые части равенств (18) в виде (10) и приравнявая соответствующие выражения слева и справа при базисных векторах

$\vec{a}_p^0$, $\vec{a}^0$, можно получить следующие интерполяционные выражения:

$$\begin{aligned} t_\alpha^1 &= \left(\{\varphi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha} + \{\varphi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \right) [N_1] \{Z_y\}; \\ t_\alpha^2 &= \left(\{\varphi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha} + \{\varphi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \right) [N_2] \{Z_y\}; \\ t_\alpha &= \left(\{\varphi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha} + \{\varphi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \right) [N_3] \{Z_y\}; \\ t_{\alpha\beta}^1 &= \left(\{\varphi_{,\xi\xi}\}^T \xi_{,\alpha} \xi_{,\beta} + \{\varphi_{,\xi\eta}\}^T \xi_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{\varphi_{,\eta\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{\varphi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha\beta} + \{\varphi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha\beta} \right) [N_1] \{Z_y\}; \\ t_{\alpha\beta}^2 &= \left(\{\varphi_{,\xi\xi}\}^T \xi_{,\alpha} \xi_{,\beta} + \{\varphi_{,\xi\eta}\}^T \xi_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{\varphi_{,\eta\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{\varphi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha\beta} + \{\varphi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha\beta} \right) [N_2] \{Z_y\}; \\ t_{\alpha\beta} &= \left(\{\varphi_{,\xi\xi}\}^T \xi_{,\alpha} \xi_{,\beta} + \{\varphi_{,\xi\eta}\}^T \xi_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{\varphi_{,\eta\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \eta_{,\beta} + \{\varphi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha\beta} + \{\varphi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha\beta} \right) [N_3] \{Z_y\}. \end{aligned} \quad (20)$$

При выводе матрицы жесткости и столбца узловых нагрузок четырехугольного конечного элемента использовалось равенство работ внешних и внутренних сил на возможном перемещении

$$\int_V \{\varepsilon_{\alpha\beta}^\varsigma\}^T \{\sigma^{\alpha\beta}\} dV = \int_F \{v\}^T \{P\} dF, \quad (21)$$

где $\{v\}^T = \{v^1 v^2 v^3\}$; $\{\varepsilon_{\alpha\beta}^\varsigma\}^T$, $\{\sigma^{\alpha\beta}\}$ – деформации и напряжения в произвольном слое оболочки; $\{P\}$ – столбец внешней поверхностной нагрузки.

Дальнейшее преобразование (21) осуществляется согласно стандартной конечно-элементной процедуре [4].

В качестве примера была решена задача по определению напряженно-деформированного

состояния компенсатора, находящегося под действием внутреннего давления интенсивности $q=0,2$ МПа. Были приняты следующие исходные данные: $A = 1,3$ м; $B = 0,4$ м; $D = 1,3$ м; $E = 0,42$ м; $C = 0,12$ м; модуль упругости материала равен 2×10^5 МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; толщина оболочки $t = 0,01$ м. Координаты x , θ изменялись в пределах $0 \leq x \leq 0,12\pi$ м,

$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$. Вследствие наличия плоскостей симметрии рассматривалась $\frac{1}{4}$ часть компенсатора.

Расчеты выполнялись в двух вариантах. В первом варианте при формировании матрицы жесткости четырехугольного криволинейного конечного элемента реализовывалась общепринятая скалярная интерполяционная процедура

Координаты x (м), θ (рад)	Напряжения МПа	Скалярная интерполяция				
		9x9	13x13	17x17	25x25	31x31
$x = 0,12\pi$ $\theta = 0$	σ_{xx}	-640,2	-61,1	58,2	24,0	11,8
	$\sigma_{\theta\theta}$	-220,5	-85,5	-84,6	-115,8	-124,4
$x = 0,12\pi$ $\theta = \frac{\pi}{2}$	σ_{xx}	-1505,5	-648,8	-222,6	-16,0	-2,1
	$\sigma_{\theta\theta}$	-401,7	-144,6	42,7	127,5	136,7

Координаты x (м), θ (рад)	Напряжения МПа	Векторная интерполяция				
		9x9	13x13	17x17	25x25	31x31
$x = 0,12\pi$ $\theta = 0$	σ_{xx}	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3
	$\sigma_{\theta\theta}$	-77,9	-99,0	-111,6	-123,6	-127,3
$x = 0,12\pi$ $\theta = \frac{\pi}{2}$	σ_{xx}	0,8	0,5	0,4	0,2	0,2
	$\sigma_{\theta\theta}$	84,9	105,2	117,4	129,0	132,6

[3, 4]. Во втором варианте применялась векторная интерполяция полей перемещений (15), (18). Результаты повариантного расчета представлены в таблицах, в которых приведены значения нормальных напряжений σ_{xx} , $\sigma_{\theta\theta}$ на срединной поверхности компенсатора в концевом сечении $x = 0,12\pi$ м в зависимости от варианта интерполяции и густоты сетки дискретизации.

Анализ табличного материала показывает, что в первом варианте напряжения σ_{xx} весьма существенно отличаются от нулевых значений, хотя по условиям задачи они должны быть близки к нулю, так как концевое сечение не нагружено. Во втором варианте напряжения σ_{xx} близки к нулю уже при сетке узлов 9×9 .

Анализируя значения напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ следует отметить более быструю сходимость вычислительного процесса во втором варианте. Таким образом, можно сделать окончательный вывод об эффективности векторной интерполяции полей перемещений при анализе произвольной оболочки в форме компенсатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1976. – Т. 1. – 536 с.
2. Новожилков, В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилков. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 432 с.
3. Голованов, А. И. Введение в метод конечного элемента статики тонких оболочек / А. И. Голованов, М. С. Корнишин. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1990. – 269 с.
4. Постнов, В. А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1974. – 344 с.

УДК: 51-77

М. В. Коротеев

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕФАССИФИКАЦИЯ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ

Волгоградский государственный технический университет

michail.koroteev@mail.ru

В процессе практического применения нечеткой логики в математическом моделировании возникает проблема вычисления нечетких мер и отношений над нечеткими множествами произвольного вида. Численные методы универсальны, но медленны и имеют ограниченную точность. В данной работе рассматривается подход, позволяющий вычислять дефазифицированное значение аналитически, что может существенно повысить скорость и надежность нечетких информационных систем.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткие меры, дефазификация, нечеткие числа, трапециевидные числа, обобщенно-трапециевидные числа.

M. V. Koroteev

ANALYTICAL DEFUZZIFICATION OF FUZZY NUMBERS

Volgograd State Technical University

In fuzzy logic's practical appliance in mathematical modeling there is a problem of calculating fuzzy measures and relations upon fuzzy number in common form. Quantitive methods are universal, but slow and they have limited accuracy. In this paper an approach for analytical calculation of defuzzification value. We assume it can increase rapidity and robustness of fuzzy information systems.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy measures, defuzzification, fuzzy numbers, trapezoidal numbers, fuzzy numbers in extended trapezoidal form.

При разработке нечетко-множественных экономических моделей одним из ключевых моментов является дефазификация нечетких подмножеств [13]. Роль этой процедуры, главным образом, сводится к интерпретации нечеткого вывода модели в терминах обычной четкой алгебры, то есть представления нечеткого подмножества в виде одного числа.

Для продуктивного использования нечетко-множественных моделей целесообразно использовать средства автоматизации вычислений, в частности, программные продукты, специально созданные для нечеткого моделирования. При разработке такого рода продуктов могут применяться два подхода к вычислению

различных нечетких функционалов и метрик: *аналитический* и *численный*. Численный метод предполагает представление функции принадлежности в виде $\mu(x) = \sum_i x_i \cdot \mu(x_i)$, где Δx_i – частота дискретизации носителя нечеткого подмножества. Такой подход имеет достоинства и недостатки. Несомненным его плюсом является его универсальность: для системы, использующей численный метод совершенно не важна форма функции принадлежности, тип ее носителя, высота подмножества и прочие факторы. Однако, как и любые численные методы, такой подход может дать лишь приближенное значение, скажем, центраида подмножества. Причем

точность и производительность связаны обратно пропорционально через частоту дискретизации.

С другой стороны, аналитический метод довольно сложен математически, чувствителен к форме функции принадлежности, может быть определен лишь при носителе подмножестве – отрезке действительной оси. Вместе с тем, информационная система, основанная на аналитическом методе, имеет производительность при вычислении функционала $O(1)$, что значительно ускоряет моделирование сложных процессов.

Очевидно, что оптимальным было бы совмещение в рамках одной и той же информационной системы обоих подходов, чтобы сохранить универсальность при экономии ресурсов там, где возможно аналитическое вычисление нечетких функционалов. Современные информационные технологии, такие как объектно-ориентированное программирование, предоставляют такую возможность, поэтому тема поиска аналитических выражений для нечетких функционалов является актуальной в рамках задач нечеткого моделирования.

В большинстве работ, посвященных нечеткой логике при определении различного рода нечетких функционалов применяется именно численный подход, приведенный к интегральному виду, то есть $\mu(x) = \int_x x_i \cdot \mu(x_i)$.

В экономическом моделировании могут использоваться нечеткие множества с функцией принадлежности самых различных видов. Так как большинство методик предполагает экспертное задание формы функции принадлежности по ключевым точкам, обычно выбор их форм ограничен самыми простыми случаями. С другой стороны, нечеткие числа, получающиеся в результате арифметических операций над исходными экспертно заданными числами, могут принимать неправильную форму, не ограниченную рассмотренными ниже частными видами в том случае, когда эти операции производятся численно. Существуют нечеткие арифметики, в которых результатом операции

над треугольными числами является треугольное же число, без усложнения формы ФП [8]. Однако применение таких арифметик в экономическом моделировании представляется нецелесообразным из-за их ограниченности треугольными числами.

При рассмотрении нечетких чисел в виде интервалов следует отметить, что этот вид сам по себе является частным случаем трапециевидного числа общего вида, в котором оба ската определены на интервале, вырожденном в точки. Математически, функция принадлежности интервала представляет собой функцию двух переменных из области определения (носителя) нечеткого числа:

$$\mu_I(x) = f_I(x_1, x_2) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < x_1 \\ 1, & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2 \\ 0, & \text{при } x > x_2 \end{cases} \quad (1)$$

Дефазификация такого нечеткого числа довольно тривиальна:

$$\text{centr}(I) = \frac{x_1 + x_2}{2}. \quad (2)$$

Частным случаем интервала является четкое число (в том случае, если $x_1 = x_2$). Приведенный функционал справедлив и для вырожденного случая:

$$\text{centr}(I) = \frac{x_1 + x_2}{2} = x_1. \quad (3)$$

В общем случае, введем функционал $C_f(x_1, x_2) = a$, где f – функция принадлежности; x_1, x_2 – границы интервала интегрирования, centr – метрика, интерпретируемая как «центр» нечеткого множества, результат дефазификации. Эта запись позволяет без каких-либо изменений в методике использовать любые необходимые методы дефазификации. Далее в данной работе будет приведен пример метрик дефазификации по методу центроида (центра масс, CoA).

В отличие от интервала, трапециевидное число можно представить как кусочно-линейную функцию от четырех переменных:

$$\mu_T(x) = f_T(x_1, x_A, x_B, x_4) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq x_1 \\ \frac{x - x_1}{x_A - x_1} & \text{при } x_1 < x < x_A \\ 1, & \text{при } x_A \leq x \leq x_B \\ \frac{x - x_4}{x_B - x_4} & \text{при } x_B < x < x_4 \\ 0, & \text{при } x \geq x_4 \end{cases} \quad (4)$$

Дефаззификация трапециевидного числа осложняется тем, что скаты функции принадлежности могут иметь разные по длине интервалы, что должно быть учтено в итоговой оценке центра подмножества.

Рассмотрим отдельно скаты трапециевидного числа. Центроид левого ската:

$C_{f_1} = \frac{1}{2}(x_A - x_1)$, где $f_1(x) = \frac{x - x_1}{x_A - x_1}$ – функция

левого ската. Для правого ската получаем:

$C_{f_2} = \frac{1}{2}(x_4 - x_B)$, где $f_2(x) = \frac{x - x_4}{x_B - x_4}$ – функ-

ция правого ската.

В общем случае, при использовании метода центра масс метрика дефаззификации принимает вид:

$$centr(T) = \frac{x_2 - \frac{1}{2} \int_{x_1}^{x_2} f_1(x) dx + x_3 + \frac{1}{2} \int_{x_3}^{x_4} f_2(x) dx}{2}, \quad (5)$$

$$\mu(x) = f(x_1, x_1, x_3, x_4) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_2 < x < x_3 \\ f_L(x), & \text{если } x_1 < x < x_2 \\ f_R(x), & \text{если } x_3 < x < x_4 \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (8)$$

где $f_L(x)$ – функция левого ската, $f_R(x)$ – функция правого ската нечеткого числа.

В приложении к такому нечеткому числу рассмотрим три метода дефаззификации:

- центроид – «центр масс» нечеткого числа;
- биссектриса (медиана) – медианное значение нечеткого числа;
- центр максимумов – среднее значение интервала толерантности нечеткого числа.

Для аналитического представления всех методов дефаззификации на основании формы функции принадлежности скатов нечеткого числа в обобщенно-трапециевидной форме введем две вспомогательные меры для каждого ската:

$$\varphi_L(t) = \int_{x_1}^{x_2} f_L(x) dx$$

где f_1 – функция принадлежности на левом скате, а f_2 – на правом.

При исследовании трапециевидного числа эта метрика принимает вид:

$$centr(T) = \frac{x_1 + 3x_2 + 3x_3 + x_4}{8}. \quad (6)$$

Более тривиальным для нечеткого числа в обобщенно-трапециевидной форме будет вычисление дефаззифицированного значения по методу среднего максимума. Если учесть, что нечеткое число по определению унимодально, то мы получаем:

$$centr(T) = \frac{x_2 + x_3}{2}. \quad (7)$$

Рассмотрим дефаззификацию нечетких чисел в обобщенно-трапециевидном виде [3], задаваемом следующим образом:

$$\varphi_R(t) = \int_{x_3}^{x_4} f_R(x) dx \quad (9)$$

$$\omega_L(t) = \int_{x_1}^{x_2} f_L(x) x dx$$

$$\omega_R(t) = \int_{x_3}^{x_4} f_R(x) x dx \quad (10)$$

Используя выражения (9), (10) запишем общий вид дефаззифицированных мер нечеткого числа:

центроид (center of area):

$$CoA = \frac{\omega_L(x_2) + \omega_R(x_4) + \frac{x_3 - x_2}{2}}{\varphi_L(x_2) + \varphi_R(x_4) + x_3 - x_2}; \quad (11)$$

медиана (bisector of area):

$$BoA = \begin{cases} \varphi_L(x) = \frac{l_0}{2}, & \text{если } \varphi_L(x_2) > \frac{l_0}{2} \\ x_2, & \text{если } \varphi_L(x_2) = \frac{l_0}{2} \\ \frac{x_3 + \varphi_R(x_4) - \varphi_L(x_2) + x_2}{2}, & \text{если } \varphi_L(x_2) < \frac{l_0}{2} < \varphi_L(x_2) + x_3 - x_2 \\ x_3, & \text{если } \varphi_L(x_2) + x_3 - x_2 = \frac{l_0}{2} \\ \varphi_L(x_2) + x_3 - x_2 + \varphi_R(x) = \frac{l_0}{2}, & \text{если } \varphi_L(x_2) + x_3 - x_2 < \frac{l_0}{2}, \end{cases} \quad (12)$$

где $l_0 = \varphi_L(x_2) + x_3 - x_2 + \varphi_R(x_4)$.

Центр максимума (medium of maxima):

$$MoM = \frac{x_2 + x_3}{2}. \quad (13)$$

Представленные выше методы аналитической дефазификации нечетких чисел могут найти свое применение в моделях и информационных системах нечеткого контроля, основанных на алгоритмах Мамдани [11]. Основным недостатком контроллеров такого типа называют как раз требовательность к ресурсам в ходе многократного выполнения операций дефазификации. Изложенный в данной работе подход позволит сократить сложность алгоритмов этого типа и приблизить их к вычислительной сложности алгоритмов TSK [12].

Перспективным в данном контексте представляется анализ выражений дефазификации линейной комбинации нечетких чисел вида

$$\sum \alpha_i \cdot A_i, \quad (14)$$

где α – конорма, а Σ – норма (в зависимости от выбранных норм и конорм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубятникова, М. В. Применение алгоритма выбора оптимального технологического режима при нечетко выраженных экспертных оценках / М. В. Голубятникова, // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 125–129.
2. Применение нечетких темпоральных высказываний для описания движений при эмоциональных реакциях / А. В. Заболеева-Зотова, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев, А. С. Бобков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 60–64.

3. Коротеев, М. В. Использование нечетких чисел в обобщенно-трапециевидной форме в экономическом анализе / М. В. Коротеев // Проблемы современного социума глазами молодых исследователей : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 2011.

4. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

5. Рыжов, А. П. Элементы теории нечетких множеств и измерения нечеткости : моногр. / А. П. Рыжов. – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 81 с.

6. Санжапов, Б. Х. Обоснование реализации программы социально-экономического региона в условиях нечеткой информации / Б. Х. Санжапов, И. С. Калина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(64) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 115–118.

7. Терелянский, П. В. Информационные технологии прогнозирования технических решений на основе нечетких и иерархических моделей : моногр. / П. В. Терелянский, А. В. Андрейчиков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – 204 с.

8. Штовба, С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс] / С. Д. Штовба. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/1.php>

9. Dubois, D. and Prade, H. Fuzzy Numbers: An Overview // Analysis of Fuzzy Information 1:3-39, CRCPress, BocaRaton, 1987.

10. Jang, J.-S. R., C. T. Sun and E. Mizutani. Neuro-fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.

11. Mamdani, E. H. and S. Assilian An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, Int. J. Man-machine Studies, Vol. 7, 1–13, 1975

12. Takagi, T. and M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15, 116–132, 1985.

13. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // Information and Control, 1965, vol.8, N 3, pp. 338–353.

УДК 681.586:621.37

*В. К. Михайлов, И. А. Плешаков***ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
СОСТОЯНИЕМ ЛИНЕЙНЫХ ИНЕРЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ****Волгоградский государственный технический университет**

puls@vstu.ru

Предложен метод управления инерционными объектами, использующий априорное знание структуры и свойств конкретного объекта, хотя бы приблизительное, а также наперед известный, то есть заданный закон изменения состояния объекта, или же одного или нескольких переменных этого состояния.

Ключевые слова: алгоритм управления, линейный инерционный объект.

*V. K. Mikhailov, I. A. Pleshakov***THE PRINCIPLE OF CONSTRUCTION THE ALGORITHM
OF CONTROL THE CONDITION OF LINEAR INERTIAL OBJECTS****Volgograd State Technical University**

The method of control by the inertial objects, using aprioristic knowledge of structure and properties of concrete object, even approximate, and also beforehand known, i.e. the set law of change of a condition of object, or one or several variables these conditions is offered.

Keywords: algorithm of control, linear inertial object.

Как показывают опыт и теоретические оценки, простые регуляторы, используемые в системах автоматического регулирования и осуществляющие управление без учета структуры конкретного объекта, а только по его текущему состоянию, или, вернее, по характеру отклонения реального состояния от заданного, — работают не всегда удовлетворительно, причем чем больше инерционность объекта, тем хуже [1]–[5].

Под термином «объект», в узком смысле, мы будем подразумевать какой-либо конкретный физический объект, например, термокамеру, а под термином «состояние объекта» — совокупность температур различных ее частей. Однако при анализе соотношений и алгоритмов, общих для любых систем управления, независимо от их конкретной природы, мы будем употреблять общий термин «объект». Объект считается *инерционным*, если он имеет значительные времена задержки реакции на управляющие воздействия или большие постоянные времени по сравнению с характерными требуемыми временами перехода из одного состояния в другое.

Введем следующие обозначения, термины и определения, которые будут использованы в дальнейшем и которые являются общепринятыми в литературе (см., например, [1]–[4]).

Линейным объектом будем называть любое тело или систему тел, изменение состояния которой описывается системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + \sum_{j=1}^m b_{ij}u_j, \quad i=1,2,\dots,n,$$

или, в векторном виде:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t), \quad (1)$$

$$\text{где } \vec{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

— *вектор состояния объекта* размерности n , элементы которого $x_i(t)$ — *переменные состояния*;

$$\vec{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix}$$

— *вектор управления* размерности m ;

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

— *матрица структуры* размерности $(n \times n)$, элементы которой характеризуют структуру объекта, при этом элемент a_{ij} отражает влияние j -й переменной состояния на i -ю;

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix}$$

— *матрица управления* размерности $(n \times m)$, элемент b_{ij} которой характеризует влияние j -го

элемента управления (j -го источника) на i -ю переменную состояния.

Будем считать, что параметры структуры интересующих нас объектов и размещение источников управления не зависят от времени.

Матрицы A и B системы (1) предполагаются известными, хотя для реальных объектов это бывает редко и элементы этих матриц приходится определять специальными экспериментами. Функции $u_i(t)$ в уравнениях (1) предполагаются непрерывными и неограниченными, хотя управление реальными объектами всегда является ограниченным и часто скачкообразным.

Общая задача управления линейным объектом формулируется так: пусть задана структура объекта, описываемая матрицей структуры A . Требуется построить вектор управления $\vec{u}(t)$ такой, чтобы состояние объекта $\vec{x}(t)$ обладало бы заданными свойствами. Иными словами, чтобы перевести объект из одного состояния x_1 в другое x_2 за определенное время. Если при этом допустима оптимизация управления по некоторому критерию, например, по расходу энергии, то возникает задача *оптимального программного управления*.

Однако на практике задача в такой общей постановке возникает редко. Как правило, управлять обычно требуется не всем набором переменных состояния объекта $x_1, x_2, \dots, x_n$, а какой-либо одной переменной, или несколькими. Такая задача возникает, например, при управлении температурой в некотором объеме термокамеры. При этом термокамера моделируется системой дифференциальных уравнений первого порядка с одним источником управления (источником тепла). Целью здесь является определение мощности источника q , переводящей камеру из состояния $T=T_0$ при $t=t_0=0$ в состояние $T=T_1$ при $t=t_1$, где T_0 и T_1 – соответственно начальная и конечная температуры в рабочем объеме камеры на выбранном интервале времени (t_0, t_1) ; причем полагается, что $q=\text{const}$ на каждом таком интервале.

Особенность постановки задачи в настоящей работе состоит в следующем. Пусть известна структура объекта и распределение элементов управления им, то есть известны матрицы A и B системы (1). И пусть имеется возможность измерять текущие значения нескольких или всех переменных состояния $x_i(t)$. Требуется построить управление $\vec{u}(t)$ такое, чтобы одна из переменных, например, $x_1(t)$, которую будем называть *главной переменной*, из-

менялась бы по наперед заданному (эталонному) закону $x_1^{\text{эт}}(t)$, причем управление $\vec{u}(t)$ должно строиться на основе информации о всех текущих x_i , доступных измерению. Для определенности будем считать, что измерению доступны все компоненты вектора состояния $\vec{x}(t)$. Кроме того, будем предполагать, что мощность управления $\vec{u}(t)$ достаточна, чтобы обеспечить «движение» переменной x_1 по кривой $x_1^{\text{эт}}(t)$ на самых крутых ее участках, то есть ограничений на мощность источника управления нет.

Заданный закон изменения главной переменной $x_1^{\text{эт}}(t)$ будем называть *эталонной функцией*.

Управление главной переменной x_1 на основе информации о текущих значениях остальных переменных может оказаться подходящим именно для инерционных объектов и объектов с задержкой реакции, поскольку любая модель реального объекта неточна и долговременный прогноз управления $\vec{u}(t)$ невозможен, и, следовательно, надо периодически делать его коррекцию. Однако, если такую коррекцию проводить только по текущему расхождению реальной кривой $x_1(t)$ с эталонной $x_1^{\text{эт}}(t)$, то она всегда будет запоздалой, а значит, и неправильной. Если же удастся определить взаимную связь функции $x_1(t)$ с функциями $x_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$), даже хотя бы приближенно, то наблюдение за поведением всех или нескольких $x_i(t)$ поможет проводить коррекцию управления заблаговременно, когда переменная x_1 еще не отклонилась от эталонной функции $x_1^{\text{эт}}(t)$, но поведение остальных переменных уже показывает, что без коррекции такое отклонение неизбежно наступит.

Пусть эталонный закон управления $x_1^{\text{эт}}(t)$ главной переменной x_1 задан, и требуется построить соответствующее управление $\vec{u}(t)$. Если переменная x_1 точно следует этому закону, то система (1) примет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1^{\text{эт}} \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x_1^{\text{эт}} \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где символ $\dot{x}$ означает производную по времени, т. е. $\dot{x} \equiv dx/dt$. Эту систему надо решить относительно m элементов управления u_i , и, кроме того, здесь еще $n-1$ неизвестных x_i ($i=2, 3, \dots, n$). Таким образом, n уравнений системы (2) содержат $m+n-1$ неизвестных. Следовательно

но, если $m > 1$, то задача (2) допускает наложение каких-либо дополнительных $m-1$ условий на компоненты управления u_i или на переменные состояния x_i , т. е. возможен выбор *оптимального управления* объектом по каким-либо $m-1$ критериям (например, по минимальным затратам мощности одного или нескольких источников управления и др.). Вопрос о возможности наложения дополнительных условий на переменные x_i ($i \geq 2$) связан со структурами матриц A и B .

Рассмотрим конкретный и наиболее часто встречающийся случай, когда управление объектом осуществляется от единственного источника $\vec{u} = u_1 \equiv u$ ($m=1$), а матрица B имеет вид

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{строка } i).$$

При этом возможны два варианта.

Вариант 1: $i=1$. Это соответствует непосредственному воздействию управления $u(t)$ на главную переменную x_1 . Задержки реакции x_1 на управление здесь нет, т. е. если в момент $t=0$ включить источник $u=\text{const}$, то переходная характеристика $x_1(t)$ должна иметь вид кривой с максимальной производной в нуле, как показано на рис. 1, а.

Вариант 2: $i \neq 1$. Здесь воздействие источника на переменную x_1 косвенное и, значит, должна быть некоторая задержка реакции x_1 на управление. Соответствующая переходная характеристика $x_1(t)$ будет иметь в этом случае вид кривой с нулевой производной в нуле и точкой перегиба, как показано на рис. 1, б. Время задержки τ_3 определяется по пересечению касательной в точке перегиба переходной характеристики с осью абсцисс.

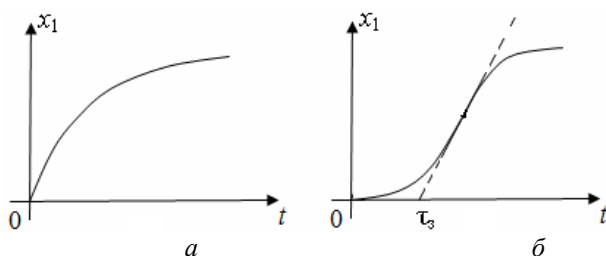


Рис. 1. Переходные характеристики управления без задержки (а) и с задержкой (б)

Существенного отличия между процедурами построения управления в этих вариантах

нет. В первом варианте задача сводится к решению системы $n-1$ дифференциальных уравнений 1-го порядка с неизвестными $x_2, x_3, \dots, x_n$, а во втором – к системе n уравнений ($n-1$ дифференциальное и одно алгебраическое) с неизвестными $x_2, x_3, \dots, x_n, u$. В обоих вариантах решение, если оно существует, единственно и не допускает наложения дополнительных условий на переменные x_i и u .

Рассмотрим первый вариант, т. е. когда $i=1$. Систему (2) в этом случае запишем в виде отдельного уравнения для u :

$$u = \dot{x}_1^{\text{эп}} - (a_{11}x_1^{\text{эп}} + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n) \quad (3)$$

и системы $n-1$ уравнений для x_i ($i \geq 2$):

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_2 &= (a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n) + a_{21}x_1^{\text{эп}}, \\ \dot{x}_3 &= (a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n) + a_{31}x_1^{\text{эп}}, \\ &\dots \\ \dot{x}_n &= (a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n) + a_{n1}x_1^{\text{эп}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) функция $x_1^{\text{эп}}(t)$ известна – это эталонная функция для главной переменной x_1 . По предположению, все переменные состояния x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) доступны измерению. Следовательно, используя начальные условия для переменных $x_2, x_3, \dots, x_n$, можно найти решение системы (4), а затем из уравнения (3) – и управление $u(t)$.

Обозначим решение системы (4), т. е. функции, удовлетворяющие уравнениям (4) и начальным условиям для $x_2, x_3, \dots, x_n$, через $x_2^{\text{эп}}(t), x_3^{\text{эп}}(t), \dots, x_n^{\text{эп}}(t)$. Эти функции есть законы (эталонные) поведения переменных $x_2, x_3, \dots, x_n$ в рамках выбранной модели объекта, если главная переменная x_1 изменяется в точности по заданному закону $x_1^{\text{эп}}(t)$. Таким образом, информация о характере управления $u(t)$, определяемая уравнением (3), должна извлекаться из периодического сравнения реального поведения переменных $x_i(t)$ и соответствующих эталонных $x_i^{\text{эп}}(t)$ ($i = 2, 3, \dots, n$). Для реальных объектов период проведения таких сравнений, т. е. время прогноза управления, или *интервал управления* τ , не должен быть большим, и тем меньше, чем меньше выбранная модель адекватна реальному объекту. Сама же адекватность определяется максимальным временем прогноза управления, когда еще обеспечивается удовлетворительное совпадение $x_1(t)$ и $x_1^{\text{эп}}(t)$ за все время управления. Поскольку вид каждой функции $x_i^{\text{эп}}(t)$ ($i \geq 2$) зависит от соответствующих начальных условий, то в начале каждого интервала

ла управления измеряются реальные значения переменных состояния – $x_i(0)$. Это и будут те начальные условия для соответствующих $x_i^{эп}$, которые должны использоваться в уравнениях (4).

Пусть теперь $i \neq 1$, т. е. рассмотрим второй вариант. Положим для определенности $i = 2$, так как это всегда можно сделать, переименовав переменные $x_2, x_3, \dots, x_n$, т. е. присвоив номер «2» той переменной, на которую источник воздействует непосредственно. Главной переменной по-прежнему остается x_1 . Система (2) в этом случае принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n + a_{11}x_1^{эп} &= \dot{x}_1^{эп}, \\ \dot{x}_2 &= a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n + a_{21}x_1^{эп} + u(t), \\ \dot{x}_3 &= a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n + a_{31}x_1^{эп}, \\ &\dots \\ \dot{x}_n &= (a_{n2}x_2 + a_{n3}x_3 + \dots + a_{nn}x_n) + a_{n1}x_1^{эп}. \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Подставляя x_2 из первого уравнения (5) во второе, получим уравнение, содержащее искомое управление $u(t)$:

$$-\frac{1}{a_{12}}(a_{13}\dot{x}_3 + a_{14}\dot{x}_4 + \dots + a_{1n}\dot{x}_n) = c_{23}x_3 + c_{24}x_4 + \dots + c_{2n}x_n + \varphi_2 + u, \quad (6)$$

и систему $n - 2$ дифференциальных уравнений, содержащих $n - 2$ неизвестных $x_3, x_4, \dots, x_n$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_3 &= c_{33}x_3 + c_{34}x_4 + \dots + c_{3n}x_n + \varphi_3, \\ \dot{x}_4 &= c_{43}x_3 + c_{44}x_4 + \dots + c_{4n}x_n + \varphi_4, \\ &\dots \\ \dot{x}_n &= c_{n3}x_3 + c_{n4}x_4 + \dots + c_{nn}x_n + \varphi_n. \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) числа c_{ij} являются простыми комбинациями коэффициентов a_{ij} , а функции $\varphi_i(t)$ ($i=2, 3, \dots, n$) – линейными комбинациями эталонной функции $x_1^{эп}(t)$ и ее первой и второй производных, т. е. все c_{ij} и φ_i известны.

Систему (7), как и систему (4), можно теперь решить относительно неизвестных $x_3, x_4, \dots, x_n$, а затем из первого уравнения системы (5) найти x_2 . Это решение и даст эталонные функции $x_2^{эп}, x_3^{эп}, \dots, x_n^{эп}$, которые будут использоваться для построения управления $u(t)$, определяемого из (6). Начальных условий здесь, однако, не $n - 1$, как в первом варианте, а $n - 2$, так как при косвенном воздействии источника на главную переменную x_1 одна из $n - 1$ переменных $x_2, x_3, \dots, x_n$ является зависимой от остальных $n - 2$ и заданной эталонной функции $x_1^{эп}$.

Изложенный подход к построению управления $u(t)$ предполагал, что главная переменная x_1 изменяется в точности по эталонному за-

кону $x_1^{эп}(t)$, т. е. возможное расхождение x_1 и $x_1^{эп}$ заранее выявляется путем сравнения других переменных x_i с соответствующими $x_i^{эп}$ и своевременно предупреждается корректировкой управления. На самом же деле переменная x_1 так или иначе будет отклоняться от $x_1^{эп}$, и алгоритм выработки управления обязательно должен учитывать это, иначе ошибка $\Delta x_1 = x_1 - x_1^{эп}$ будет нарастать. Рассмотрим процедуру формирования управления в этой ситуации.

Пусть на очередном интервале управления произошло отклонение одной из переменных состояния x_k (обозначим ее просто – x) от соответствующей эталонной функции $x^{эп}(t)$. Тогда на этом интервале надо выработать какую-то *корректирующую траекторию*, выводящую переменную x на ее эталонную траекторию $x^{эп}$. Будем считать, что интервал управления τ настолько невелик, что эталонную функцию на нем можно с достаточной точностью аппроксимировать прямым отрезком, т. е. можно записать:

$$x^{эп}(t) = x^{эп}(0) + \dot{x}^{эп}(0) \cdot t,$$

где $x^{эп}(0)$ – значение эталонной функции в начальный момент интервала управления. Среди множества путей подхода к эталонной траектории наиболее простым является прямая, т. е. в простейшем случае *уравнение корректирующей траектории* можно записать в виде:

$$x(t) = x(0) + \dot{x}(0) \cdot t, \quad (8)$$

где $x(0)$ и $\dot{x}(0)$ – реальное (измеренное) значение рассматриваемой переменной состояния и ее скорость роста в начальный момент времени, т. е. в начале очередного интервала управления. В уравнении (8) остается пока неопределенным наклон корректирующей траектории $\dot{x}(0)$. Если его выбрать реально измеренным, как и $x(0)$, то корректирующая прямая может и никогда не сойтись с эталонной, поэтому наклон $\dot{x}(0)$ надо задавать из каких-либо соображений. Выберем следующее: предположим переменной x изменяться по закону (8) так, чтобы в конце интервала управления τ она бы вышла на эталонную траекторию, как показано на рис. 2. Если мы не будем допускать слишком больших отклонений x от x^m , то мощности источника на такую траекторию всегда должно хватить, так как наклоны отрезков $x(t)$ и $x^m(t)$ в этом случае будут отличаться незначительно, а эталонная траектория для любого реального объекта по замыслу

должна обеспечиваться мощностью источника с некоторым запасом.

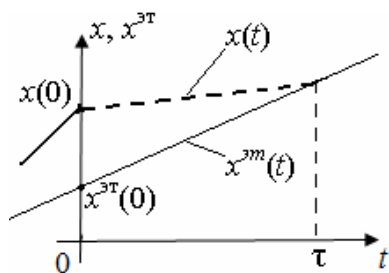


Рис. 2. Выход переменной x на свою эталонную траекторию $x^{3T}(t)$ при начальном отклонении

Итак, выберем наклон корректирующей траектории $\dot{x}(0)$ таким, чтобы

$$x(\tau) = x^{3T}(\tau).$$

Подставляя это условие в (8), получаем:

$$x^{3T}(\tau) = x(0) + \dot{x}(0) \cdot \tau.$$

Отсюда необходимая скорость изменения переменной x :

$$\dot{x}(0) = \frac{1}{\tau} [x^{3T}(\tau) - x(0)]. \quad (9)$$

Соотношение (9) очевидно также из рис. 2.

Под переменной x мы понимали одну из переменных состояния x_k . Если $k = 1$, т. е. отклонение от эталонного режима обнаружилось у главной переменной x_1 , то коррекции на очередном интервале управления подвергается закон изменения этой переменной, т. е. вместо эталонного закона $x_1^{3T}(t)$, она должна изменять-

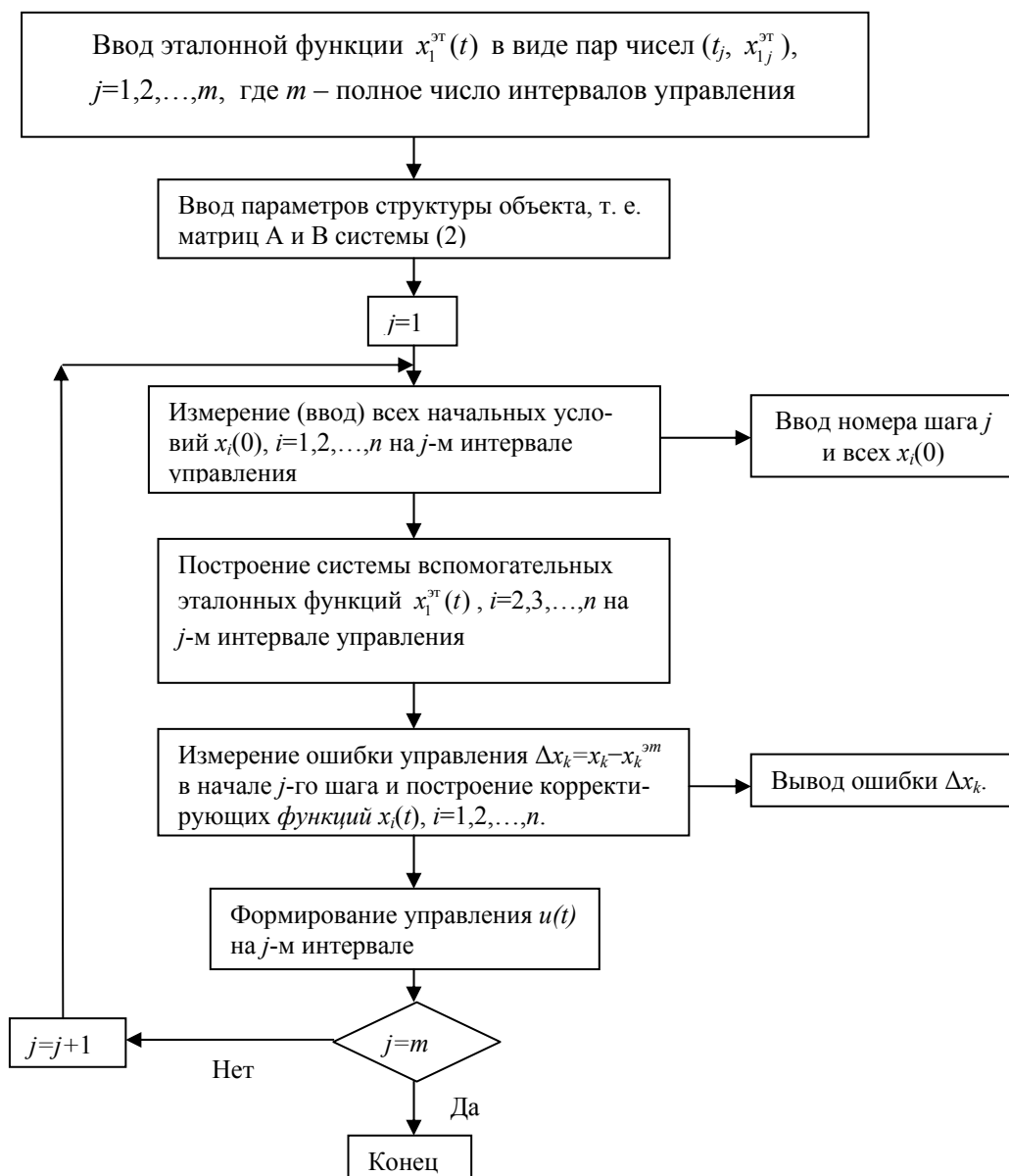


Рис. 3. Общая блок-схема алгоритма управления, основанного на построении системы эталонных функций

ться в соответствии с (8)–(9). Этот скорректированный закон (8) должен использоваться уже вместо эталонного $x_1^{эп}(t)$ для выработки управления в уравнениях (3)–(4) или (6)–(7). Если же $k \neq 1$, то необходимый (скорректированный) закон поведения $x_1(t)$, а также и все остальные требуемые законы $x_i(t)$, кроме $i = k$, необходимо вычислять путем решения системы (2) в одном из двух ее рассмотренных вариантов при известной функции $x_k^{эп}$, равной x_k , скорректированной по закону (8)–(9).

Изложенный принцип формирования управления состоянием объекта от одного источника можно реализовать в виде алгоритма, общая блок-схема которого показана на рис. 3.

УДК 62-272.5

А. Д. Чивилёв

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОРСИОННОГО ЛЮФТОВЫБИРАТЕЛЯ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва

4ibis-88@mail.ru

В работе рассматривается проблема решения задачи люфтовывбирания, применительно к полноповоротным зеркальным параболическим антеннам, при помощи торсиона. Приведен алгоритм расчета, необходимый для последующего создания САПР механических приводов АУ РЭС.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, торсион, антенна, САПР.

A. D. Chivilyov

THE ALGORITHM FOR CALCULATING TORSION BACKLASH RECEIVER FOR MECHANICAL DRIVE REFLECTOR ANTENNAS

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

This paper considers the problem solving task of eliminating backlash, with respect to a full-circle mirrored parabolic dish, with torsion. The algorithm of calculation required for the subsequent creation of CAD mechanical drives antenna installations.

Keywords: multicriteria selection, torsion, antenna CAD.

Введение

Антенны являются обязательным элементом любой системы передачи информации, использующим свободное распространение электромагнитных волн. Функции антенн в этих системах сводятся к передаче (излучению) или приему электромагнитных волн. Основной задачей современных антенных устройств (АУ) является обеспечение передачи сигнала высокого качества на требуемое расстояние. Поэтому направленность является одной из важнейших характеристик АУ.

Направленность зависит от конструкции антенны. Используя антенны с различными диаграммами направленности, можно повысить

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессекерский, В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1966. – 560 с.
2. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления / А. А. Воронов. – М.: Энергия, 1970. – 548 с.
3. Современная теория систем управления / А. А. Воронов ; под ред. К. Т. Леондеса. – М.: Наука, 1970. – 416 с.
4. Андреев, Ю. В. Управление конечномерными линейными объектами / Ю. В. Андреев. – М.: Наука, 1976. – 366 с.
5. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 586 с.
6. Клюев, А. С. Синтез быстродействующих регуляторов для объектов с запаздыванием / А. С. Клюев, В. С. Карпов. – М.: Энергоиздат, 1990. – 176 с.
7. Янушевский, Р. Т. Управление объектами с запаздыванием / Р. Т. Янушевский. – М.: Наука, 1978. – 416 с.

дальность и качество связи. Задание требуемого местоположения центрального лепестка зеркальных антенн осуществляется посредством механических систем. От точности наведения зависят все основные электрические и энергетические характеристики АУ. Отсюда – актуальность и важность задач разработки инструментария САПР механических систем управления АУ, которые рассмотрены в данной работе.

Зеркальные параболические антенны

Зеркальная осесимметричная параболическая антенна состоит из отражающей поверхности, выполненной в виде параболоида, и небольшой слабонаправленной антенны – облуча-

теля, установленной в фокусе параболоида и облучающей внутреннюю поверхность последнего. При идеальных условиях (нет влияния различных факторов на процесс передачи энергии от передающей антенны к приемной) главный лепесток ДН передающей антенны и главный лепесток ДН приемной антенны совпадают в точке максимума (рис. 1). На практике идеальные условия создать невозможно из-за потерь энергии.

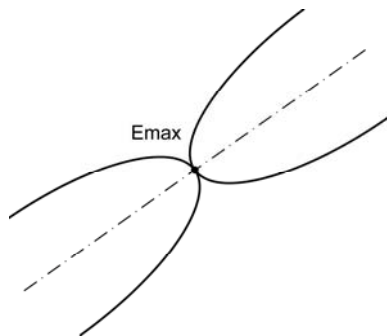


Рис. 1. Диаграмма направленности приемной и передающей антенн при идеальных условиях

На рис. 2 показано отклонение точек максимума от идеальной оси. Задачей конструктора является минимизация этих ошибок, т. е. создание такой конструкции АУ, при которой значение $\alpha_1 + \alpha_2$ стремится к нулю. Наибольшие потери точности (ошибки) наведения антенны возникают при передаче механической энергии с привода на перемещаемый узел антенны. Обыч-

но для этих целей используют механические передачи различного типа (зубчатые цилиндрические, зубчатые конические, червячные и др.).

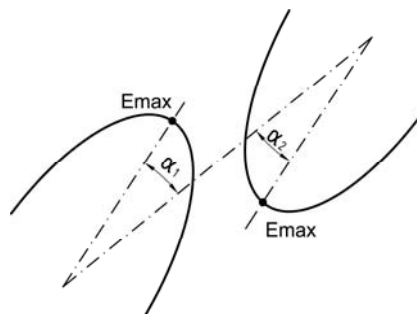


Рис. 2. Диаграмма направленности приемной и передающей антенн

Задачи точности позиционирования АУ являются весьма актуальными и входят в состав архиважных практических проблем проектирования современных АУ РТС.

Люфтовыбирание

Наиболее распространенным способом передачи механической энергии является зубчатая передача. Проблемы, возникающие при использовании в конструкциях зубчатых механических устройств управления, во многом связаны с понятием «люфт». Под *люфтом* понимается расстояние (зазор) между боковыми кромками зубьев ведомой (рис. 3, поз. 2) и ведущей (рис. 3, поз. 1) шестерен, которое необ-

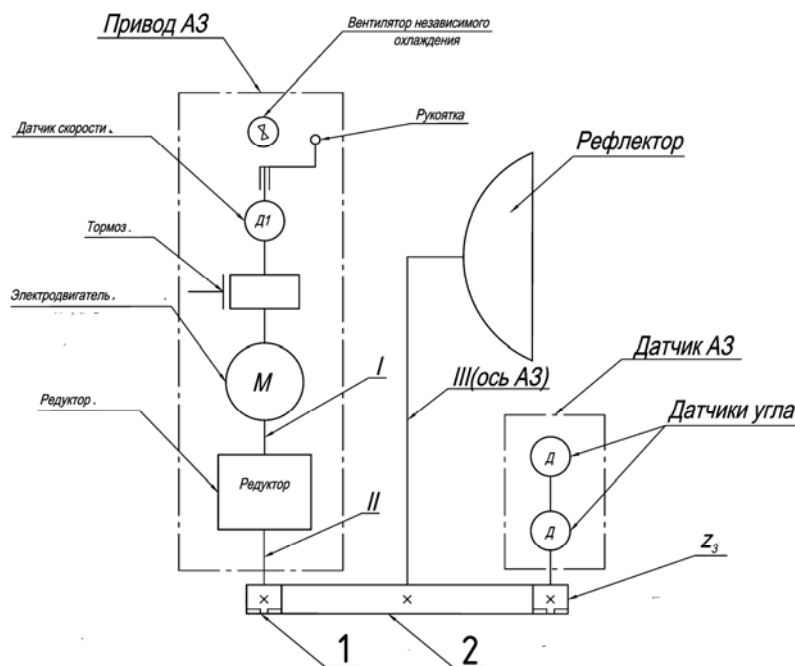


Рис. 3. Кинематическая схема двухосной зеркальной антенны. Ось АЗ

ходимо пройти зубу ведущей шестерни при смене направления вращения. Люфт может быть обусловлен конструктивными и технологическими ошибками; ошибками, вызванными износом; температурными воздействиями. На него влияет рациональный выбор материалов деталей. Он может возникать и при воздействии на конструкцию ветровых нагрузок, изменяющих крутящий момент, который необходимо преодолеть для изменения направления движения.

В основу устройств, предназначенных для выборки зазоров, положено использование ряда физико-технических эффектов. Чаще всего используют упругие свойства материала, относительные перемещения элементов, а также эффект клина. В зубчатых и червячных передачах зазоры выбираются либо в каждой отдельной передаче, либо в цепи, образующей замкнутый кинематический контур [1].

Люфтовывбиратель торсионного типа

Для исключения зазора между зубьями ведущей и ведомой шестерен, ведущую разрезают на две части плоскостью, ортогональной к оси вращения, чтобы ее зубья всегда находились в контакте с зубьями ведомой шестерни.

Торсионом называют цилиндрический стержень, заделываемый концами в деталях, подвергающихся упругому угловому смещению. Торсионом соединяются половины ведущей шестерни. При попытке торсион угловому смещению, происходит смещение половин разрезной шестерни в разных направлениях. При таком методе люфтовывбирания зубья ведущей шестерни всегда находятся в контакте с зубьями ведомой шестерни, что позволяет обеспечить минимизацию ошибки при смене направления движения (реверсе). Важным свойством торсиона являются его малые радиальные габариты и конструктивная простота, что позволяет применять его во многих конструкциях для упругой связи между вращающимися деталями [2].

Так как чаще всего торсион представляет собой цилиндрический стержень, то для него справедливы условия прочности вала круглого сечения.

Крутящий момент M_k в сечении вала численно равен алгебраической сумме внешних скручивающих моментов, действующих по одну сторону от сечения; при этом могут рассматриваться как левая, так и правая отсеченные части вала.

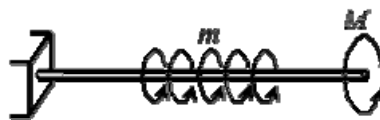


Рис. 4. Распределенная моментная нагрузка

При наличии распределенной моментной нагрузки m (рис. 4) крутящие моменты M_k связаны дифференциальной зависимостью

$$\frac{dM_k}{dz} = \pm m, \quad (1)$$

из которой вытекает следующая формула:

$$M_k = M_{k0} \pm mx, \quad (2)$$

где M_{k0} – крутящий момент в начале участка.

Согласно формуле (2) на участках с равномерно распределенной нагрузкой m крутящий момент изменяется по линейному закону. При отсутствии погонной нагрузки ($m = 0$) крутящий момент сохраняет постоянное значение ($M_k = M_{k0} = \text{const}$). В сечениях, где к валу приложены сосредоточенные скручивающие моменты, на эпюре M_k возникают скачки, направленные вверх, если моменты направлены против часовой стрелки, либо вниз – при обратном направлении моментов.

При условии, если на поверхности бруса круглого сечения нанести прямоугольную сетку, а на торцевой поверхности – радиальные линии (рис. 5.) то после деформации кручения окажется:

- что все образующие поворачиваются на один и тот же угол γ , а прямоугольники, нанесенные на поверхности, превращаются в параллелограммы;
- торцевые сечения остаются круглыми, плоскими, расстояния между ними не меняются;
- каждое сечение поворачивается относительно другого на некоторый угол ϕ , называемый углом закручивания;
- радиальные линии на торцевой поверхности остаются прямыми.

На основании этих наблюдений можно заключить, что может быть принята гипотеза Бернулли (гипотеза плоских сечений), а в вале возникают условия чистого сдвига. При этом в поперечных сечениях действуют только касательные напряжения, нормальные напряжения равны нулю.

Рассмотрим поперечное сечение вала, расположенное на некотором расстоянии z от торцевого, где $M_k = T$ (рис. 5). На элементарной площадке dF будет действовать элементарная сила tdF , а также момент, который относительно оси вала равен $(tdF)p$.

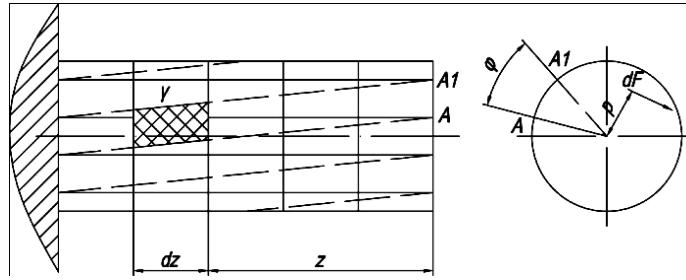


Рис. 5. Поперечное сечение вала

Крутящий момент M_k , в сечении равен:

$$M_k = \int_F p r dF. \quad (3)$$

Выделим из вала элементарное кольцо длиной dz и толщиной dp (рис. 6).

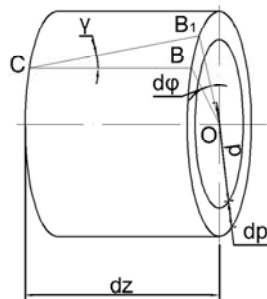


Рис. 6. Элементарное кольцо

Правый торец элемента повернется относительно левого на угол $d\varphi$, образуя CB повернется на угол γ и займет положение CB_1 . Угол γ – относительный сдвиг.

Из треугольника OBV_1 найдем:

$$BB_1 = (p + dp)d\varphi \cong p d\varphi.$$

Из треугольника CBB_1 : $BB_1 = \gamma dz$. Откуда, приравняв правые части, получим

$$\gamma = p \frac{d\varphi}{dz}.$$

На основании закона Гука при сдвиге:

$$\tau = G\gamma = Gp \frac{d\varphi}{dz}. \quad (4)$$

Подставим выражения (4) в (3):

$$M_k = \int_F p G p \frac{d\varphi}{dz} dF = G \frac{d\varphi}{dz} \int_F p^2 dF = G J_p \frac{d\varphi}{dz} \quad (5)$$

Из выражения (5) следует:

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{M_k}{G J_p}. \quad (6)$$

Подставим значение $d\varphi/dz$ в выражение (4); получим:

$$\tau = \frac{M_k}{J_p} p.$$

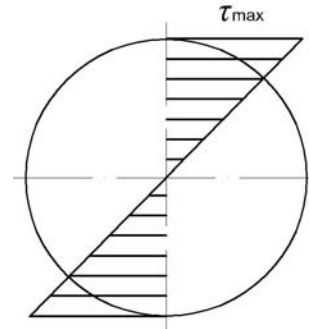


Рис. 7. Касательные напряжения

Таким образом, касательные напряжения при кручении прямо пропорциональны расстоянию от центра тяжести сечения до рассматриваемой точки и одинаковы в точках, одинаково удаленных от центра тяжести сечения (рис. 7). При $p = 0$ получим $\tau = 0$. Наибольшие напряжения возникают в точках контура сечения при $p = R$:

$$\tau_{max} = \frac{M_k}{J_p} R.$$

Величина отношения полярного момента инерции к радиусу вала называется *моментом сопротивления сечения при кручении* или *полярным моментом сопротивления*:

$$W_p = \frac{J_p}{R}.$$

Для сплошного круглого сечения

$$W_p = \frac{\pi R^3}{2} = \frac{\pi D^3}{16}. \quad (7)$$

Для кольцевого сечения

$$W_p = \frac{\pi R^3}{2} (1 - c^4) = \frac{\pi D^3}{16} (1 - c^4),$$

где $c = \frac{d}{D}$

Тогда максимальные касательные напряжения равны

$$\tau_{max} = \frac{M_k}{W_p}.$$

Условие прочности при кручении формулируется следующим образом: максимальные ка-

касательные напряжения, возникающие в опасном сечении вала, не должны превышать допустимых напряжений.

$$\tau_{max} = \frac{M_x |_{max}}{W_p} \leq [\tau], \quad (8)$$

где M_x – изгибающий момент в поперечном сечении относительно оси x ; $[\tau]$ – допустимое касательное напряжение (берется на основании опытных данных, либо по теориям прочности, соответствующим материалу).

Максимальным, изгибающим моментом в поперечном сечении, при применении торсионного люфтовывибирателя, является крутящий момент T_{max} .

Значение T_{max} указано в техническом задании (ТЗ). В ТЗ должна быть указана максимальная ветровая нагрузка, при которой АУ должна выполнять свои задачи, а также задан максимальный крутящий момент, передаваемый приводом антенны. Оба значения сравниваются и наибольшее обозначается как T_{max} .

Согласно Р 50-83-88 «Рекомендации. Расчеты и испытания на прочность. Расчеты на прочность валов и осей» определим допускаемое касательное напряжение $[\tau]$.

Предел текучести для нормальных напряжений

Пределы текучести материала σ_T и τ_T определяются на стандартных образцах, вырезанных из заготовок такого же диаметра, что у рассчитываемого вала или оси. Если предел текучести определяется на образцах, вырезанных из прутков диаметром 10–20 мм (σ'_T), то расчетный предел текучести σ_T для материала вала или оси диаметром d находится по формуле

$$\sigma_T = K_1 \sigma'_T,$$

где K_1 для легированных сталей:

$$K_1 = 1 - 0,2 \lg \frac{d}{7,5}, \text{ для } d \leq 150 \text{ мм};$$

$$K_1 = 0,74, \text{ для } d > 150 \text{ мм};$$

для углеродистых сталей $K_1 = 1$.

В качестве материала торсиона применяют легированные стали.

Предел текучести для касательных напряжений

$$\tau_T = 0,5 \sigma_T$$

Максимальное напряжение кручения на торсионе

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{W_p}$$

Из выражения (7) следует, что

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}.$$

Подставляя в выражение (8) получим:

$$\tau_{max} = \frac{16 \cdot T_{max}}{\pi d^3} \quad (9)$$

Коэффициент запаса прочности по пределу текучести

$$n_T = \frac{[\tau]}{\tau_{max}} = \frac{\tau_T}{\tau_{max}} \quad (10)$$

Статическая прочность считается обеспеченной, если $n_T \geq [n_T]$, где $[n_T]$ – минимально допустимое значение общего коэффициента запаса по пределу текучести.

Значение $[n_T]$ принимается в диапазоне $[n_T] = 1,3 - 2,0$ в зависимости от ответственности конструкции и последствий разрушения вала; принятой точности определения нагрузок и напряжений; уровня технологии изготовления и контроля; однородности и стабильности свойств материала и других факторов.

Деформации при кручении и условие жесткости вала

Из выражения (6) следует, что

$$d\varphi = \frac{M_k}{GJ_p} dz$$

$$\varphi = \int_0^z \frac{M_k}{GJ_p} dz$$

$M_k = \text{const}$ и $GJ_p = \text{const}$ на всей длине вала, следовательно:

$$\varphi = \frac{M_k l}{GJ_p}, \quad (11)$$

где GJ_p – жесткость вала при кручении; l – длина вала.

Угол закручивания, приходящийся на единицу длины, называют *относительным углом закручивания*:

$$\theta = \frac{\varphi}{l} = \frac{M_k}{GJ_p} = \frac{d\varphi}{dz}.$$

Для обеспечения требуемой жесткости вала необходимо, чтобы наибольший относительный угол закручивания не превосходил допускаемого:

$$\theta = \frac{M_k}{GJ_p} \leq [\theta].$$

Расчет длины торсиона

Для определения длины торсиона воспользуемся выражением (11):

$$\varphi = \frac{M_k l}{GJ_p}.$$

Следовательно, рабочая длина торсиона определяется из выражения:

$$l = \frac{GJ_p}{M_k} \varphi = \frac{GJ_p}{T_{\max}} \varphi.$$

При условии, что величина угла закрутки φ задана в радианах выражение приобретает вид:

$$l = \frac{GJ_p}{T_{\max} \cdot \frac{\pi}{180^\circ}} \varphi. \quad (12)$$

Полярный момент инерции J_p определяется выражением:

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32}. \quad (13)$$

G – модуль сдвига зависит от материала торсиона.

Путем преобразования выражения (12), получается зависимость:

$$T_{\max} = \frac{\pi d^3}{16 \cdot \tau_{\max}}. \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (11), получаем выражение:

$$\varphi = \frac{2l\tau_{\max}}{Gd}. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что угол закручивания, при заданном τ , всецело определяется отношением l/d .

Значение τ определяют через выражение (9), так как значение крутящего момента $T_{\max}$ известно на этапе конструирования.

Постановка задачи: определить допустимый угол закрутки торсиона ($[\varphi]$), при котором он будет способен воспринимать крутящий момент $T_{\max}$, не разрушаясь (см. выражение (10)). При этом габаритные размеры торсиона (d , l) не должны превышать допустимые ($[d]$, $[l]$), а также допустимый угол закрутки ($[\varphi]$) должен быть больше угла между зубьями ведущей шестерни ($\varphi_{\min}$).

Дано: $T_{\max}$, $[d]$, $[l]$, $\varphi_{\min}$, n_T

Найти: допустимый угол закрутки $[\varphi]$, превышающий $\varphi_{\min}$.

Совокупность $D = \{D_1, \dots, D_l\}$ всех исходных данных можно разбить на следующие подгруппы: $\{Y = \{Y_1, \dots, Y_P\}\} \cup \{OS = \{OS_1, \dots, OS_q\}\}$.

1. Совокупность $Y = \{Y_1, \dots, Y_P\}$ условий:

$M_{кр} = T_{\max}$, $M_{кр}$ – воспринимаемый торсионом крутящий момент.

2. Совокупность $OS = \{OS_1, \dots, OS_q\}$ ограничений на структуру и параметры проектируемой системы $[\varphi] \geq \varphi_{\min}$.

3. $\tau_{\max} \leq n_T \tau_T$ (следует из выражения (10)). Значение τ_T зависит от выбранного материала. Значение n_T назначается лицом, принимающим решение (ЛПР). $\tau_{\max}$ определяется выражением (9).

4. Состав совокупности (вектора) $k = \{k_1, \dots, k_m\}$ показателей качества системы. ПК системы

являются значения диаметра торсиона d и его длина l .

5. Совокупность $Ok = \{Ok_1, \dots, Ok_r\}$ ограничений, накладываемых на показатели качества.

6. $d \leq [d]$, $l \leq [l]$

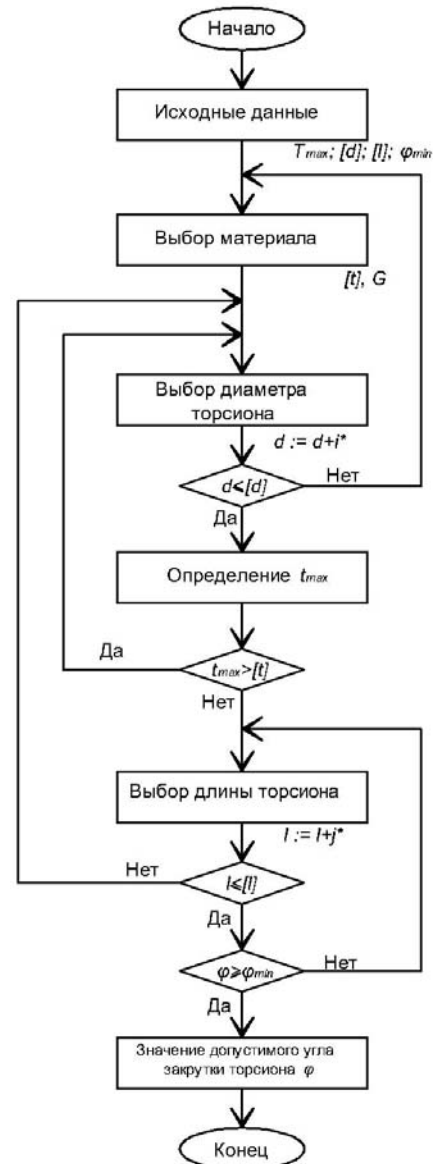


Рис. 8. Алгоритм расчета люфтовывбирателя торсионного типа

На рис. 8 представлен алгоритм решения поставленной задачи.

1. Из ТЗ получают исходные данные ($T_{\max}$, $[d]$, $[l]$, $\varphi_{\min}$, n_T).

2. Далее необходимо выбрать материал торсиона (от материала зависят значения параметров τ_T , G).

3. ЛПР назначает первичный диаметр торсиона d ($d \leq [d]$).

4. Из выражения (9) определяют значение $\tau_{\max}$. В случае если $\tau_{\max} \leq n_T \tau_T$ не выполняется, то диаметру d присваивается значение $d := d + i$ (i назначается ЛПР). Если не соблюдаются условия $\tau_{\max} \leq n_T \tau_T$ и $d \leq [d]$, то необходимо выбрать другой материал торсиона.

5. В случае выполнения этих условий ЛПР назначает первичную длину торсиона l ($l \leq [l]$). По выражению (15) определяют $[\varphi]$. Если условие $[\varphi] \geq \varphi_{\min}$ не выполняется, длине торсиона l присваивают значение $l := l + j$. Если не выполняется условие $l \leq [l]$, то необходимо вернуться к пункту 4.

6. Данный алгоритм используется в программе *torsion v.0.1*, разработанной автором в НИУ МЭИ на кафедре РПУ и прошедшей апробацию в ОКБ МЭИ.

Выводы

В работе предложен метод и алгоритм расчета механических узлов управления антеннами зеркального типа с торсионной коррекцией ошибок, вызванных люфтами в зубчатых передачах. Полученные в результате его применения расчетные оценки конструктивных параметров и материалов позволят на следующем этапе проектируемой САПР АУ производить сравнительный анализ различных конструктивных вариантов исполнения механических

передач с торсионами в многовариантной среде. Дальнейшее развитие предложенного алгоритма расчета предполагает применение статистических методов расчета ошибок и использование методов многокритериального выбора по последовательно применяемым критериям с нарастающей силой, что существенно увеличит качество решения поставленной задачи. Таким образом, предлагаемая методика решает одну из задач создания инструментальных средств САПР механических приводов АУ РЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бушуев, В. В. Практика конструирования машин : справочник / В. В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 2006. – 448 с.
2. Орлов, П. И. Основы конструирования : справочно-методическое пособие / П. И. Орлов. В 2 кн. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.
3. Жуков, К. П. Проектирование деталей и узлов машин / К. П. Жуков, Ю. Е. Гуревич. – М.: изд-во «Станкин», 2004. – 671 с.
4. Воронин, Ю. Ф. Эмпирическая методика снижения брака отливок / Ю. Ф. Воронин, В. А. Камаев, Н. А. Бойко // Управление большими системами : сборник трудов. – 2008. – № 3. – С. 134–155.
5. Кандырин, Ю. В. Автоматизация многокритериального структурирования альтернатив на основе их последовательного упорядочивания / Ю. В. Кандырин, А. М. Кошелев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 31–36.

УДК 539.193/194;535/33.34

М. Д. Элькин, Е. А. Джалмухамбетова**, А. Р. Гайсина**, О. М. Алыкова***

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДОФИМИНА И АДРЕНАЛИНА

**Саратовский государственный технический университет*

***Астраханский государственный университет*

elkinmd@mail.ru, alenna@list.ru, gaisinaalfiy@mail.ru, olga-alykova@mail.ru

На основании неэмпирических квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала дофимина и адреналина предложена интерпретация колебательных состояний соединений.

Ключевые слова: дофимин, адреналин адиабатический потенциал, колебательные состояния.

M. D. El'kin, E. A. Djalmuhambetova, A. R. Gaysina, O. M. Alykova

MODELLING OF STRUCTURE FOR DOPAMINE AND ADRENALINE

**Saratov State Technical University*

***Astrahan State University*

On the base of nonempirical quantum-mechanical calculations for parameters of adiabatic potential dopamine and adrenaline the interpretation of vibrational states are propoused.

Keywords: dopamine, adrenaline, adiabatic potential, vibrational state.

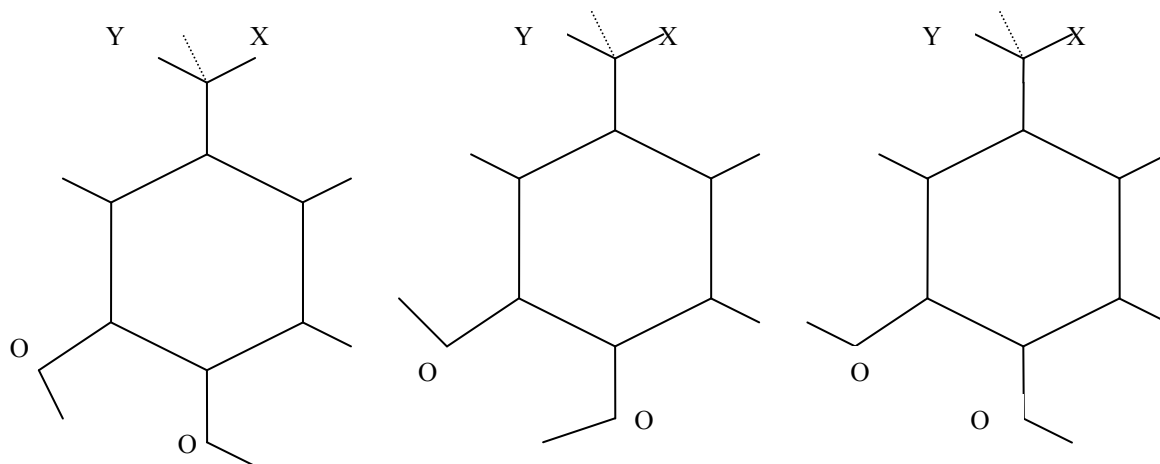
Введение

Интерес к изучению структуры и спектра молекул дофимина и адреналина (рис. 1), широко известных в медицинской практике со-

единений, понятен. Сошлемся, к примеру, на работы [1–3], где предложена теоретическая интерпретация спектра фундаментальных колебаний лишь одного из возможных конформеров

соединений. В работе [1] такая интерпретация для высокочастотного диапазона расходится с данными из монографии [4]. В работе [2] использовался классический подход для оценки параметров гармонического силового поля, недостатки которого хорошо известны [4]. В публикации [3] авторы ограничились исследованием диапазона $570\text{--}1880\text{ см}^{-1}$. Следует отметить,

что в публикациях, связанных с построением их структурно-динамических моделей на основании модельных квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала, как правило, ограничиваются гармоническим приближением теории молекулярных колебаний, а учет ангармонического смещения осуществляют с помощью различных схем масштабирования [5].



Молекулярные диаграммы дофимина ($Y=H$, $X=CH_2NH_2$) и адреналина ($Y=OH$, $X=CH_2NHCH_3$)

Структурно молекулы дофимина и адреналина относятся к 1,2,4-замещенным бензола. Как показано в монографии [6], набор фундаментальных колебаний тризамещенных бензола (C_6H_3XYZ) можно разделить на группы: колебания, характеристичные по частоте, форме и интенсивности; характеристичные по частоте и форме; характеристичные по форме. Отметим, что теоретическая интерпретация колебательного спектра осуществлена в рамках классического подхода [6] к оценке гармонических силовых постоянных (гармонических параметров адиабатического потенциала). Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальным отнесением спектра фундаментальных колебаний 1,2,4-замещенным бензола ($X=F$, CH_3), предложенным в статье [7]. Это дает основание предполагать, что предложенная в публикациях [6, 7] интерпретация спектра фундаментальных колебаний остова 1,2,4-замещен-

ных бензола будет иметь место и для молекул дофимина ($X,Y=OH$, $Z=CH_2-NH_2$) и адреналина ($X,Y=OH$, $Z=CHOH-NHCH_3$). Однако достоверность данного предположения необходимо подтвердить квантовыми расчетами.

В данной публикации на основании модельных квантовых расчетов предложены структурно-динамические модели возможных конформеров дофимина и адреналина. Все расчеты осуществлены в рамках метода функционала плотности DFT/b3LYP [8] с использованием базисов 6-311G*, 6-311G**, 6-311+G**.

Результаты модельных расчетов

Оценка ангармонического смещения полос осуществлялась по соотношению [9]

$$E_v = v_s(n_s + 1/2) + \chi_{sr}(n_s + 1/2)(n_r + 1/2). \quad (1)$$

Для ангармонических констант χ_{sr} использовались выражения из публикации [10]:

$$\begin{aligned} \chi_{ss} = & 1/16F_{ssss} - 5/48(F_{sss})^2/v_s + 1/32(F_{ssr})^2(\Omega(s;s;-r) - \Omega(s;s;r) - 12\Omega(r;r;r)) (1-\delta_{sr}). \\ \chi_{sr} = & 1/16F_{ssrr} - 1/8(F_{ssr})^2(\Omega(s;s;-r) + \Omega(s;s;r)(1-\delta_{sr}) + 3/8(F_{srt})^2(\Omega(s;r;t) - \Omega(s;r;-t) + \\ & + \Omega(s;-r;t) - \Omega(s;-r;-t))(1-\delta_{sr})(1-\delta_{st})(1-\delta_{rt}) + L(a;sr)^2/(\Omega(s;r;0) + \Omega(s;-r;0))/2. \end{aligned} \quad (2)$$

В соотношениях (1)–(3) $P_a = L(a;sr)Q^sP_r$; $L(a;sr)$ – постоянные Кориолиса; v_s – частоты гармонических колебаний (в см^{-1}); Q^s – безраз-

мерные нормальные колебательные координаты, линейно связанные с декартовыми смещениями атомов; F_{srt} и F_{srtu} – кубические и квар-

точные силовые постоянные (параметры адиабатического потенциала молекулы); $\Omega(s; \pm r; \pm t) = (\nu_s \pm \nu_r \pm \nu_t)^{-1}$ – резонансные функции; n_s – квантовые числа рассматриваемого колебательного состояния.

Тестирование возможностей метода DFT/b3LYP в предсказательных расчетах геометрической и электронной структуры 1,2,4-тризамещенных бензола использовались соответствующие дифтор- и дигидрокситолуола. Отметим, что массы фрагментов-заместителей CH_3 , OH и атома фтора близки, что обеспечивает схожесть кинематической части гамильтониана, а следовательно, и возможность использования свойств характеристичности колебаний замещенных бензола [6]. Такой подход использован в публикациях [11–13] при построении структурно-динамических моделей ряда тризамещенных бензола.

Результаты модельных квантовых расчетов фундаментальных колебательных состояний 1,2-фтор-4-метилбензола представлены в табл. 1. Они

хорошо согласуются с экспериментальными данными из работы [6] и подтверждают правомочность сделанного в монографии [5] вывода о характеристичности колебаний бензольного кольца для конкретного типа замещения. Валентные колебания связей CH бензольного остова, метильной группы и полосы низкой интенсивности исключены из рассмотрения, как не представляющие интерес для задачи спектральной идентификации соединений. Частоты деформационных колебаний метильной группы (α, β') отличаются от соответствующих колебаний в толуоле [5] на величину не более 20 см^{-1} . Частота крутильного колебания этой группы ($\sim 45 \text{ см}^{-1}$) воспроизводится только для конформеров, изображенных на рисунке. Наиболее интенсивными в спектрах ИК являются полосы, относящиеся к колебаниям бензольного остова и валентных колебаний связей CF . Использовать полос в диапазоне ниже 700 см^{-1} в задачах спектральной идентификации соединения затруднительно ввиду их незначительной интенсивности.

Таблица 1

Интерпретация фундаментальных колебаний 1,2-фтор-4-метилбензола

Форма колебаний	Эксперимент [2]			Модельный расчет			
	F,F,F	F,CH ₃ ,F	CH ₃ ,F,F	ν_r	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
Колебания типа симметрии A'							
Q, β , γ	1629	1627	1621	1660	1617	0.9	18
Q, β , γ	-	1597	1605	1641	1599	23	5.0
β ,Q,Q _{CF}	1522	1502	1508	1552	1512	203	1.6
β , β' ,Q	1443	1420	1428	1450	1414	16	1.7
β ,Q _{CF} ,Q _{CC}	1308	1277	1272	1312	1280	103	13
β , γ ,Q _{CF}	1250	1245	1234	1285	1254	23	1.4
γ ,Q _{CF} , β	1203	1195	1188	1233	1204	38	0.2
Q _{CC} , β ,Q _{CF}	1144	1140	1138	1157	1130	8.5	2.8
β	1099	1099	1100	1142	1115	30	3.3
γ	963	950	954	953	931	17	6.5
γ ,Q _{CF}	781	765	760	788	771	36	15
γ	728	720	727	729	713	4.7	7.8
γ	587	568	560	586	573	7.3	5.7
γ	503	491	503	506	495	3.8	5.0
γ	441	442	446	441	432	0.9	3.5
Колебания типа симметрии A''							
ρ	854	868	850	869	850	14	0.8
ρ	809	804	804	824	806	36	0.5
χ , ρ	603	607	607	599	586	6.1	0.1
ρ _{CF}	455	450	458	461	452	3.6	0.2

Примечание. Частоты колебаний в см^{-1} ; интенсивности в спектрах ИК – в км/моль ; в спектрах КР – $\text{Å}^4/\text{а.е.м.}$

Отметим, что согласно квантовым расчетам, геометрическая структура углеродного кольца бензола при замещении не претерпевает существенного изменения. Длин валентных связей различаются на величину $\sim 0.008 \text{ \AA}$, значения

валентных углов $\sim 1.6^\circ$.

Результаты модельных расчетов возможных конформеров 1,2-дигидро-4-метилбензола представлены в табл. 2.

Таблица 2

Интерпретация фундаментальных колебаний 1,2-дигидро-4-метил бензола

Форма колебаний	ν _{экс} [2,6]	Модель_1			Модель_2			Модель_3		
		ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР
Колебания типа симметрии А'										
q _{он}	3687	3714	69	103	3715	76	118	3701	16	173
q _{он}	3615	3658	96	70	3655	97	70	3700	96	47
Q,β,γ	1621	1620	11	32	1624	1.5	23.8	1620	4.5	22
Q,β,γ	1605	1607	18	4.3	1603	37	7.6	1603	31	16
β,Q,Q _{co}	1508	1521	129	1.5	1510	177	1.2	1525	128	1.6
β,Q	1428	1429	56	3.4	1449	9.7	2.9	1428	25	2.3
β _{сон} ,β,Q	-	1372	35	4.5	1346	16	7.8	1344	69	11
Q,β,β _{сон}	-	1309	37	2.2	1319	131	2.6	1320	7.5	2.7
β,Q _{co} ,Q _{cc}	1272	1278	114	8.0	1278	162	9.4	1289	87	8.3
Q _{co} ,β	1234	1251	158	2.6	1253	41	0.6	1260	53	2.9
β _{сон} ,β	1188	1193	56	8.6	1187	39	3.6	1175	129	3.4
β _{сон} ,β	-	1153	37	3.8	1155	95	3.8	1171	228	2.5
β,Q _{cc} ,Q _{co}	1138	1136	39	1.1	1136	9.5	3.2	1147	10	2.8
β,β _{сон}	1100	1101	99	0.9	1103	102	4.1	1100	81	1.8
γ,Q _{cc}	954	930	18	7.2	936	17	5.6	939	12	5.7
γ	760	779	18	19	776	27	18	774	10	19
γ	727	718	6.7	8.3	717	3.5	8.5	717	5.2	8.4
γ,β _{co}	560	582	17	4.6	582	4.2	7.7	575	7.5	6.3
β _{co}	503	499	1.5	6.7	501	12	3.9	501	5.2	4.3
γ	446	441	5.5	3.5	439	0.6	4.3	442	2.0	4.9
β _{co}	-	305	5.4	0.2	306	4.2	0.1	306	12	0.2
Колебания типа симметрии А''										
ρ	852	812	13	1.3	848	10	0.8	814	21	1.1
ρ	804	804	35	0.3	773	38	0.6	779	32	0.7
χ,ρ _{cc}	607	585	8.5	0.2	590	3.6	0.1	589	6.4	0.1
ρ _{co} ,χ	458	445	2.0	0.8	448	10	1.2	447	2.0	0.2
χ _{он}	-	411	69	1.2	423	69	1.0	362	48	2.5
ρ _{cc}	336	351	5.6	2.5	353	2.2	2.7	291	63	2.6
χ	235	220	4.4	1.3	222	5.8	0.8	213	6.0	1.8
χ _{он}	-	208	144	3.3	168	146	4.1	310	101	2.3

Возможна идентификация конформеров по положению полос, интерпретированных как валентные ($\nu_{\text{ОН}}$) и неплоские деформационные ($\nu_{\text{ОН}}$) колебания гидроксильных фрагментов. Для первых двух моделей это дублет ($\Delta \sim 50 \text{ см}^{-1}$) в

высокочастотном диапазоне колебательного спектра и дублет ($\Delta \sim 40 \text{ см}^{-1}$) в низкочастотном диапазоне. Для третьей модели щелью между валентными колебаниями связей ОН можно пренебречь, а положение полос, интерпретиро-

ванных как неплоские деформационные колебания этих связей, более чем на 50 см^{-1} отличается от первых двух моделей. Для третьей модели, согласно модельным квантовым расчетам, в спектре значительную интенсивность имеет полоса $\sim 300 \text{ см}^{-1}$, интерпретированная как неплоское деформационное колебание связи CC (ρ_{CC}). Сильный по интенсивности в ИК-спектре дублет в диапазоне $300\text{--}380 \text{ см}^{-1}$ можно использовать как признак спектральной идентификации конформера модели 3. Для идентификации третьей модели следует использовать полосу $\sim 1170 \text{ см}^{-1}$, интерпретированную как плоское деформационное колебание валентного угла COH (β_{COH}). Для первых двух моделей колебания проявляются в виде дублета ($\Delta \sim 40 \text{ см}^{-1}$) вдвое меньшей суммарной интенсивности в ИК-спектре.

Подчеркнем факт характеристичности колебаний бензольного остова по частоте, а в тех случаях, где нет смешивания по форме колебаний с деформационными колебаниями гидроксильных фрагментов, и по интенсивности для данного типа тризамещенных бензола. Приведенные в табл. 1 экспериментальные данные по положению частот фундаментальных колебаний 1,2,4-замещенных бензола хорошо согласуются с подобными расчетными данными в табл. 2. Отметим только, что в работах [1, 2] значение частоты, интерпретированной как валентное колебание связей OH (ν_{OH}) смещено в длинноволновую область колебательного спек-

тра на величину $\sim 3000 \text{ см}^{-1}$ по сравнению с данными из табл. 2 и предлагаемым отнесением для указанного колебания из работы [14]. Это результат того, что эксперимент, представленный в работах [1, 3], соответствует конденсированному состоянию дофимина и адреналина. Данные, приведенные в табл. 2–4, соответствуют свободным молекулам. Аналогичная ситуация имеет место для частот колебаний связей OH в метиловом спирте [6].

Результаты проведенного тестирования подтверждают сделанное выше предположение относительно характеристичности частот фундаментальных колебаний бензольного остова 1,2,4-тризамещенных бензола. Изменение значений интенсивностей полос связано как с различными электронными свойствами заместителей, так и со смешиванием форм нормальных колебаний, интерпретированных как деформационные колебания связей CH ($\text{H}=\text{H}$, F , O). Последний факт особенно проявляется в 1,2-дигидро-4-метил-бензоле (диапазон $1550\text{--}1100 \text{ см}^{-1}$).

Интерпретация колебательного спектра дофимина представлена в табл. 3. В модельных расчетах предполагалась, что молекула принадлежит группе симметрии Cs (плоскость углеродного кольца есть плоскость симметрии молекулы). Крутильные колебания воспроизвелись для случая, когда фрагменты CH_2C и CH_2NH_2 заместителя находятся в трансположении относительно друг друга.

Таблица 3

Интерпретация фундаментальных колебаний дофимина

Форма колебаний	$\nu_{\text{эксп}}$	$\nu_{\text{г}}$	Модель_1			Модель_2			Модель_3		
			$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
Плоские колебания 1,2,4-тризамещенного безольного фрагмента (тип симметрии A')											
Q, γ , β	1621	1663	1621	9.6	37	1622	20	8.7	1618	4.1	32
Q, γ , β	1596	1645	1605	178	6.1	1601	39	8.5	1601	35	12
β ,Q	1522	1559	1521	146	2.0	1511	188	1.1	1526	138	1.5
β_{OH} , β	1382	1404	1376	38	6.7	1369	6.2	3.7	1364	14	5.1
β_{OH} , β	1326	1354	1319	13	1.0	1321	140	1.9	1324	7.6	1.2
Q _{CC} , β	1277	1314	1279	114	13	1281	126	13	1286	104	11
Q _{CO} ,Q	1234	1292	1259	132	1.1	1256	48	0.6	1266	30	2.6
Q _{CO} , β_{OH}	—	1284	1247	73	3.7	1255	59	0.3	1257	36	5.3
β_{OH} , β	1188	1214	1193	54	8.3	1188	31	5.3	1174	309	1.0
β_{OH} , β	1176	1185	1149	75	3.4	1153	102	4.1	1169	67	3.2
β ,Q	1144	1166	1135	7.2	2.4	1135	7.2	2.6	1144	5.2	3.4
γ , β_{OH}	1099	1128	1103	107	1.0	1101	92	4.3	1100	82	1.3
γ	922	958	931	2.7	5.8	937	13	5.0	939	12	4.7

Окончание табл. 3

Форма колебаний	$\nu_{\text{эксп}}$ []	$\nu_{\text{г}}$	Модель_1			Модель_2			Модель_3		
			$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
γ	771	794	779	39	18	775	48	18	774	22	18
γ	728	758	741	5.8	8.4	741	10	7.3	742	7.2	8.7
$\beta_{\text{CO}}, \gamma$	571	588	579	19	2.8	578	9.3	5.4	567	10	3.3
$\beta_{\text{CC}}, \beta_{\text{CC}'}$	445	467	456	3.4	1.0	456	5.7	0.9	460	4.2	1.5
$\beta_{\text{CC}}, \beta_{\text{CC}''}$	340	337	330	9.5	0.3	330	1.0	0.3	330	0.6	0.6
$\beta_{\text{CO}}, \gamma$	312	316	310	3.2	3.6	309	6.3	3.3	310	16	2.2
$\beta_{\text{CO}}, \gamma$	285	297	291	2.2	4.9	292	3.7	4.3	290	1.8	6.1
Неплоские колебания 1,2,4-тризамещенного безольного фрагмента (тип симметрии A')											
ρ	932	936	914	1,6	0,2	890	3,5	0,1	887	1,0	0,1
ρ	854	849	818	29	0,6	851	11	0,7	820	24	0,8
ρ	804	807	806	13	0,7	780	29	0,4	783	22	0,7
χ, ρ_{CO}	688	706	690	0,1	0,1	689	0,2	0,1	691	0,2	0,1
ρ_{CC}, χ	603	600	584	9,9	0,3	588	4,4	0,1	588	7,6	0,2
χ, χ_{OH}	434	456	445	2,9	0,9	448	11	1,3	446	1,6	0,2
ρ_{CO}, χ	330	343	350	7,7	2,2	352	4,3	2,5	306	6,7	4,8
χ	237	223	220	2,5	1,2	224	19	0,3	213	4,9	1,4
χ	152	157	155	4,7	1,0	156	0,1	0,5	152	0,1	0,5
Колебания фрагмента $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{NH}_2$											
ν_{OH}	3615	3844	3712	69	103	3714	79	125	3698	42	152
ν_{OH}		3803	3658	101	77	3654	102	78	3696	72	75
ν_{NH}	3427	3553	3432	0,1	60	3431	0,1	61	3431	0,1	60
ν_{NH}	3360	3478	3361	1,1	110	3360	1,0	111	3360	1,1	110
γ_{HNH}	1623	1666	1622	27	5,2	1624	5,0	24	1622	24	5,6
α_{CNH}	1430	1388	1364	10	6,2	1349	8,0	11	1350	52	16
ν_{CN}	1059	1092	1067	8,2	6,6	1067	3,7	5,4	1066	3,9	6,0
$\nu_{\text{C-C}}$	1040	1049	1025	34	1,8	1024	74	2,4	1025	44	2,3
β_{CNH}	780	861	840	223	3,8	844	198	3,1	843	217	3,3
χ_{OH}	-	-	415	70	1,2	424	66	1,0	362	63	2,4
χ_{OH}	303	-	199	141	3,0	190	131	4,3	311	137	0,1
χ_{CN}	-	293	287	41	1,9	287	42	1,9	287	49	1,8

Пр и м е ч а н и е . Частоты колебаний в см^{-1} ; интенсивности в спектрах ИК – в км/моль ; в спектрах КР $\text{\AA}^4/\text{а.е.м.}$

Для спектральной идентификации конформеров можно использовать интенсивность ИК-полос в диапазоне $1200\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ и полосы, интерпретированные как деформационные неплоские колебания связей ОН (χ_{OH}). Отметим, что использование базиса 6-311G+** [7] приводит к смещению расчетных значений колебаний ($\Delta \sim 50\text{ см}^{-1}$). Однако существенная интенсивность указанных полос в ИК-спектре в диапазоне ниже 400 см^{-1} не создает трудностей в интерпретации низкочастотного диапазона.

Выявленная закономерность в расположе-

нии поло-бензольного фрагмента 1,2,4-тризамещенных бензола позволяет интерпретировать фундаментальные колебания фрагмента $\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{NH}_2$. Их хорошее согласие с экспериментальными данными по характеристическим частотам колебаний для нормальных парафинов и метиламина [5] подтверждает правомочность используемой в монографии [5] схемы переноса системы гармонических силовых постоянных из родственных молекулярных фрагментов для решения обратных задач в рамках классической теории молекулярных колебаний.

Таблица 4

Интерпретация фундаментальных колебаний адреналина

Форма колебаний	Модель_1			Модель_2			Модель_3		
	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
Q, γ , β	1616	16	80	1619	4.4	68	1615	11	62
Q, γ , β	1604	29	7.7	1602	43	7.4	1601	32	29
β	1517	118	9.2	1506	160	3.0	1520	118	6.4
Q, β , $\nu_{\text{ОН}}$	1439	98	3.7	1454	11	15.0	1436	8.7	5.5
β , $\nu_{\text{ОН}}$	1373	28	16	1372	15	8.5	1364	20	27
Q, β	1279	210	21	1286	59	19	1287	142	19
Q, β	1274	23	1.7	1273	132	6.9	1280	3.9	2.5
Q _{CO} , γ , β	1252	84	4.2	1253	39	5.5	1261	30	6.1
β , $\nu_{\text{ОН}}$	1188	77	21	1183	31	3.6	1173	278	2.5
$\nu_{\text{ОН}}$	1146	59	12	1147	100	8.5	1156	57	3.3
β , $\nu_{\text{ОН}}$	1139	42	4.9	1139	26	8.2	1148	4.9	11
γ	1092	53	2.6	1090	65	10	1089	44	5.4
γ	933	23	7.5	938	34	5.8	940	27	6.3
ρ	931	6.7	1.1	910	0.9	1.0	909	0.6	1.6
ρ	824	32	7.1	853	6.1	7.7	822	22	4.6
ρ	816	0.3	1.1	790	29	5.0	793	18	3.9
γ	785	11	11	782	7.1	3.6	784	14	5.4
γ	771	40	18	773	42	23	769	20	23
χ , ρ_{CO}	698	1.8	0.9	697	1.7	1.0	698	1.3	0.8
χ , ρ_{CO}	621	9.6	3.1	627	6.1	3.2	627	9.3	3.2
γ , β_{CO}	617	8.7	1.3	616	25	1.5	616	15	1.5
γ	582	13	3.9	581	7.0	6.8	575	8.0	4.4
ρ_{CO} , $\nu_{\text{ОН}}$, χ	456	4.5	0.4	456	0.1	0.3	457	6.6	0.1
ρ_{CO} , $\nu_{\text{ОН}}$	441	17	1.0	441	5.8	0.9	444	4.7	0.7
χ	390	5.8	1.4	390	1.7	1.4	352	101	5.8
β_{CO} , $\nu_{\text{ОН}}$	309	14	1.2	308	43	1.1	310	23	1.7
β_{CO}	295	19	1.4	296	11	1.3	307	35	3.1
χ	246	0.7	2.6	247	9.2	1.6	279	12	0.4
β_{CC} , $\nu_{\text{ОН}}$	201	24	1.1	199	33	1.6	201	0.7	0.8
χ	170	6.7	1.3	171	7.5	1.1	167	0.3	0.7
Колебания фрагмента $\text{CHOH-CH}_2\text{NHCH}_3$									
$\nu_{\text{ОН}}$	3714	69	97	3715	86	131	3698	30	173
$\nu_{\text{ОН}}$	3690	25	89	3691	25	89	3697	90	56
$\nu_{\text{ОН}}$	3658	105	78	3655	105	77	3690	25	88
ν_{NH}	3408	3.7	71	3407	3.4	72	3408	3.6	71
α_{HNC} , α_{HCH}	1488	25	10	1488	26	10	1488	24	10
Q _{CN} , β_{NCH}	1158	28	1.4	1159	10	2.0	1163	80	10
Q _{NC}	1107	23	7.6	1107	39	8.5	1107	32	7.9
β_{CNH}	740	128	2.7	742	133	2.7	741	131	2.8
Q _{CO}	1037	69	3.2	1035	38	4.1	1037	62	3.3
α_{OCC}	519	15	1.6	518	13	1.5	517	13	1.6
$\chi_{\text{ОН}}$	419	72	1.3	418	65	0.9	393	20	1.5
$\chi_{\text{ОН}}$	352	107	6.6	350	89	6.1	325	138	1.4
$\chi_{\text{ОН}}$	205	110	1.5	207	101	2.2	242	5.8	2.2

Предложенная в табл. 4 интерпретация спектра фундаментальных колебаний адреналина подтверждает сделанные выше выводы относительно спектральной идентификации дофимина. Действительно, весь набор фундаментальных колебаний соединения можно разделить на две группы. Первая связана с колебаниями бензольного остова $C_6H_3X_3$. Понижение симметрии адреналина до группы C_1 не сказывается на положении полос и качественной оценке их интенсивностей. Вторая группа частот интерпретирована как колебания фрагмента $CHON-CH_2NHCH_3$. Замена атома водорода на метильную группу в фрагменте NH_2 приводит к тем же закономерностям в поведении частот колебаний, что и при переходе от метиламина к диметиламину [5]. Полосы, интерпретированные как валентные (ν_{OH}) и неплоские деформационные колебания связи OH (χ_{OH}) фрагмента $CHON-CH_2NHCH_3$ трудно использовать для спектральной идентификации конформеров соединения.

Заключение

Проведенные модельные расчеты колебательных состояний ряда 1,2,4-замещенных бензола (в частности, дофимина и адреналина) дают основание утверждать, что метод функционала плотности DFT/b3LYP можно использовать для построения структурно-динамических моделей сложных молекулярных соединений данного типа. При этом весь набор фундаментальных колебаний можно условно разделить на две группы. Первая группа относится к колебаниям бензольного фрагмента $C_6H_3X_3$. Для сравнимых по массе заместителей ($X=F, CH_3, OH$) колебания можно считать характеристическими по частоте и форме. Вторая группа относится к фундаментальным колебаниям молекулярного фрагмента, полученного заменой атома водорода метильной группы в положении 4 различными молекулярными фрагментами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Park S., Lee N., Lee S. Vibrational analysis of dopamine based of density functional force field // Bull. Korean chem. Soc. 2000. V. 21, N. 10. P. 959–968.
2. Gunasekaran S., Kumar T.R., Ponnusamy S. Vibrational spectra and normal coordinate analysis of adrenaline and dopamine // Indian journal of Pure & applied Physics. 2007, V. 45. P. 881–892.
3. Lagutshenkov A., Langer J., Berden G., Oomens J., Dopfer O. Infrared spectra of protonated neurotransmitter: dopamine // Phys. Chem. Chem. Phys. 2011. V. 13. 2815–2823.
4. Пулин, В. Ф. Исследование динамики молекулярных соединений различных классов / В. Ф. Пулин, М. Д. Элькин, В. И. Березин. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. тех. ун-та. – 2002. – 548 с.
5. Краснощеков, С. В. Масштабирующие множители как эффективные параметры для коррекции неэмпирического силового поля / С. В. Краснощеков, Н. Ф. Степанов // Журн. физ. химии. – 2007. – Т. 81. – № 4. – С. 680–689.
6. Свердлов, Л. М. Колебательные спектры многоатомных молекул / Л. М. Свердлов, М. А. Ковнер, Е. П. Крайнов. – М.: Наука, 1970. – 560 с.
7. Green J. H. S., Harrison D. J., Kynaston W. Vibrational spectra of benzene derivatives-XII. 1,2,4-trisubstituted compounds // Spectrochim. Acta. 1971. V. 27A, N. 6. P. 807–815.
8. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H.B. and ath. Gaussian 03, Revision B.03, Gaussian, Inc., Pittsburgh PA(2003).
9. Hoy A. R., Mills I. M., G. Strey. Anharmonic force constants calculation // J. Mol. Phys. 21, N.6 (1972) 1265–1290.
10. Элькин, М. Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М. Д. Элькин, Л. М. Бабков // Известия Саратов. гос. ун-та. Серия Физика. – 2011. – Т. 11. – Вып. 1. – С. 20–25.
11. Системный анализ колебательных состояний полигидрокси замещенных бензола. Тригидроксизамещенные бензола / М. Д. Элькин, Т. А. Шальнова, Е. А. Джалмухамбетова, И. И. Гордеев, А. Р. Гайсина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2(14). – С. 61–67.
12. Пулин, В. Ф. Моделирование адиабатических потенциалов гидроксизамещенных бензола / В. Ф. Пулин, П. М. Элькин, М. А. Эрман // Вестник Саратов. гос. тех. ун-та. – 2011. – № 3(57). – С. 91–95.
13. Моделирование колебательных спектров галоидо-фенолов / М. Д. Элькин, Е. А. Джалмухамбетова, И. И. Гордеев, А. Р. Гайсина // Естественные науки. – 2011. – № 1(34). – С. 193–199.
14. Evans J. C. The vibrational spectra phenol and phenol-OD // Spectrochim. Acta, 1960, 26A, № 16, p. 1913–1938.

УДК 539.193/.194;535/33.34

П. М. Элькин, М. А. Эрман**, В. М. Карташов*****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ
ДИМЕРОВ УРАЦИЛА И АЗАУРАЦИЛОВ*****Саратовский государственный технический университет******Астраханский государственный университет**

pashaelkin@yandex.ru, mikhailerman@gmail.com, kartashov@asfgavt.ru

На основании квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала димеров урацила и азаурацилов в рамках метода функционала плотности предложена интерпретация колебательных состояний соединений.

Ключевые слова: урацил, азаурацилы, димеры, адиабатический потенциал, колебательные состояния.

*P. M. El'kin, M. A. Erman, B. M. Kartashov***MATHEMATICAL MODELLING OF STRUCTURE AND DYNAMICS
FOR DIMERS OF URACIL AND AZAURACILS*****Saratov State Technical University******Astrahan State University**

On the base of DFT/b3LYP quantum-mechanical calculations for parameters of adiabatic potential uracil and azaauracil dimers the interpretation of vibrational states are propoused.

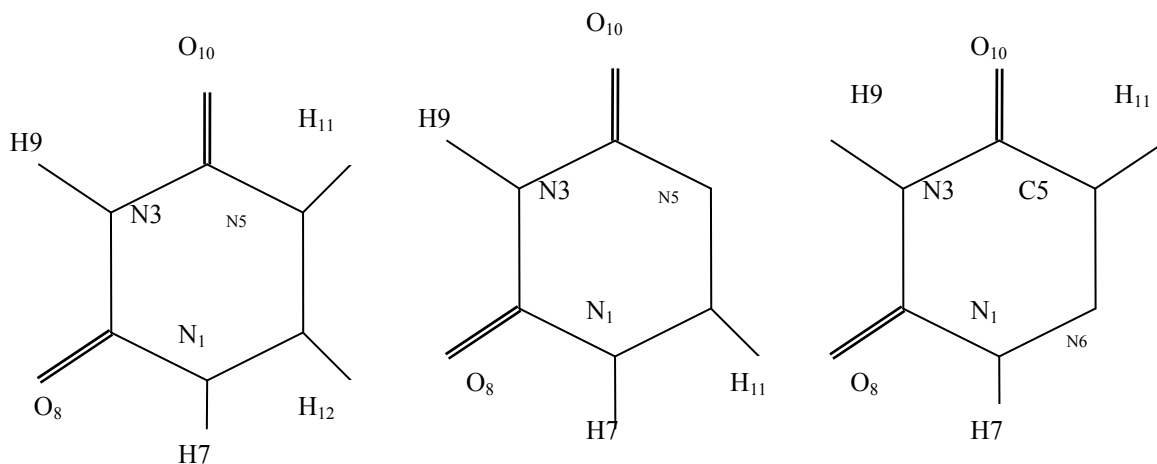
Keywords: uracil, apauracil, dimers, adiabatic potential, vibrational state.

Введение

Урацил и азаурацилы относят к биомолекулам с широким спектром фармакологического, в первую очередь, антиканцерогенного действия. С этим связан интерес к исследованию структуры и спектров указанных соединений. Сошлемся, для примера, на публикации [1–5]. Предлагаемая в периодической литературе интерпретация колебательных спектров урацила, 5- и 6-азаурацилов (см. рисунок) касалась, как правило, свободных молекул, хотя в реальных условиях соединения находятся в конденсированном состоянии.

В работе [5] была предпринята попытка учета межмолекулярного взаимодействия для

твердой фазы урацила. Предполагалось, что в конденсированном состоянии имеет место димеризация соединений. Выводы о доминирующих конформерах (возможно наличие семи конформеров для димеров урацила и 6-азаурацила, шести конформеров для димера 5-азаурацила) были сделаны на основании анализа интенсивностей полос. Однако теоретической основой указанных исследований являлась классическая теория молекулярных колебаний [6], известные недостатки которой – зависимость результатов модельных расчетов от исходного приближения в выборе силового поля, ограниченность гармоническим приближением в оценке колебательных состояний исследуемых моле-



Молекулярные диаграммы урацила, 5- и 6-азаурацилов

кулярных объектов. Оценка электрооптических параметров осуществлялась в рамках валентно-оптической схемы, применение которой к циклическим соединениям ставилось под вопрос авторами подхода.

Применение численных квантовых методов молекулярной динамики для построения структурно-динамических моделей циклических соединений реальный выход из ситуации. Для ряда соединений урацилового ряда такие исследования представлены, к примеру, в публикациях [7–9]. Полученные результаты являются

предварительными, а само исследование нуждается в продолжении.

Математическая модель колебательных состояний молекулярных систем

Для оценки положения полос в колебательных спектрах соединений использовалось известное соотношение теории молекулярных колебаний [10]:

$$E^n = \nu_s(n_s + 1/2) + \chi_{sr}(n_s + 1/2)(n_r + 1/2). \quad (1)$$

Значения ангармонических констант χ_{sr} оценивались по соотношениям из публикаций [11]:

$$\chi_{ss} = 1/16F_{ssss} - 5/48(F_{sss})^2/\nu_s + 1/32(F_{ssr})^2(\Omega(s;s;-r) - \Omega(s;s;r) - 12\Omega(r;r;r)) (1-\delta_{sr}); \quad (2)$$

$$\chi_{sr} = 1/16F_{ssrr} - 1/8(F_{ssr})^2(\Omega(s;s;-r) + \Omega(s;s;r)(1-\delta_{sr}) + 3/8(F_{srt})^2(\Omega(s;r;t) - \Omega(s;r;-t) + \Omega(s;-r;t) - \Omega(s;-r;-t))(1-\delta_{sr})(1-\delta_{rt}) + L(a;sr)^2/(\Omega(s;r;0) + \Omega(s;-r;0))/2. \quad (3)$$

В соотношениях (1)–(3) ν_s – частоты гармонических колебаний (в см^{-1}); $L(a;sr)$ – постоянные Кориолиса; F_{srt} и F_{srtu} – кубические и квартичные силовые постоянные (параметры адиабатического потенциала молекулы); Q^s – безразмерные нормальные колебательные координаты; n_s – квантовые числа рассматриваемого колебательного состояния; $\Omega(s; \pm r; \pm t) = (\nu_s \pm \nu_r \pm \nu_t)^{-1}$ – резонансные функции.

Оценка геометрии и параметров адиабатического потенциала мономеров и димеров 5- и 6-азаурацилов осуществлялась с помощью

пакета «Gaussian-03» для трех атомных базисов 6-311G*, 6-311G**, 6-311+G** [12]. Табл. 1 позволяет судить о влиянии замены атома углерода шестичленного цикла урацила атомом азота на изменение геометрических параметров кольца. Расчетные значения длин валентных связей, участвующих в образовании димеров, попадают в диапазоны: $R_{CH} = 1.08\text{--}1.09$. $R_{NH} = 1.01$, $R_{C=O} = 1.20\text{--}1.21$ Å. Выбор базиса сказывается на третьем знаке мантиссы для длин связей и на втором знаке мантиссы для валентных углов.

Таблица 1

Вычисленные значения геометрических параметров урацила, 5-и 6-азаурацилов

Связи	UR	5-AU	6-AU	Углы	UR	5-AU	6-AU	Углы	UR	5-AU	6-AU
$R_{(1,2)}$	1.39	1.40	1.39	$A_{(2,1,6)}$	123	122	127	$A_{(3,4,5)}$	113	115	112
$R_{(1,6)}$	1.37	1.37	1.35	$A_{(2,1,7)}$	115	116	116	$A_{(3,4,10)}$	120	120	122
$R_{(2,3)}$	1.38	1.38	1.39	$A_{(1,2,3)}$	113	111	112	$A_{(4,5,6)}$	120	118	124
$R_{(3,4)}$	1.41	1.42	1.40	$A_{(1,2,8)}$	123	123	123	$A_{(4,5,11)}$	118	-	118
$R_{(4,5)}$	1.46	1.40	1.48	$A_{(2,3,4)}$	128	127	126	$A_{(1,6,5)}$	122	125	117
$R_{(5,6)}$	1.35	1.28	1.29	$A_{(2,3,9)}$	115	116	116	$A_{(1,6,H)}$	115	114	-

Образование димеров не приводит к существенному изменению геометрических параметров шестичленных циклов по сравнению с мономерами. Для длин валентных связей оно не выходит за пределы 0.01 Å, для валентных углов 0.8° . Для связей R_{NH} и $R_{C=O}$, участвующих в межмолекулярном взаимодействии, длина увеличивается на величину ~ 0.02 Å. Длина связи O---H между мономерами попадает в интервал $1.85\text{--}1.88$ Å для димеров 6-азаурацила; для 5-азаурацилов имеет место существенный разброс $1.78\text{--}1.91$ Å.

Нижняя граница соответствует димерам, в образовании которых участвует валентная связь $R(1,7)$. Выбор базиса квантового расчета принципиального значения не имеет.

Интерпретация колебаний мономеров и димеров урацила, 5- и 6-азаурацилов представлена в табл. 2–5. Отметим, что для димеров симметрии C_{2h} (конформеры 7-8'_8-7', 9-8'_8-9', 10-9'_9-10') имеет место правило альтернативного запрета для интенсивностей полос в ИК и КР колебательных спектрах [6].

Таблица 2

Интерпретация колебаний в димерах урацила и азаурацилов симметрии C_{2h}

Форма колебаний	ν _{эксп} [1,3]	Мономер			7-8' 8-7'			9-8' 8-9'			9-10' 10-9'		
		ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР
Урацил													
q _{NH}	3484	3463	99	95	3424	118	149	3462	194	170	3463	200	248
q _{NH}	3435	3424	60	77	3107	3142	827	3176	1737	533	3114	2243	609
Q _{C=O}	1764	1765	599	11	1735	511	103	1732	780	69	1769	1119	22
Q _{C=O}	1741	1729	625	37	1707	2817	20	1719	1980	40	1686	1764	129
β _{NH} ,Q	1472	1455	86	10	1511	90	90	1453	163	22	1467	155	29
β _{NH} ,β	1399	1377	5.4	0.5	1398	251	5.2	1426	12	31	1431	38	47
β _{NH} ,β	1389	1363	84	2.2	1374	38	10	1379	358	0.5	1374	113	4.9
β _{C=O}	559	548	3.8	2.6	560	9.6	7.7	553	39	3.0	553	3.7	5.3
β _{C=O}	391	380	20	1.9	391	60	3.7	390	82	3.0	393	97	3.0
ρ _{C=O}	804	800	71	0.8	805	134	0.9	798	63	2.2	793	62	2.2
ρ _{C=O}	722	754	40	0.0	757	33	0.4	746	20	0.5	748	30	0.4
ρ _{NH}	662	672	72	2.3	672	88	4.6	884	198		911	182	0.2
ρ _{NH}	551	555	44	1.0	861	188	-	565	121	1.7	570	118	1.7
5-азаурацил													
q _{NH}	3464	3447	94	101	3424	125	166	3446	187	188	3445	184	257
q _{NH} *	3437	3426	61	86	3090	2874	719	3189	1587	472	3118	2152	551
Q _{C=O}	1796	1785	438	15	1770	613	83	1766	459	58	1790	962	26
Q _{C=O}	1780	1763	721	21	1724	2440	22	1736	2160	24	1709	1725	77
β _{NH}	1454	1438	119	5.9	1498	232	61	1437	198	19	1452	152	33
β,β _{NH}	1393	1375	19	4.0	1375	252	16	1420	29	27	1429	142	15
β,β _{NH}	1375	1357	6.9	9.8	1356	35	18	1369	41	13	1370	78	22
β _{C=O}	587	588	0.7	4.5	594	0.6	19	593	7.1	8.8	592	28	6.2
β _{C=O}	402	391	17	2.2	404	52	4.5	401	65	3.6	402	85	3.9
ρ _{C=O}	786	781	41	0.6	783	129	0.0	780	26	1.5	783	25	1.0
ρ _{C=O}	757	752	28	0.3	750	0.0	0.8	749	15	0.8	750	27	0.8
ρ _{NH}	662	676	94	2.0	676	99	0.0	874	193	0.1	904	176	0.2
ρ _{NH}	587	592	44	1.1	861	169	0.0	600	152	1.3	611	135	1.4
6-азаурацил													
q _{NH}	3476	3455	100	102	3412	136	154	3452	223	179	3452	209	265
q _{NH}	3423	3413	64	80	3210	2466	776	3158	1880	518	3153	2014	552
Q _{C=O}	1783	1773	523	12	1743	321	166	1724	451	103	1777	983	26
Q _{C=O}	1767	1738	537	31	1723	2925	22	1704	2349	45	1693	1441	91
β _{NH}	1431	1422	30	12	1480	123	148	1424	35	47	1442	31	43
β _{NH}	1405	1379	42	3.5	1381	185	7.3	1412	11	18	1407	48	49
Q,β _{NH}	1362	1347	98	5.4	1356	80	32	1372	378	11	1371	223	4.8
γ,β _{C=O}	550	546	13	4.0	554	56	8.4	551	105	6.3	554	37	9.5
β _{C=O}	385	376	23	1.7	385	64	3.7	386	95	2.3	387	104	3.0
ρ _{C=O}	750	753	30	0.4	754	115	0.4	728	6.8	1.7	745	7.9	1.0
ρ _{C=O}	739	732	21	0.9	730	0.2	1.2	723	11	0.2	733	17	0.2
ρ _{NH}	668	684	126	1.2	676	104	1.5	863	222	-	907	176	0.0
ρ _{NH}	576	605	42	1.4	851	205	0.0	600	193	0.1	627	189	1.3

Таблица 3

Интерпретация колебаний в димерах урацила и азаурацилов симметрии C_s

Форма колебаний	8-7' _9-8'			10-7' _9-8'			10-9' _9-8'			10-11' _9-10'		
	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
Урацил												
ν_{NH}	3448	97	90	3442	164	196	3641	197	208	3462	204	248
ν_{NH}	3148	2396	680	3115	2583	111	3159	1999	574	3422	62	67
$\nu_{\text{C=O}}$	1737	890	86	1753	856	57	1750	787	49	1766	1237	21
$\nu_{\text{C=O}}$	1715	2104	30	1697	2242	84	1706	2024	85	1697	1636	135
β_{NH}	1489	130	52	1491	140	68	1461	159	26	1461	155	28
β_{NH}	1415	138	22	1418	145	26	1431	31	39	1435	26	14
β, β_{NH}	1376	230	3.9	1362	46	20	1375	222	2.8	1377	145	5.8
$\beta_{\text{C=O}}$	560	44	4.0	559	7.3	5.2	555	30	3.9	552	7.6	8.1
$\beta_{\text{C=O}}$	396	71	3.3	398	77	2.3	397	90	3.0	391	65	4.1
ρ_{NH}	890	145	0.1	894	164	0.1	901	182	0.1	882	121	0.1
ρ_{NH}	818	31	0.8	839	28	0.8	872	6.8	0.1	-	-	-
$\rho_{\text{C=O}}$	801	121	1.5	797	97	1.9	795	66	2.2	792	30	1.3
$\rho_{\text{C=O}}$	752	26	0.5	752	34	0.4	747	25	0.4	752	62	0.3
ρ_{NH}	669	42	2.3	669	43	2.4	-	-	-	674	72	2.0
ρ_{NH}	557	63	0.9	581	59	9.8	565	121	1.8	568	108	1.7
5-азаурацил												
ν_{NH}	3446	125	179	3434	161	212	3447	187	224			
ν_{NH}	3208	1858	596	3120	2555	633	3177	1814	503			
$\nu_{\text{C=O}}$	1771	648	67	1778	819	53	1778	695	42			
$\nu_{\text{C=O}}$	1729	2153	25	1719	2024	49	1729	1965	51			
β_{NH}	1501	113	26	1493	171	36	-	-	-			
β_{NH}	1441	91	27	1446	153	21	1438	259	49			
β, β_{NH}	1377	159	24	1374	243	21	1365	322	27			
$\beta_{\text{C=O}}$	592	3.4	13	596	22	12	594	18	7.3			
$\beta_{\text{C=O}}$	407	56	4	410	66	4.1	408	70	3.7			
ρ_{NH}	885	170	0.1	887	163	0.1	888	182	0.0			
ρ_{NH}	823	30	0.4	844	7.5	0.5	859	3.5	0.1			
$\rho_{\text{C=O}}$	781	99	1.2	784	76	0.9	781	27	1.3			
$\rho_{\text{C=O}}$	750	6.1	0.7	750	16	0.8	750	20	0.8			
ρ_{NH}	684	49	2.2	672	51	2.2	-	-	-			
ρ_{NH}	599	86	0.7	620	75	0.7	602	151	1.5			
6-азаурацил												
ν_{NH}	3457	166	171	3432	169	210	3456	207	224	3454	211	256
ν_{NH}	3176	2159	656	3163	2230	671	3146	1961	546	3409	1061	407
$\nu_{\text{C=O}}$	1748	554	74	1760	675	59	1760	604	46	1776	1099	24
$\nu_{\text{C=O}}$	1724	2120	34	1709	1962	62	1712	1856	63	1708	1386	101
β_{NH}	1478	61	60	1460	75	93	1436	43	44	1430	43	30
β_{NH}, Q	1421	33	35	1409	113	26	1410	33	32	1406	21	20
Q, β_{NH}	1380	324	5.1	1362	164	13	1375	290	5.3	1370	262	13
$\beta_{\text{C=O}}, \gamma$	539	64	1.4	541	111	1.4	541	32	1.3	534	90	0.5

Окончание табл. 3

Форма колебаний	8-7' _9-8'			10-7' _9-8'			10-9' _9-8'			10-11' _9-10'		
	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
$\beta_{\text{C=O}}$	391	77	2.9	392	82	2.9	401	99	3.0	386	73	3.6
ρ_{NH}	880	185	6.1	890	142	0.1	891	202	1.3	866	104	0.4
ρ_{NH}	826	41	0.5	838	31	0.7	-	-	-	-	-	-
$\rho_{\text{C=O}}$	751	58	1.1	743	70	2.4	732	21	1.3	746	65	2.0
ρ_{NH}	674	47	1.9	674	47	2.0	-	-	-	688	115	1.1
ρ_{NH}	612	94	0.8	628	93	0.7	626	190	1.4	619	136	1.9

Таблица 4

Интерпретация колебаний урацилового остова в димерах урацила и азаурацилов симметрии C_{2h}

Форма колебаний	ν _{эксп} [1,3]	Мономер			7-8' _8-7'			9-8' _8-9'			10-9' _9-10'		
		ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР	ν _{анг}	ИК	КР
Урацил													
q		3095	0.6	104	3094	1.6	280	3095	0.9	276	3096	4.7	203
q		3055	3.9	98	3059	15	158	3056	11	228	3054	11	250
Q,β,γ	1643	1622	71	18	1623	183	30	1625	104	35	1618	69	34
Q,β	1360	1340	72	10	1354	29	28	1358	67	17	1346	185	28
β,β _{CN}	1217	1190	17	12	1215	158	8.4	1190	8.3	23	1195	9.4	39
Q,β _{CN}	1184	1153	87	4.7	1168	82	42	1169	195	3.3	1169	163	2.1
β,Q	1073	1055	6.2	5.5	1065	18	19	1057	11	11	1064	9.4	11
γ	982	965	6.3	0.1	973	33	12	970	34	2.4	969	34	0.7
β _{CN} ,Q	958	937	8.5	2.9	950	13	2.9	950	13	4.0	950	53	15
γ	759	749	2.7	19	760	21	40	759	7.9	54	761	9.8	53
γ,β _{C=O}	536	530	7.8	4.8	539	75	20	532	68	7.5	537	49	8.5
γ	516	509	19	2.1	512	101	6.6	518	23	6.1	517	70	4.7
ρ	718	715	13	1.8	710	0.4	3.9	714	42	3.6	716	44	2.4
χ	395	389	25	1.7	406	21	2.1	394	32	3.5	393	38	4.4
5-азаурацил													
q	-	3008	12	130	3019	5.9	116	3008	30	317	3009	17	171
Q,β,γ	1643	1630	344	11	1631	838	21	1634	575	19	1624	864	34
Q,β _{C=O}	1313	1332	218	3.6	1369	192	5.6	1360	543	14	1334	361	18
Q,β _{NH}	1177	1139	88	3.0	1183	169	19	1150	209	3.7	1157	102	6.1
Q,β _{C=O}	1101	1068	7.4	2.2	1069	39	2.5	1069	3.6	4.3	1099	13	5.6
γ,Q	1009	977	15	0.5	989	86	14	986	34	2.0	974	74	6.7
γ	937	917	7.0	2.5	929	28	2.7	925	78	4.7	934	17	6.7
Q,γ	757	776	5.9	18	789	23	36	784	18	50	791	21	52
γ	557	552	4.5	4.3	566	11	12	554	49	7.3	554	27	8.0
γ	513	504	10	1.6	506	115	3.5	514	24	3.9	516	34	4.1
χ	402	406	31	1.1	425	24	1.2	412	43	2.7	410	46	3.4
6-азаурацил													
q	-	3063	0.0	103	3062	1.2	238	3064	0.1	261	3068	0.7	173
Q,β _{NH}	1616	1591	28	19	1592	63	26	1595	52	44	1586	38	37
β	1329	1325	34	2.6	1315	93	6.0	1311	68	7.6	1311	112	2.7

Окончание табл. 4

Форма колебаний	$\nu_{\text{эксп}}$ [1,3]	Мономер			7-8' _8-7'			9-8' _8-9'			10-9' _9-10'		
		$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
Q, β_{NH}	1231	1188	51	24	1196	79	101	1208	103	39	1202	72	58
Q, β	1099	1092	22	1.9	1091	12	1.8	1092	43	1.4	1100	54	5.2
γ, Q	1002	979	11	0.9	994	87	19	994	55	8.7	980	3.8	1.0
Q, β_{NH}	973	946	25	6.0	954	45	9.1	957	1.4	9.9	967	59	30
γ	750	722	10	16	731	41	34	732	25	50	735	24	39
$\beta_{\text{C=O}, \gamma}$	533	526	25	0.3	532	128	2.1	537	49	0.5	535	26	0.5
$\beta_{\text{C=O}, \gamma}$	518	513	7.3	5.0	522	22	24	518	24	11.6	518	109	8.2
ρ	-	874	21	1.3	876	21	2.1	876	15	1.4	869	42	2.9

Таблица 5

Интерпретация колебаний урацилового остова в димерах урацила и азаурацилов симметрии C_s

Форма колебаний	8-7' _9-8'			10-7' _9-8'			10-9' _9-8'			10-11' _9-10'		
	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
Урацил												
q	3096	1.4	269	3095	3.2	272	3093	2.3	244	3093	1.1	114
q	3062	14	192	3056	13	206	3055	11	238	3054	54	238
Q, β_{NH}	1629	128	32	1618	102	30	1622	93	33	1619	112	31
$Q, \beta_{\text{C=O}}$	1364	71	23	1348	121	28	1352	135	22	1345	176	19
Q, β	1211	73	16	1204	72	26	1192	9.3	31	1201	8.1	56
Q, β	1172	145	22	1169	125	24	1170	180	3.1	1164	200	5.6
$Q, \beta_{\text{C=O}}$	1064	13	15	1066	14	18	1060	10	11	1065	37	21
γ, Q	973	30	4.8	971	34	4.9	970	35	1.7	967	35	1.1
γ	952	17	4.2	952	37	9.4	954	32	8.6	948	30	8.3
Q, γ	757	12	48	758	12	47	756	8.8	54	754	9.6	49
γ	535	46	12	541	59	12	536	59	6.9	540	38	9.1
γ	517	60	7.3	518	89	8.4	518	39	6.5	516	70	4.9
ρ	711	23	3.9	713	27	3.0	714	43	3.3	723	27	2.5
χ	398	30	2.9	400	31	3.2	394	36	4.1	392	41	4.5
5-азаурацил												
q	3021	32	269	3015	21	272	3009	31	320			
Q, β_{NH}	1637	682	20	1624	833	27	1631	699	26			
$Q, \beta_{\text{C=O}}$	1362	429	16	1344	239	28	1335	208	8.8			
Q, β	1168	185	11	1171	115	16	1153	161	5.1			
$Q, \beta_{\text{C=O}}$	1070	25	3.6	1101	29	4.3	1080	8.3	4.6			
γ, Q	988	56	5.9	982	80	10	983	56	3.8			
γ	930	56	4.1	931	29	4.3	930	47	5.7			
Q, γ	785	19	44	787	17	44	785	21	51			
γ	563	46	8.4	561	23	9.5	557	37	8.1			
γ	514	48	4.4	516	65	4.8	516	30	3.9			
ρ	955	5.1	4.9	966	3.3	3.1	958	4.7	3.6			
χ	418	37	1.9	418	36	2.1	411	45	1.0			

Окончание табл. 5

Форма колебаний	8-7' _ 9-8'			10-7' _ 9-8'			10-9' _ 9-8'			10-11' _ 9-10'		
	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
6-азаурацил												
q	3063	0.2	263	3067	0.4	224	3065	0.6	234	3056	71	270
Q, β_{NH}	1598	45	29	1592	44	31	1592	44	39	1589	53	42
β	1315	66	6.2	1315	95	3.9	1311	89	4.5	1319	57	22
Q, β_{NH}	1202	77	61	1203	66	74	1208	80	49	1201	114	71
Q, β	1095	27	2.3	1101	36	4.4	1100	51	3.8	1098	97	4.0
γ, Q	995	63	8.2	992	42	6.5	988	24	3.6	983	12	3.2
Q, β_{NH}	961	20	9.7	970	52	19	965	30	19	958	64	18
γ	731	31	43	733	31	37	729	25	44	728	26	39
$\beta_{\text{C=O}, \gamma}$	539	64	1.4	541	111	1.4	541	32	1.3	534	90	0.5
$\beta_{\text{C=O}, \gamma}$	520	22	15	521	26	14	521	55	9.4	521	24	9.6
ρ	852	11	1.1	875	45	2.7	873	22	1.5	925	29	1.9

Весь набор колебаний исследуемых димеров разделен на две группы. Первая группа интерпретирована как колебания молекулярных фрагментов, участвующих в образовании димера (валентные (q) колебания связей NH, CH, C=O; плоские (β) и неплоские (ρ) деформационные колебания этих связей). Вторая группа колебаний интерпретирована как фундаментальные колебания урацилового остова. Отметим, что такое деление носит условный характер для плоских деформационных колебаний в диапазоне 400–600 см^{-1} . Имеет место перепутывание форм нормальных колебаний, интерпретированных как колебания углов NC=O, CC=O ($\beta_{\text{C=O}}$) и колебаний валентных углов шестичленного цикла (γ).

Использование ангармонического приближения позволяет получить хорошее согласие опытных и вычисленных значений частот фундаментальных колебаний в высокочастотном диапазоне колебательного спектра. Интерес представляют валентные колебания связей NH.

Из модельных квантовых расчетов для мономеров соединений получены следующие значения кубических и квартичных силовых постоянных связи NH: $F_{qqq} \sim 2310 \text{ см}^{-1}$; $F_{qqqq} \sim 1360 \text{ см}^{-1}$. Ангармоническое смещение полос в длинноволновый диапазон спектра определяют первые два слагаемых выражения (2) – это величина $\sim 170 \text{ см}^{-1}$.

Оценка кубических и квартичных силовых постоянных для валентных колебаний связей NH, участвующих в образовании димера приводит к величинам: $F_{QQQ}, F_{QQq} \sim 1780 \text{ см}^{-1}$;

$F_{QQQ}, F_{QQq}, F_{qqqq} \sim 750 \text{ см}^{-1}$ (символ Q относится к колебаниям типа симметрии Ag, символ q – к антисимметричным колебаниям типа Bu). Отметим, что для невзаимодействующих связей NH указанные силовые постоянные оцениваются соответственно величиной ~ 1620 и 690 см^{-1} . Согласно формулам (2) и (3), величина ангармонического смещения в длинноволновый диапазон спектра укладывается в интервал $\sim 200 - 150 \text{ см}^{-1}$. К таким же результатам приводит и процедура масштабирования с параметрами, используемыми в работах [7–9]. Это факт дает основание использовать указанную процедуру для предварительной оценки ангармонического смещения полос в колебательных спектрах мономеров и димеров исследуемого класса соединений.

Образование димера приводит к появлению дублетов, энергетическая щель между которыми может достигать величины $\sim 100 \text{ см}^{-1}$ для валентных колебаний связей NH (q_{NH}). Для деформационных неплоских колебаний этой связи (ρ_{NH}) такая щель не превышает величины $\sim 40 \text{ см}^{-1}$. Соответствующая полоса для конформеров симметрии C_{2h} имеет заметную интенсивность в спектре ИК (тип симметрии Bu). В спектрах КР интенсивность соответствующих полос мала и непригодна для решения задачи спектральной идентификации конформеров в димерах урацила и азаурацилов. По этой причине в таблицах они не приводятся.

Расщеплению и сдвигу подвержены полосы, интерпретированные как валентные колебания связей C=O ($Q_{\text{C=O}}$) и плоские деформационные

колебания валентных углов CNH (β_{NH}). Указанные колебания попадают в диапазон 1780–1730 см^{-1} и 1500–1350 см^{-1} соответственно. Интенсивность полос указанных колебаний может быть использована для спектральной идентификации соединений в случае, если щель между полосами превышает величину $\sim 50 \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, наиболее надежным признаком спектральной идентификации конформеров следует признать положение и интенсивность полос неплюских деформационных колебаний связей NH (ρ_{NH}).

Отметим, что оценка положения полос, приведенная в табл. 2–5, связана с центром интервала их расщепления. Отклонение не превышает величины $\sim 10 \text{ см}^{-1}$ для полос, интерпретированных как колебания урацилового остова, а также для всех полос в диапазоне ниже 1300 см^{-1} . Отсюда и отраженная в табл. 2–5 характеристичность указанных фундаментальных колебаний по частоте. Указанные колебания являются также характеристичными и по форме. Признаками спектральной идентификации в этом случае могут служить их интенсивности полос в спектрах ИК и КР.

О механизме межмолекулярного взаимодействия можно судить по смещениям полос, интерпретированных как валентные (q_{NH}) и неплюские деформационные (ρ_{NH}) колебания связей NH. Валентные колебания смещаются в длинноволновый диапазон на величину порядка $\sim 300 \text{ см}^{-1}$, деформационные – в коротковолновый диапазон на величину $\sim 200 \text{ см}^{-1}$. Учитывая расчетные значения для длины связей между атомами водорода и кислорода, участвующих в образовании димера, можно сделать вывод о наличии водородной связи между мономерами в димерах урацила и азаурацилов.

Заключение

Проведенные модельные расчеты дают основание к использованию метода функционала плотности DFT/b3LYP для построения структурно-динамических моделей соединений урацилового ряда и решения задачи спектральной идентификации димеров соединений. Показано, что образование димеров приводит к существенному смещению полос, интерпретированных

как валентные и деформационные колебания связи NH, участвующей в образовании водородной связи. Для спектральной идентификации конформеров можно использовать интенсивности полос в колебательных спектрах, а также положение полос в диапазоне 900–600 см^{-1} , интерпретированных как неплюские деформационные колебания связей NH.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fulara J., Nowak M. J., Lapinski L. Theoretical and matrix-isolation experimental study of the infrared spectra of 5-azauracil and 6-azauracil // *Spectrochimica Acta*. 1991. V. 47A, N. 5. P. 595–613.
2. Potter B. S., Palmer R. A., Withnall R., Chowdhry B. Z. Aza analog of nucleic acid bases: Infrared spectra of 5-azauracil and crystal structure of 5-azauracil monohydrate // *New Journal of chemistry*. 1999. V. 23, N. 1. P. 117–122.
3. Тен, Г. Н. Анализ ИК спектров и водородных связей урацила / Г. Н. Тен, Т. Г. Бурова, В. И. Баранов // *Журнал. Структур. Химии*. – 2001. – Т. 42. – № 4. – С. 666–676.
4. Kumar H., Sharm M., Sharm R., Rai B.K., Joe H., Srivastava M., Rastogi V.K. FTIR and FT-Raman spectra of complex Cu(II) with 6-azauracil // *AIP Conference Proceeding* 1267, p. 672–673. 2010
5. Mitran R. A., Bascornea A. C. Some unusual spectral properties of 6-azauracil derivatives // *U.P.B. Sci. Bull., ser. B*. 2011. V. 73, N. 1. P. 67–74.
6. Свердлов, Л. М. Колебательные спектры многоатомных молекул / Л. М. Свердлов, М. А. Ковнер, Е. П. Крайнов. – М.: Наука, 1970. – 550 с.
7. Элькин, П. М. Структурно-динамические модели и ангармонический анализ колебательных состояний замещенных урацила / П. М. Элькин, О. В. Пулин, Е. А. Джалмухамбетова // *Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та*. – 2005. – № 4(9). – С. 36–45.
8. Элькин, П. М. Анализ колебательных спектров метилзамещенных урацила в ангармоническом приближении / П. М. Элькин, М. А. Эрман, В. Ф. Пулин // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2006. – Т. 73, № 4. – С. 431–436.
9. Элькин, М. Д. Проявление межмолекулярного взаимодействия в димерах урацила / М. Д. Элькин, Е. А. Джалмухамбетова, О. Н. Гречухина // *Изв. Саратов. гос. ун-та. Сер. Физика*. – 2008. – Т. 8, вып. 2. – С. 24–30.
10. Hoy A. R., Mills I. M., G. Strey. Anharmonic force constants calculation // *J. Mol. Phys*. 1972. Vol.21, N. 6. P. 1265–1290.
11. Элькин, М. Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М. Д. Элькин, Л. М. Бабков // *Известия Саратов. гос. ун-та. Серия Физика*. – 2011. – Т. 11. – Вып. 1. – С. 20–25.
12. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B. Gaussian, Inc., Pittsburgh PA 2003.

УДК 539.193/.194;535/33.34

Е. А. Эрман, П. М. Элькин**, Г. П. Стефанова*, Н. А. Равчеева***

**ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ЗАДАЧ
МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Астраханский государственный университет*

***Саратовский государственный технический университет*

eerman@mail.ru, pashaelkin@yandex.ru, steff@rambler.ru, smolensk_natali@mail.ru

Описаны возможности программного приложения «Vibration-2011» в информационном обеспечении задач молекулярного моделирования.

Ключевые слова: адиабатический потенциал, интерпретация колебательных состояний, спектральная идентификация.

E. A. Erman, P. M. Elkin**, G. P. Stefanova*, N. A. Ravcheeva***

**PROGRAM-ALGORITHMIC SUPPORT FOR TESTS
OF MOLECULAR MODELLING**

**Astrakhan State University*

***Saratov State Technical University*

Possibility of programic application Vibration-2011» in informatic ensuring for tests of molecular modeling are described.

Keywords: adiabatic potential, interpretation of vibrational states, spectral identification.

Введение

Современные физико-химические методы изучения молекулярных объектов позволяют получить достаточно четкие представления об их структуре и физических свойствах, особенности которых невозможно детализировать на основании только результатов экспериментального исследования. Здесь и появляется необходимость дополнительного привлечения модельных представлений и вычислительных схем для интерпретации экспериментальных данных.

Принято считать, что физико-химические свойства молекулярной системы, как квантового объекта, определяет адиабатический потенциал, отражающий строение электронной оболочки (электронной подсистемы) молекулы в рассматриваемом электронном состоянии и проявляющийся в ее колебательных спектрах.

При анализе формы адиабатического потенциала исходят из модельного уравнения Шредингера для ансамбля электронов при выбранной конфигурации ядер (геометрии ядерной подсистемы молекулы). Координаты ядер в такой модели рассматриваются в качестве параметров [1]:

$$\begin{aligned} (\hat{H}_e - \varepsilon) \Psi(x, q) &= 0; \\ \hat{H}_e &= \hat{T}_e + U(x, q); \end{aligned} \quad (1)$$

$\hat{T}_e = -\hbar^2 / 2m_e \Delta_i^2$ – оператор кинетической энергии электронов;

$U(x, q) = -e^2 (Z_r / R_{ri} + 1 / R_{ij} + Z_r Z_t / R_{rt})$ – потенциальная часть уравнения (кулоновское взаимодействие всех ядер и электронов в молекулярной системе).

Аналитическое решение для адиабатического потенциала, как скалярной функции ядерных координат, не представляется возможным, поэтому применяемые численные методы связаны с оценкой коэффициентов разложения адиабатического потенциала в ряд по криволинейным ядерным координатам q_a относительно равновесной ядерной конфигурации, соответствующей минимуму адиабатического потенциала. Такие коэффициенты принято называть квадратичными, кубическими и кватеричными силовыми постоянными:

$$\begin{aligned} \varepsilon_n &= \varepsilon_{n0} + K_{ab} q^a q^b + K_{abc} q^a q^b q^c + \\ &+ K_{abcd} q^a q^b q^c q^d + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Современные информационные технологии, используемые в молекулярной динамике, позволяют оценить коэффициенты ряда (2) и перейти к решению модельного квантового уравнения для ядерной подсистемы [2].

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2} \frac{\partial}{\partial q^a} T^{ab} \frac{\partial}{\partial q^b} + K_{ab} q^a q^b + K_{abc} q^a q^b q^c + K_{abcd} q^a q^b q^c q^d + \dots - E \right) X_n(q) = 0, \quad (3)$$

где $T^{ab} = \sum m_N^{-1} B_{N\alpha}^a B_{N\alpha}^b$ – матрица кинематических коэффициентов; $B_{N\alpha}^a = \partial q^a / \partial x_{N\alpha}$ – метрика ядерных координат; $X_{N\alpha}$ – декартовы координаты ($\alpha = x, y, z$) атома N .

К числу таких технологий относится известный программный комплекс «Gaussian» [3], где решение задачи осуществляется в системе нормальных координат, линейно связанных с декартовыми координатами ядер. Такие координаты лишены физического смысла, поэтому для интерпретации колебательного спектра исследуемого соединения и последующего решения фундаментальной задачи «свойства – структура – спектр» необходимо перейти к описанию молекулярной динамики в системе естественных колебательных координат. Таковыми являются изменения длин валентных связей и валентных углов в молекуле, двугранные углы между плоскостями молекулярных фрагментов [4].

Решение уравнения (3) методами теории возмущения приводит к известному выражению для энергий ангармонических колебательных состояний:

$$E_{91,92...93N-6} = \sum_{s=1}^{3N-6} \omega_s (\vartheta_s + 1/2) + \sum_{i,j=1}^{3N-6} X_{ij} (\vartheta_i + 1/2)(\vartheta_j + 1/2), \quad (4)$$

где v_i – колебательные квантовые числа; X_{ij} – ангармонические постоянные, являющиеся функциями кубических и квартичных силовых постоянных, постоянных кинематической ангармоничности резонансных функций [2].

Первое слагаемое в выражении (4) описывает гармонические колебания ядерной подсистемы молекулярного объекта, второе – учитывает ангармонизм.

Изложенную схему к решению квантового уравнения Шредингера для молекулярной системы принято называть адиабатическим приближением в молекулярной динамике. На этом пути появляется реальная возможность оценить равновесную конфигурацию молекулярного соединения, коэффициенты разложения адиабатического потенциала, колебательные состояния ядерной подсистемы, интенсивности квантовых переходов, выяснить механизм межмолекулярного взаимодействия. Другими словами – построить структурно-динамическую модель молекулярного соединения.

Вместе с тем колебательное движение ядерной подсистемы молекулы допускает классическую интерпретацию: ядра, связанные упруги-

ми силами, совершают малые колебания относительно положения их равновесия и одновременно участвуют во вращательном и поступательном движении как система материальных точек. За подробностями отсылаем к монографии [4].

Цель данной публикации – изложение методики программно-алгоритмической поддержки одной из основных задач молекулярного моделирования – теоретической интерпретации эксперимента по колебательным спектрам молекулярных систем и выявление признаков их спектральной идентификации.

Алгоритмы технологии «Vibration-2011»

Весь набор предлагаемых алгоритмов условно можно разделить на три части. Первая часть связана с созданием интерфейса программного приложения и включает обработку выходных данных программного комплекса «Gaussian-03» под формат входных данных технологии «Vibration-2010» для табличного редактора «Excel». Создание интерфейса осуществляется в диалоговом режиме.

Вторая, основная часть набора, содержит алгоритмы решения прямой и обратной механической задачи теории молекулярных колебаний, оценки ангармонического сдвига полюс. В качестве исходных данных используются геометрические параметры молекулы, полученные из рентгенографического, микроволнового электронографического эксперимента или из результатов оптимизации исходной геометрии с помощью пакета «Gaussian»; декартовы смещения атомов при нормальных колебаниях, как результат моделирования гармонического силового поля исследуемого соединения; топологический массив (Z-матрица), определяющий систему естественных колебательных координат; массив коэффициентов симметрии [4]; массив масштабирующих коэффициентов для гармонического силового поля; массив весовых коэффициентов для отражения надежности предложенного экспериментального отнесения спектра; экспериментальный набор фундаментальных колебаний базового соединения и его изотопозамещенных аналогов.

Отметим, что результаты моделирования геометрической структуры с помощью неэмпирических квантовых методов совпадают с экспериментальными данными с точностью, необходимой для решения задачи интерпретации колебательных спектров многоатомных молекул. Достаточно сослаться на монографию [2],

где такие исследования проведены для соединений различных классов. При этом выбор атомного базиса в численных методах оптимизации геометрии существенного значения не имеет. Однако при оценке гармонических силовых констант такая зависимость имеет место [2] и может достигать величины $\sim 100 \text{ см}^{-1}$.

Алгоритм получения системы гармонических ангармонических силовых постоянных в системе естественных колебательных координат основан на метрических соотношениях, связывающих естественные колебательные координаты с декартовыми смещениями атомов. В его основу положено основное операторное соотношение тензорного анализа, адаптированное к решению задач молекулярного моделирования [2]:

$$\hat{T}_{a'b'...c'} = B_{a'}^a B_{b'}^b \dots B_{c'}^c \hat{T}_{ab...c}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \hat{T}_a &= \frac{\partial}{\partial q^a}, \quad \hat{T}_{ab} = \frac{\partial \hat{T}_a}{\partial q^b} - \Gamma_{ab}^f \hat{T}_f; \\ \hat{T}_{abc} &= \frac{\partial \hat{T}_{ab}}{\partial q^c} - \Gamma_{ac}^f \hat{T}_{bf} - \Gamma_{bc}^f \hat{T}_{af}. \end{aligned} \quad (7)$$

Данное соотношение позволяет связать операторы дифференцирования в произвольных системах криволинейных координат $\{q^a\}$ и $\{q^{a'}\}$ с основными понятиями тензорного анализа [5], каковыми являются дифференциальный закон преобразования координат $B_{a'}^a$ (метрика), ковариантные g_{ab} и контравариантные g^{ab} метрические тензоры, символы Кристоффеля Γ_{bc}^a . Подробно вопрос рассмотрен в монографии [2].

Операторное соотношение (6) позволяет оценить так называемую кинематическую ангармоничность в теории молекулярных колебаний, учитывающую свойство криволинейности естественных колебательных координат как скалярных величин [2].

Алгоритм получения метрических соотношений, связывающих естественные колебательные координаты с декартовыми координатами атомов в молекуле, базируется на одном определяющем выражении, представляющем обычное скалярное произведение векторов. Его дифференцирование по декартовым координатам атомов позволяет получить выражения для так называемых S -векторов Вильсона – Ельяшевича [4] (первые производные или метрику), параметры кинематической ангармоничности [2].

Для координаты типа q (изменение длины связи S_{ij} , образованной атомами с номерами i и j), определяющим является следующее выражение для длины рассматриваемой связи через декартовы координаты:

$$S_{ij} = \left(\sum_{\alpha} (R^{j\alpha} - R^{i\alpha})^2 \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Для координаты типа β (изменение угла между двумя единичными векторами e_{ij} и e_{kl}) определяющее соотношение имеет вид:

$$\cos \beta = \sum_{\delta} e_{ij}^{\delta} \cdot e_{kl}^{\delta}. \quad (9)$$

При рассмотрении типа координат ρ (изменение угла между связью e_{ij} и плоскостью, образованной векторами e_{kl} и e_{rt}) определяющим является выражение

$$\cos \rho = \vec{H} \cdot \vec{e}_{ij}, \quad (10)$$

где H – координаты нормального к плоскости вектора

$$H^{\delta} = \text{Cosec} \beta \cdot \sum e_{\delta\alpha\beta} \cdot e_{kl}^{\alpha} \cdot e_{rt}^{\beta}, \quad (11)$$

где $e_{\delta\alpha\beta}$ – антисимметричный тензор третьего ранга.

Для координаты типа χ , определяемой как изменение угла между плоскостями, заданными двумя тройками атомов (ijk) и (lrt), определяющим является соотношение

$$\cos \chi = \vec{H}(i, j, k) \cdot \vec{H}(l, r, t). \quad (12)$$

Если нормальные векторы плоскостей коллинеарны ($\sin \chi = 0$), то вводится дополнительный вектор

$$\vec{f} = \vec{e}_{jk} \cdot \text{Cosec} \beta - \vec{e}_{jr} \cdot \text{Ctg} \beta \quad (13)$$

Искомая естественная координата представляется суммой

$$\chi = \chi_1 + \chi_2, \quad (14)$$

для которой

$$\cos \chi_1 = \vec{H}_1 \cdot \vec{f}, \quad \cos \chi_2 = \vec{H}_2 \cdot \vec{f}.$$

Для вычисления параметров кинематической ангармоничности в молекулярной динамике как производных от элементов матрицы кинематических коэффициентов по естественным колебательным координатам $Q = q, \beta, R, \chi$

$$T^{vw} = \sum B_{N\alpha}^v \cdot B_{N\alpha}^w / m_N \quad (15)$$

$$\frac{\partial T^{vw}}{\partial Q^c} = \frac{\partial T^{vw}}{\partial R^{M\gamma}} \cdot \frac{\partial R^{M\gamma}}{\partial Q^c} \quad (16)$$

используется производная от элемента контравариантного тензора по декартовой координате

$$\frac{\partial T^{vw}}{\partial R^{M\gamma}} = \sum (B_{N\alpha M\gamma}^v \cdot B_{N\alpha}^w + B_{N\alpha}^v \cdot B_{N\alpha M\gamma}^w) / m_N. \quad (17)$$

Обратная метрика, связывающая декартовые координаты с естественными координатами, имеет вид:

$$\frac{\partial R^{M\gamma}}{\partial Q^c} = (B_a^{N\alpha} \cdot B_c^{N\alpha}) \cdot B_{M\gamma}^a / m_M = (T^{ac})^{-1} \cdot B_{M\gamma}^a / m_M. \quad (18)$$

Операторное соотношение (6) позволяет связать силовые константы в декартовых и естественных координатах, что приводит к выражениям:

$$\frac{\partial U}{\partial x^{N\alpha}} = \frac{\partial q^a}{\partial x^{N\alpha}} \cdot \frac{\partial U}{\partial q^a} = B_{N\alpha}^a \frac{\partial U}{\partial q^a} \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^{N\alpha} \partial x^{K\beta}} = B_{N\alpha}^a B_{K\beta}^b \frac{\partial^2 U}{\partial q^a \partial q^b} + B_{N\alpha K\beta}^a \cdot \frac{\partial U}{\partial q^a} \quad (20)$$

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial q^a \partial q^b} \right)_0 = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^{N\alpha} \partial x^{K\beta}} \right)_0 \cdot B_a^{N\alpha} \cdot B_b^{K\beta} \quad (21)$$

$$\frac{\partial^3 U}{\partial x^{N\alpha} \partial x^{K\beta} \partial x^{M\gamma}} = B_{N\alpha}^a B_{K\beta}^b B_{M\gamma}^c * \quad (22)$$

$$\{U_{abc} - \Gamma_{ac}^f U_{bf} - \Gamma_{bc}^f U_{af} - \Gamma_{ab}^f U_{cf} + B_{N\alpha K\beta M\gamma}^a U_a\} \Gamma_{ab}^f = -B_{N\alpha K\beta}^f \cdot B_a^{N\alpha} \cdot B_b^{K\beta}. \quad (23)$$

Матрица S -векторов (метрика, связывающая введенные естественные колебательные координаты с декартовыми координатами атомов) является промежуточным этапом расчетной схемы и позволяет получить метрические соотношения, связывающие естественные колебательные координаты с нормальными координатами. Это шаг к идентификации колебаний, поскольку указанная метрика (матрицы форм нормальных колебаний [4]) определяет долю участия того или иного молекулярного фрагмента в рассматриваемом нормальном колебании.

Аналитическое выражение для элементов матрицы форм следует из ее определения:

$$L_s^a = B_{N\alpha}^a B_s^{N\alpha}. \quad (24)$$

$$\chi_{ss} = 1/16 F_{ssss} - 5/48 (F_{ssss})^2 / v_s + 1/32 (F_{ssr})^2 (\Omega(s;s;-r) - \Omega(s;s;r) - 12\Omega(r;r;r)) (1 - \delta_{sr})$$

$$\chi_{sr} = 1/16 F_{ssrr} - 1/8 (F_{ssr})^2 (\Omega(s;s;-r) + \Omega(s;s;r) (1 - \delta_{sr}) + 3/8 (F_{srr})^2 (\Omega(s;r;t) - \Omega(s;r;-t) + \Omega(s;-r;t) - \Omega(s;-r;-t)) (1 - \delta_{sr}) (1 - \delta_{st}) (1 - \delta_{rt}) + L(a;sr)^2 / (\Omega(s;r;0) + \Omega(s;-r;0)) / 2. \quad (26)$$

Ангармоническое смещение фундаментальных полос колебаний определяется ангармоническими поправками $X_{ii} = 2 \chi_{ii}$ и $X_i = 1/2 \sum \chi_{ir}$. Резонансные знаменатели $\Omega(s; \pm r; \pm t) = (v_s \pm v_r \pm v_t)^{-1}$ для ангармонических постоянных в выражении (26) ограничивают область их при-

Суммирование, как это принято в векторной алгебре, осуществляется по повторяющимся индексам в первой части выражений. Первый сомножитель в выражении (24) есть элемент рассчитываемой матрицы S -векторов, второй – смещения атомов из положения равновесия при нормальных колебаниях, что, как указано выше, является выходными данными программного продукта «Gaussian» и входными данными приложения «Vibration-2011».

Принято нормировать матрицу форм следующим образом:

$$T^{ab} = L_v^a L_v^b; \quad U_{ab} = L_s^a \lambda_s L_s^b. \quad (25)$$

Второе соотношение в выражении (25) используется в итерационном алгоритме получения эффективного силового поля для совокупности изотопозамещенных соединений, чаще всего дейторозамещенных [2]. Для этого на каждом шаге итерации для нахождения эффективного силового поля в выражении для элементов матрицы U_{ab} в качестве параметров λ_s используются экспериментальные значения частот колебаний.

Поскольку процесс итерации зависит от выбора исходного приближения в оценки гармонического силового поля, то в расчетной схеме предусмотрен алгоритм сглаживания процесса итерации за счет массива масштабирующих коэффициентов.

Автономными макросами, обеспечивающими сервисные возможности приложения «Vibration-2011», являются макросы оценки ангармонического смещения полос при учете кубических и квартичных параметров адиабатического потенциала в выражении (2) в рамках адиабатической теории возмущения второго порядка, что позволяет выяснить правомочность используемой схемы теории возмущения и наличие ангармонических резонансов.

Предлагаемый алгоритм использует следующие выражения [6] для ангармонических констант в выражении (4):

менения. Этот вопрос подробно исследован в публикации [6].

Алгоритм анализа ангармонических резонансов Ферми между фундаментальными (v_i) и обертонами ($v_j + v_k$) колебательными состояниями базируется на следующем соотношении [7]:

$$E = \{(v_i + v_j + v_k) \pm (F_{ijk}^2(1 + \delta_{jk})/2 + ((v_i - v_j - v_k)^2)^{1/2})/2\}. \quad (27)$$

Первоначально осуществляется поиск обертоновых состояний, близких к рассматриваемому фундаментальному состоянию в пределах выбранного значения энергетической щели, затем строится матрица энергетического взаимодействия для расчета для каждой пары резонирующих состояний по соотношению (27), затем решается задача на собственные числа сформированной матрицы, определяющие расхождение резонирующих состояний.

При создании программного приложения использован табличный редактор технологии Excel. Выбор продиктован высокими сервисными возможностями данного приложения MSO, простотой языка программирования VBA в создании пользовательских приложений для научных и учебных целей, доступностью самого редактора.

Заключение

Описаны возможности предлагаемого приложения «Vibration-2011» для для программно-алгоритмической поддержки такой задачи молекулярного моделирования, как интерпретация колебательных спектров сложных молекулярных соединений на основании неэмпирических квантовых расчетов их геометрии и параметров адиабатического потенциала, выявление полос для спектральной идентификации базовых молекулярных фрагментов. Надежность предлагаемых алгоритмов и достоверность предсказательных расчетов молекулярных параметров продемонстрирована в ряде работ авторов [8–12], использующих предыдущие версии приложения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минкин, В. И. Теория строения молекул / В. И. Минкин, Б. Я. Симкин, Р. М. Миняев. – Ростов н/Д : Феникс, 1997. – 560 с.
2. Пулин, В. Ф. Исследование динамики молекулярных соединений различных классов / В. Ф. Пулин, М. Д. Элькин, В. И. Березин. – Саратов : Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2002. – 548 с.
3. Frisch M. J. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H.B et al. Revision A.7. Gaussian 03. Gaussian, Inc., Pittsburgh (PA). 2003.
4. Свердлов, Л. М. Колебательные спектры многоатомных молекул / Л. М. Свердлов, М. А. Ковнер, Е. П. Крайнов. – М.: Наука, 1970. – 560 с.
5. Рашевский, П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П. К. Рашевский. – М.: Наука, 1967. – 664 с.
6. Элькин, М. Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М. Д. Элькин, Л. М. Бабков // Известия Саратов. гос. ун-та. Серия Физика. – 2011. – Т. 11, вып. 1. – С. 20–25.
7. Герцберг, Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул / Г. Герцберг. – М.: ИЛ, 1949. – 647 с.
8. Элькин, П. М. Структурно-динамические модели и ангармонический анализ колебательных состояний полихлорзамещенных дибензо-*p*-диоксинов / П. М. Элькин, М. А. Эрман, О. В. Пулин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 21–24.
9. Элькин, П. М. Моделирование структуры и колебательных спектров кислородосодержащих соединений / П. М. Элькин, Т. А. Шальнова, О. Н. Гречухина // Известия Саратов. ун-та. Новая серия. Физика. – 2009. – Т. 9, № 1. – С. 27–33.
10. Эрман, Е. А. Информационная технология «Gaussian» и структурно-динамические модели кислородосодержащих соединений / Е. А. Эрман, П. М. Элькин, О. Н. Гречухина // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 2 (39). – Вып. 2. – С. 108–114.
11. Эрман, Е. А. Модельные оценки ангармонического смещения полос в колебательных спектрах димеров карбоновых кислот / Е. А. Эрман, М. Д. Элькин, Е. А. Джалмухамбетова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2010. – № 4(12). – С. 53–58.
12. Эрман, Е. А. Моделирование структуры и спектров замещенных бензойной кислоты / Е. А. Эрман, М. Д. Элькин, О. Н. Гречухина, А. М. Лихтер // Естественные науки. – 2011. – № 1(34). – С. 206–212.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.021

Е. М. Артемьев, О. О. Привалов, А. А. Цветков, В. О. Петров

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ АНОМАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ЗАДАЧЕ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

Камышинский технологический институт (филиал)

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования

«Волгоградский государственный технический университет»

eugeny-agat@mail.ru, galva@mail.ru, art-cvetkov-kam@yandex.ru, krabler@rambler.ru

Рассмотрен алгоритм построения карты глубины по стереопаре SAD. В результате исследования выявлен высокочастотный характер аномальных данных при малом размере окна соответствия. Предложен способ уменьшения доли аномальных данных на карте глубины путем низкочастотной фильтрации. Эффективность способа проверена на 18 наборах входных данных, доказано улучшение работы алгоритма на 50 % по критерию количества ошибочных точек.

Ключевые слова: стереопара, машинное зрение, стереорекострукция, фильтрация.

E. M. Artemev, O. O. Privalov, A. A. Cvetkov, V. O. Petrov

RESEARCH OF ANOMALOUS DATA FILTERING ALGORITHM IN THE PROBLEM OF ROBOTS STEREOSCOPIC VISION

Kamyshin Technological Institute (branch of) Volgograd State Technical University

An algorithm for constructing a depth map by stereo SAD is considered. The study revealed a high frequency character of abnormal of the data with a small window size match. Supposed the way to decrease in the proportion of anomalous data to map the depth by low-pass filtering. Efficiency of the method is tested on 18 sets of input data, the algorithm demonstrated improvement by 50 % of the criterion number of erroneous points.

Keywords: stereo pair, machine vision, stereo matching, filtering.

Одна из важнейших задач в робототехнике – задача пространственной ориентации [1]. Для ее решения достаточно часто используют метод стереорекострукции. Результатом работы метода стереорекострукции служит так называемая карта глубины, представляющая со-

бой двумерный массив, элементами которого являются числа, определяющие параллакс каждой точки наблюдаемой картины [2]. Карту глубины можно представить в виде изображения, где яркость пикселя прямо пропорциональна его параллаксу (рис. 1).

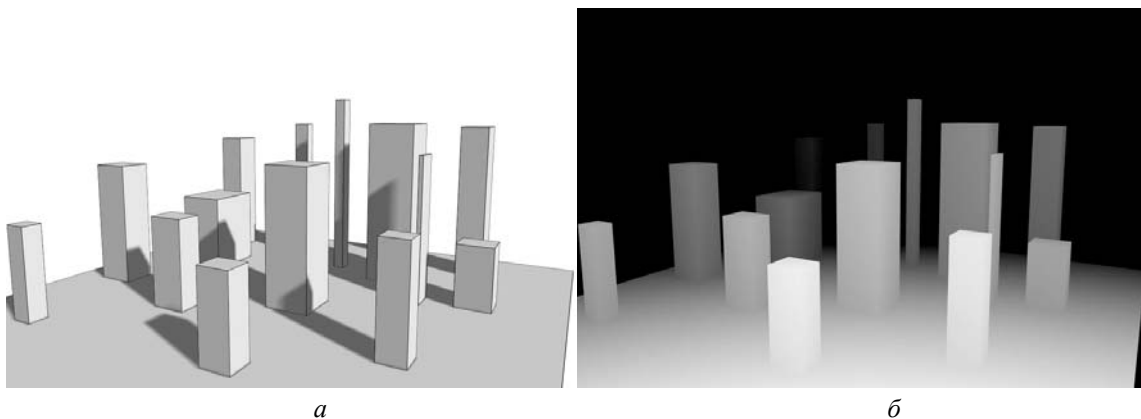


Рис. 1. Трехмерная сцена (а) и графическая интерпретация ее карты глубины (б)

С точки зрения ориентации робота параллакс можно трактовать как величину, обратную расстоянию до интересующего объекта.

В основе стереорекострукции лежит метод нахождения соответствий между точками изображений сцены, полученных с разных ракурсов. При этом точки соответствуют друг другу, если они представляют собой проекцию одной точки трехмерного пространства. Основная проблема нахождения соответствий заключается в том, что на сегодняшний день не существует алгоритмов, позволяющих без погрешности находить точки соответствия. Это обусловлено следующими причинами:

- точки, находящиеся в области перекрытия объектов, могут не иметь соответствующих точек на одном из ракурсов стереоизображения;
- изображения содержат цифровой шум, возникающий из-за помех при получении сигнала с камеры. Это проблема особенно выражена на слабо текстурированных областях из-за низкого соотношения сигнал-шум (SNR) [3];
- из-за неравномерности освещения или различия параметров камер одна и та же точка объекта может иметь различные цветояркостные характеристики [4].

Поэтому выходные данные алгоритмов стереорекострукции содержат аномальные данные, затрудняющие анализ наблюдаемой сцены.

В данной работе в качестве базового алгоритма, решающего задачу стереорекострукции, был выбран алгоритм с критерием на основе суммы абсолютных разностей (SAD) [5]. Такой выбор обусловлен простотой реализации и высокой скоростью работы алгоритма.

Для выбранного алгоритма были проведены две группы экспериментов: первая группа, направленная на выявление закономерностей появления и количества аномальных данных, и вторая группа, направленная на исследование влияния алгоритмов шумоподавления на количество аномальных точек.

В первой группе, в ходе эксперимента по определению влияния размера окна на количество и характер аномальных данных, у алгоритма варьировался размер окна, определяющего область поиска соответствий между пикселями левого и правого изображений. Размер квадратного окна R варьировался от 1 до 17 пикселей.

В качестве входных данных использовалась серия из 18 стереопар с известной эталонной картой глубины [6].

В качестве минимизируемого критерия в экспериментах выступает доля значений рассчитанной карты глубины отличающихся от эталона:

$$F = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (\epsilon(E_{x,y} - I_{x,y})), \quad (1)$$

$$\epsilon(a) = \begin{cases} 1, & \text{если } |a| > 1, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2)$$

где M – ширина изображения в пикселях; N – высота изображения в пикселях; $E_{x,y}$ – значение эталонной карты глубины в точке (x, y) ; $I_{x,y}$ – значение карты глубины, полученной в результате работы алгоритма, в точке (x, y) .

Визуальная интерпретация результатов эксперимента представлена на рис. 2.

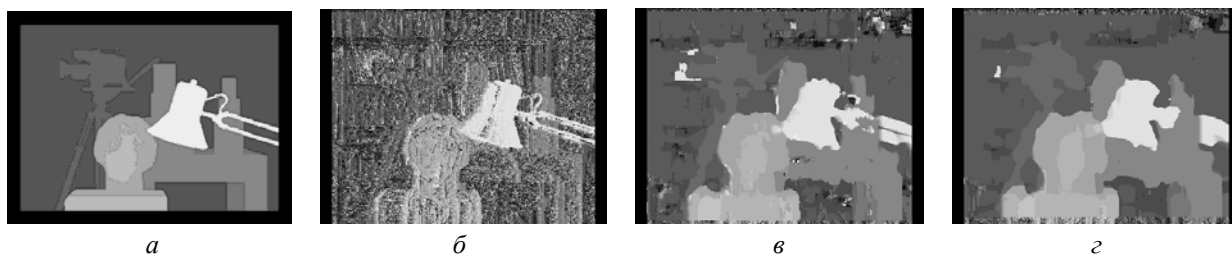


Рис. 2. Эталонная карта глубины (а) и результат работы алгоритма при размере окна (в пикселях) $R=1$ (б); $R=9$ (в); $R=17$ (г)

Из рис. 2 видно, что при малом размере окна карта глубины содержит множество мелких артефактов. При увеличении размера окна количество артефактов уменьшается, но одновременно появляются искажения границ объектов. Для количественной оценки данного эффекта вычислялось количество ошибочных точек вбли-

зи границ объектов. Для этого на эталонной карте глубины находились границы методом Собеля, а затем производилось сравнение областей вокруг полученных границ с соответствующими областями на рассчитанной карте глубины. На рис. 3 показаны ошибочные точки возле границ объектов.



Рис. 3. Ошибочные точки возле границ при размере окна $R=1(a)$; $R=9(b)$; $R=17(c)$

Ниже представлены графики зависимости критерия (1) от размера окна (рис. 4) получен-

ные в результате обработки входного массива изображений.

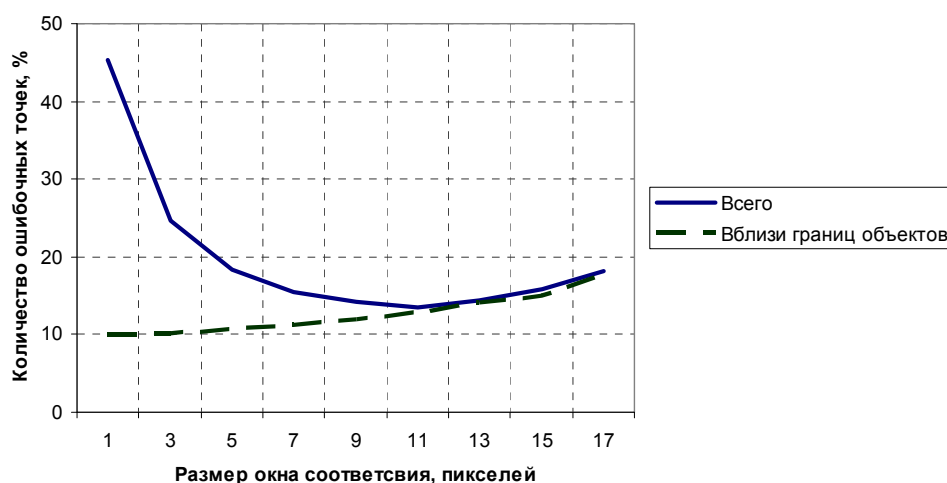


Рис. 4. Зависимость средней ошибки и времени от размера окна

По результатам первой группы экспериментов можно сделать следующий вывод: увеличение размера окна приводит к снижению уровня шума, но одновременно и к искажению глубины возле границ объектов. При размере окна больше 10 пикселей критерий (1) примерно равен количеству ошибочных точек возле границ. Время работы алгоритма линейно зависит от размера окна.

Во второй группе экспериментов ставилась задача выявить возможности устранения аномальных данных с помощью фильтрации карты глубины.

В качестве исходных данных использовались карты глубины, полученные с помощью алгоритма SAD с размером окна соответствия $R = 3$. При подборе данного параметра учитывалось, что большой размер окна приводит к искажению границ объектов. Поэтому был выбран минимальный размер, при котором алгоритм показывает устойчивые результаты.

В качестве основной гипотезы при проведении экспериментов выступала идея о том, что

большинство трехмерных объектов имеют гладкую поверхность, поэтому функция глубины не должна содержать разрывов, за исключением границ объектов, и, как следствие, области карты глубины, насчитывающие большое количество перепадов, содержат аномальные данные.

Основываясь на высокочастотном характере аномальных данных, в качестве основного метода решения было намечено использовать широко распространенные алгоритмы низкочастотной фильтрации, такие как медианная фильтрация и фильтр Гаусса. Выбор алгоритмов оконной фильтрации обусловлен возможностью реализации параллельных вычислений и малым набором настроечных параметров.

Работа медианного фильтра заключается в определении нового значения пикселя как медианы значений соседних пикселей. Алгоритм сортирует по возрастанию значения пикселей внутри квадратного окна вокруг заданного пикселя и подставляет значение среднего пикселя в этом списке значению заданного пикселя. Такой алгоритм невосприимчив к импульсным

помехам, в отличие от среднего арифметического, что делает алгоритм более робастным [7].

Работа алгоритма фильтра Гаусса основана на вычислении нового значения пикселя $F(x, y)$ путем интегрирования значений окружающих пикселей $f(x, y)$ умноженных на матрицу весовых коэффициентов g , называемых ядром свертки (3), (4).

$$F(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n g_{i,j} \cdot f(x+i-n/2, y+j-n/2), \quad (3)$$

$$g_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i-n/2)^2 + (j-n/2)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; n – размер квадратного окна фильтра в пикселях.

Для входных данных после использования алгоритма SAD были независимо применены описанные алгоритмы. Применение алгоритмов позволило снизить количество ошибочных точек. Зависимость количества ошибочных точек от размера окна фильтра и алгоритма фильтрации карты глубины показана на рис. 5. Из графика видно, что алгоритм медианной фильтрации снижает погрешность лучше, чем фильтр Гаусса.

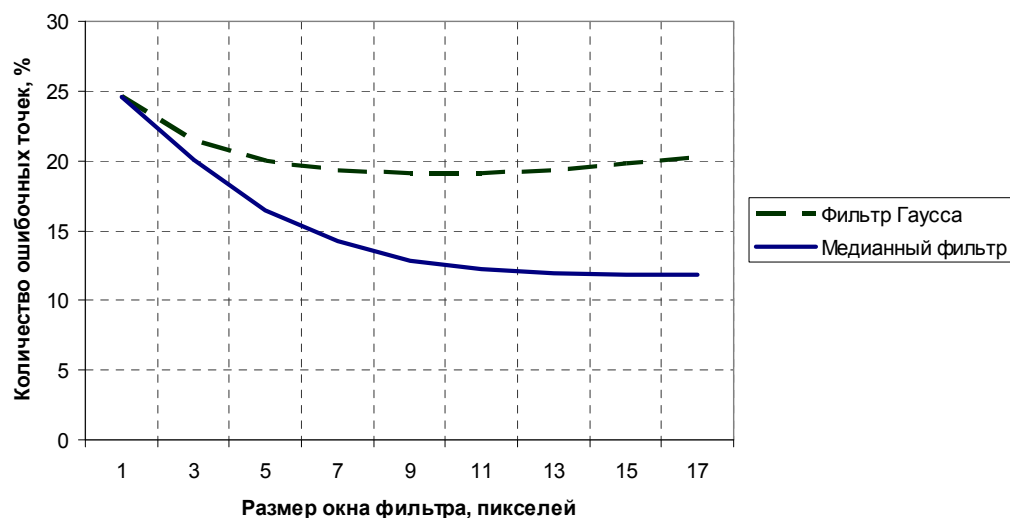


Рис. 5. Зависимость количества ошибочных точек от размера фильтра

В результате проведенных экспериментов для решения задачи стереорекострукции предлагается использовать алгоритм поиска глубины по сумме абсолютных разностей с алгоритмом медианной фильтрации. При наличии аномальных данных такая комбинация алгоритмов позволяет уменьшить количество ошибочных точек до двух раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адаптация алгоритмов технического зрения для систем управления шагающими машинами / С. А. Быков, А. В. Еременко, А. Е. Гаврилов, В. Н. Скакунов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – 132 с.

2. Конушин, А. Геометрические свойства нескольких изображений / А. Конушин // Компьютерная графика и мультимедиа. Вып. № 4(3)/2006.

3. Edwin L. Aguirre. Deep-Sky Imaging with Digital Cameras. Sky and Telescope, Vol. 104, Issue 4, p. 113 (2002).

4. Klaus, M. Sormann and K. Karner. Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure. ICPR 2006.

5. Annika Kuhl, Comparison of Stereo Matching Algorithms for Mobile Robots. The University of Western Australia, 2005.

6. D. Scharstein and R. Szeliski. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. International Journal of Computer Vision, 47(1/2/3):7-42, April-June 2002.

7. G. R. Arce. Nonlinear Signal Processing : A Statistical Approach. Wiley:New Jersey, USA, 2005.

УДК 617-7

*Ю. М. Брумиштейн, В. М. Сокольский, Ю. Ю. Аксенова***МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ ОБЩАЯ АНЕСТЕЗИЯ:
СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ РИСКОВ И МОДЕЛЕЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ****Астраханский государственный университет**

brum2003@mail.ru, sokolski_vm@mail.ru, aks_juliana@mail.ru

Рассмотрены факторы, определяющие риски хирургических операций (ХО) с использованием многокомпонентной общей анестезии. Обоснованы математические модели оценки рисков таких ХО. Охарактеризован состав решений и их риски для пациентов, анестезиологов и других лиц на этапах до, во время и после ХО. Предложены математические модели принятия решений о целесообразности проведения ХО, управления рисками при общей анестезии.

Ключевые слова: общая анестезия, риски деятельности, принятие решений, информационное обеспечение, планирование, проведение операций, анализ результатов, математические модели.

*J. M. Brumshtejn, V. M. Sokolsky, J. J. Aksenova***MULTICOMPONENT GENERAL ANESTHESIA:
THE SYSTEM ANALYSIS OF RISKS AND DECISION-MAKING MODELS****The Astrakhan State University**

brum2003@mail.ru <mailto: brum2003@mail.ru>,

Factors of influence and feature of risks for surgical operations (SO) with multicomponent general anesthesia usage are considered. Mathematical models of risks estimation for such SO are proved. The structure of decisions and their risks for patients, anesthesiologists and other persons at stages before, during and after SO is characterized. Mathematical models of decision-making about carrying out SO expediency, risk controlling during general anesthesia are offered.

Keywords: the general anesthesia, risks of activity, decision-making, information support, planning, operations carrying out, results analysis, mathematical models.

Хирургические операции (ХО) могут быть единственно возможным вариантом медпомощи пациентам или эффективной альтернативой применения терапевтических методов. Эндоскопические операции позволяют решать лишь ограниченный круг задач, встречающихся в медицинской практике. Поэтому растет количество ХО с использованием общего наркоза пациентов [1], увеличивается их сложность и продолжительность во времени. Для длительных ХО типично применение многокомпонентной общей анестезии (МОА), выполняемой врачами-анестезиологами (ВА). Качество их деятельности очень важно для успешного проведения собственно ХО, выведения пациентов из состояния наркоза, минимизации послеоперационных осложнений. Принятие принципиального решения о проведении ХО (врачами и пациентом), решения ВА в отношении МОА (в том числе по ходу ХО) осуществляются в условиях ряда рисков, определяемых субъективными и объективными причинами. Указанные решения можно рассматривать как многокритериальные, принимаемые в нечетких условиях [8]. Системный анализ рисков ХО и МОА с позиций управления ими в существующей литературе фактически отсутствует. Поэтому ос-

новными целями настоящей статьи были: исследование структуры источников/причин рисков, связанных с ХО и МОА; построение математических моделей учета/управления рисками при принятии решений; оценка эффективности возможных мер по снижению уровней рисков ХО и МОА.

**Понятие риска и особенности его оценки
применительно к теме статьи**

Под «риском» обычно понимают возможность наступления (реализации) неблагоприятного события (НС) [4]. Риски для пациентов могут быть связаны как с решениями о проведении ХО, так и отказом от ХО по инициативе врачей, самих пациентов или их родственников.

Для пациента возможны различные виды рисков, в том числе и неоднократно повторяющихся во времени. Постоянно действующие риски (например, при хронических заболеваниях) могут быть представлены как совокупности рисков от дискретных во времени НС. Рассматриваемые далее подходы для «ХО в целом» можно распространить на «только МОА» и считать, что она сопровождается дискретными во времени рисками.

Вероятности возникновения НС могут быть зависимыми. В частности, риски в процессе МОА зависят от правильности выбора на дооперационном этапе состава препаратов и тактики проведения МОА. Однако в простейшем случае НС можно принять независимыми.

Основные характеристики единичного НС: вероятность возникновения (P') – в долях от единицы; ущерб при возникновении/реализации (U'). Для величины риска (ВР) типична количественная оценка (R') в виде

$$R' = P' * U', \quad (1)$$

где R', U' целесообразно считать выраженным в денежных единицах.

Суммарная ВР (СВР) всех независимых рисков в количестве «V»

$$R^* = \sum_{v=1}^V P_v * U_v, \quad (2)$$

где P_v, U_v – вероятность возникновения и величина ущерба для v -го риска. Однако для ХО ситуация сложнее, чем описывает (2), в частности из-за того, что НС (включая, послеоперационные осложнения, обострения заболеваний при отказах от ХО и пр.) могут наступать и годы спустя. Для приведения СВР к общему масштабу цен (с целью учета инфляционных процессов) используем вектор дисконтирующих коэффициентов $\{\omega_t\}_{t=1...T}$

$$R^{**} = \sum_{v=1}^V (P_v U_v \omega_t), \quad (3)$$

где T – максимальный номер периода, для которого учитываются риски; R^{**} есть СВР; ω_t берется для года « t », к которому относится вид риска с номером « v »; $\omega_1 = 1$; $\omega_t \leq \omega_{t+1}$. Для повторяющихся во времени НС одного вида ВР можно учитывать как для совокупностей независимых НС.

Если для v -го вида риска известен «набор» из J_v вариантов ущерба $\{u_{j,v}^-\}_{j=1...J_v}$ с вероятностями реализации $\{p_{j,v}^-\}_{j=1...J_v}$, то для U_v имеем

$$U_v = \sum_{j=1}^{J_v} (p_{j,v}^- * u_{j,v}^-); \quad \sum_{j=1}^{J_v} p_{j,v}^- = 1. \quad (4)$$

Вероятные СВР от ХО могут быть оценены с позиций пациентов, их родственников, врачей, медицинских учреждений (МУ), региональных органов управления здравоохранением, руководства регионов, страны.

При принятии решений [11] обычно нужна сумма СВР, оцененных с разных позиций, причем иногда целесообразен учет не только прямых рисков, но и косвенных. Например, осложнения после ХО, в том числе связанные с ошибками при проведении МОА, могут в последующем повышать риски техногенных аварий и катастроф из-за неадекватности или запоздания действий оперированных лиц в экстремальных ситуациях.

Оценки ущерба от НС при ХО могут быть объективными и субъективными. В частности, оценки пациентами причиненных им ущербов от ХО могут принципиально отличаться от оценок МУ.

Для МУ себестоимости подготовки и проведения сложных ХО с использованием МОА составляют в России несколько десятков тысяч, а высокотехнологичных – сотни тысяч рублей. Поэтому, безотносительно к рискам пациентов, возможности срыва таких операций по различным причинам могут рассматриваться как риски МУ.

Кроме «аддитивных» подходов к учету ВР по (2), (3) возможны и «мультипликативные», учитывающие «взаимодействие компонент» ХО. Например, вероятность успеха ХО в целом ($\Theta^{\#}$) можно оценить по

$$\Theta^{\#} = \prod_{i=1}^{I^K} \Theta_i, \quad (5)$$

где I^K – количество учитываемых компонент для ХО; $\{\Theta_i\}$ – вероятности успешности выполнения отдельных компонент ХО, включая и МОА. Однако больший интерес по сравнению с (5) представляют модели, учитывающие влияние «относительного качества» (ОК) исполнения компонент ХО на качество результата ХО. Для перехода к ОК мы будем нормировать прогнозные балльные оценки успешности для компонент на их максимально возможные значения, что даст для всех ОК диапазон от «0» до «1». Будем считать, что максимальный положительный результат от ХО (Ω^+) достигается, если все компоненты ХО выполнены с ОК не ниже верхних пороговых значений, а наиболее неблагоприятный результат (Ω^-) – если хотя бы одна из компонент выполнена с ОК меньше нижнего порогового значения. Понятно, что Ω^- может быть отрицательной, в том числе при летальном исходе ХО. Тогда оценку ожидаемого результата ХО (F_{oper}) можно дать [11]

на основе критерия «оптимизма-пессимизма» (γ) и формулы

$$F_{oper} = \Omega^+ \gamma + \Omega^- (1 - \gamma); \quad \Omega^- \leq F_{oper} \leq \Omega; \\ 0 \leq \gamma \leq 1, \quad (6)$$

где $\gamma = 1$ соответствует максимальному оптимизму; а $\gamma = 0$ – максимальному пессимизму. Величина γ в (6) зависит от интегральной оценки вероятного качества ХО (K_{oper}). Естественно принять: $0 \leq K_{oper} \leq 1$; $K_{oper} = 0$ для $\gamma = 0$; $K_{oper} = 1$ для $\gamma = 1$. В простейшем варианте $\gamma = K_{oper}$, однако в общем случае зависимость $\gamma = \gamma(K_{oper})$ нелинейная. Примем

$$K_{oper} = \prod_{i=1}^{I^K} ((K_i^*)^{\lambda_i}), \quad (7)$$

где K_i^* – показатель вероятного ОК для i -й компоненты ХО; λ_i – «важность» i -й компоненты. Значения $\lambda_i = 1$ соответствуют «среднему» уровню важности; $\lambda_i > 1$ – уровням выше среднего; $\lambda_i < 1$ – ниже среднего. Пусть $\{K_i^{(hb)}\}_{i=1 \dots I^K}$; $\{K_i^{(lb)}\}_{i=1 \dots I^K}$ – верхнее и нижнее пороговые значения для i -й ОК. Тогда для показателя ОК K_i^* примем зависимость

$$K_i^* = \begin{cases} 1; & \text{при } K_i \geq K_i^{(hb)} \\ K_i; & \text{при } K_i^{(hb)} \geq K_i \geq K_i^{(lb)} \\ 0; & \text{при } K_i < K_i^{(lb)} \end{cases}. \quad (8)$$

Использование $K_i^{(hb)}$ в (8) обосновано тем, что в некоторых пределах возможна «компенсация» недочетов по компоненте ХО за счет «адаптационных резервов» организма пациента и/или техсредств проведения ХО.

Общая характеристика использования МОА при хирургических операциях и состава принимаемых решений

Целью МОА является обеспечение проведения ХО в течение необходимого времени с минимальными отрицательными последствиями, часть которых носит вероятностный характер и может трактоваться как «риски». При этом ВА вынуждены решать две конкурирующие задачи: обеспечение достаточной глубины МОА в процессе ХО – с тем, чтобы «чувствительность» пациента к хирургическим воздействиям была минимальной; снижение общей

медикаментозной нагрузки (МН) на пациента за период ХО.

Недостаточная глубина МОА при ХО может приводить: к неполному расслаблению мускулатуры; нежелательной болевой нагрузке на центральную нервную систему и т. д. С другой стороны, избыточная МН может: затруднять выведение пациента из состояния наркоза после окончания ХО; повышать вероятность послеоперационных осложнений и т. д.

Для плановых ХО в стационарных МУ при МОА типичен внутривенный ввод препаратов четырех функциональных групп: обезболивающее, то есть анальгетик (например, фентанил); нейролептик (например, дроперидол); гипнотик (например диприван); миорелаксант (например, листэнол). При проведении общего наркоза на начальном этапе используется только МОА. Затем состояние анестезии поддерживают комбинированно: ингаляцией закиси азота с кислородом в соотношении 2 : 1; дискретным по времени внутривенным введением анальгетика и нейролептика по 1–2 мл каждые 15–20 мин. При учащении пульса дополнительно вводят анальгетик, а при повышении артериального давления – нейролептик [7]. Таким образом, управление МОА является адаптивным; дискретный ввод препаратов приводит к их локальным по времени избыточным концентрациям в крови и, как следствие, повышению МН сверх объективно необходимой.

Общий наркоз с использованием гелия или ксенона является альтернативой МОА, существенно снижающей ВР для пациентов. Однако из-за высокой стоимости этих газов он применяется редко.

В отношении принятия/реализации решений по конкретной ХО для ВА можно выделить три этапа: до; во время; после операции.

Положительное решение (ПР) о целесообразности плановой ХО обычно принимается врачами с согласия пациента или его родственников.

На дооперационном этапе ВА выполняют: определение тактики проведения МОА с учетом особенностей пациента и ХО; уточнение состава оборудования для обеспечения МОА; выбор конкретных препаратов или их сочетаний для каждой из указанных выше функциональных групп; предварительная оценка необходимых количеств препаратов для МОА при ХО; выработка плана действий при возникновении «нештатных» ситуаций. Эти

решения/действия: являются взаимосвязанными; в целом направлены на минимизацию рисков ХО. Коллективное обсуждение/принятие ВА решений по МОА – способ снижения рисков. При этом использование математических методов (например, по типу [3]) затрудняется рядом факторов.

В процессе ХО ВА осуществляет мониторинг текущих параметров пациента и их изменений; на основе получаемой информации управляет динамикой ввода препаратов. Обеспечение необходимого качества информационной поддержки (ИП) ВА позволяет снизить вероятность принятия неправильных или не оптимальных решений; улучшает своевременность их принятия и реализации. Обычно ИП ВА при ХО обеспечивается комплексом инструментальных средств, снимающих/отображающих информацию в режиме реального времени. Факторы, осложняющие деятельность ВА: большие объемы информации; необходимость ее непрерывного анализа на протяжении всей ХО; дефицит времени на принятие решений; частично стохастический характер реакций пациента на воздействия; высокая профессиональная и морально-психологической ответственности ВА.

Для уменьшения информационно-интеллектуальной и/или психологической нагрузки на ВА эффективны такие инженерные решения: «свертка» многопараметрической информации о состоянии пациента с использованием «синтетических» показателей; их динамическое отображение в наглядной форме; звуковая и/или визуальная сигнализация о появлении опасных состояний или приближении к ним; использование автоматизированных информационно-измерительных и управляющих систем (ИИиУС) для МОА; применение средств дистанционного контроля (ДК) процесса МОА в рамках телемедицинских технологий (ТМТ).

Использование ДК при ХО может быть средством «подстраховки» действий ВА и/или обеспечения возможностей получения им оперативных консультаций, что снижает ВР. Такой ДК может быть организован как внутренний (для крупных медучреждений) или с использованием квалифицированных специалистов из других населенных пунктов. В условиях быстрого развития ТМТ применение ДК будет, вероятно, расширяться.

В общем случае функциональность ИИиУС должна включать в себя: обработку/отображе-

ние информации; управление сигнализацией; реализацию автоматического ввода препаратов, в том числе непрерывного; автоматическое синхронное «протоколирование» параметров пациента и интенсивностей введения препаратов. Распределенный во времени ввод препаратов потенциально позволяет снизить общую МН на пациента.

При использовании ИИиУС ВА должен иметь возможность в необходимых по его мнению случаях: прерывать работу ИИиУС в отношении ввода препаратов и брать управление МОА «на себя»; передавать управление вводом препаратов ИИиУС. Эти действия должны протоколироваться.

Представляется желательной и синхронная аудиовидеорегистрация действий хирургической бригады в процессе ХО, хотя это и может создавать дополнительное психологическое давление на медперсонал. Однако общее расширение использования информационных технологий в сфере здравоохранения, рост объемов баз данных, снижение стоимостей хранения «единицы информации» и другие факторы позволяют предположить, что необходимость такой регистрации и хранения записей будут в скором времени закреплены на нормативном уровне. Это было бы полезно не только для ретроспективного анализа ХО врачами, но и как средство информационного подтверждения правильности действий хирургической бригады в рамках аудита/управления качеством медпомощи в МУ, возникновения претензий со стороны пациентов.

Сигнализация опасных состояний (ОС) в минимальной форме присутствует во многих современных видах мониторирующего медоборудования. Однако обычно она относится лишь к отдельным параметрам, но не их сочетаниям. Тем более не используются возможности обработки взаимосвязанных временных рядов [2] для прогнозирования ОС.

В отношении «свертки» информации при МОА эффективно использование так называемой мультисистемной диаграммы [9], позволяющей наглядно представить характеристику комплекса гемодинамических показателей и транспорта кислорода (но это далеко не все необходимые для ВА показатели пациента). Динамический расчет/отображение такой диаграммы в реальном масштабе времени требуют специальных аппаратно-программных средств, которые целесообразно включить в ИИиУС.

Сложность разработки алгоритмов адаптивного управления МОА для ИИиУС, аппаратно-программной реализации этих алгоритмов в реальном времени (и пр.) привели к тому, что такое оборудование в анестезиологической практике почти не используется. В качестве реальных примеров таких ИИиУС укажем [5, 6, 13, 14], а также ИИиУС МОА, разработанную одним из авторов настоящей статьи [10].

В послеоперационный период ВА и его коллеги могут делать выводы о правильности/своевременности своих решений во время ХО и фактически корректировать «базу решающих правил» в отношении будущих действий. Ретроспективный анализ архивных записей ХО, выполненных ИИиУС, может резко повысить объективность такого анализа, в том числе за счет неоднократного синхронного воспроизведения совокупностей параметров, отражающих «динамику операционной ситуации».

При унификации структуры архивных записей по МОА ХО потенциально возможны: создание централизованных хранилищ информации с «деперсонализированными» данными по МОА (ЦХИ МОА); использование их для анализа, в том числе в рамках процедур Data Mining; выработки рекомендаций для ВА; информационного обеспечения процессов создания экспертных систем по МОА и пр. Информация в ЦХИ МОА не будет дублировать данные электронных медицинских карт пациентов, которые предполагается разместить в распределенном федеральном хранилище данных [12].

Риски решений/действий, связанные с проведением ХО и МОА

Ниже мы рассмотрим такие группы рисков: риски пациентов; профессиональные риски ВА; его личные карьерные риски; риски МУ.

Для пациентов и их родственников риски связаны, в основном, не собственно с МОА, а с ХО в целом. Они могут включать в себя: летальный исход в процессе ХО или после нее (в том числе в связи с неоптимальными решениями по МОА); послеоперационные осложнения и пр. Факторы, увеличивающие эти риски: неадекватное восприятие пациентами возможных последствий МОА и ХО в целом (это может приводить к ухудшению их психофизиологического состояния и пр.); плохое общее физическое состояние пациентов; сообщение ими врачам неполной или недостоверной информации о перенесенных ранее или существующих

заболеваниях, о слабой переносимости некоторых препаратов и пр.

Для хирургической бригады риски МОА могут быть связаны: с неполнотой предоперационного обследования; неточным диагнозом и/или поставленными целями ХО; нарушениями санитарно-гигиенического режима в операционных, палатах реанимации; отказами хирургического оборудования, включая системы жизнеобеспечения; ошибочностью действий ВА; недостаточной психологической и/или профессиональной совместимостью ВА с остальными членами хирургической бригады.

Информационной базой поддержки принятия решений ВА выступают: его профессиональные знания и опыт; дооперационная информация о пациенте и ХО; мониторинговая информация по ходу ХО.

На дооперационном этапе профессиональные риски ВА связаны, в основном, с неверным выбором набора препаратов для МОА; недостаточно внимательным изучением истории болезни пациента, его анализов.

В процессе ХО риски ВА связаны с неверными или неоптимальными решениями по управлению МОА, включая: неточное определение интенсивностей ввода препаратов; несвоевременное принятие/реализацию решений; запаздывание реакций ВА на приближение к «аварийным» ситуациям. Неполная или неактуальная ИП решений ВА в процессе МОА может значительно увеличивать рассмотренные риски.

Отметим также риски, не связанные непосредственно с решениями/действиями ВА в процессе ХО: стохастический характер реакций пациента на МОА; возникновение неисправностей медоборудования и пр.

На послеоперационном этапе профессиональные риски ВА могут быть связаны: с неполнотой анализа информации по МОА для проведенных ХО; неверными выводами по результатам такого анализа.

Факторами, повышающими уровни рисков для ВА могут быть: недостаточный уровень его профессиональной квалификации/навыков (особенно при возникновении нестандартных ситуаций); длительные перерывы в профессиональной деятельности; низкая психофизиологическая выносливость ВА (особенно при длительных операциях); неудовлетворительные взаимоотношения с другими членами хирургической бригады и др.

Отметим, что за рубежом страхование профессиональных рисков врачей широко распространено, но в России оно пока используется слабо.

Личные карьерные риски ВА, связанные с его профессиональной деятельностью, включают: лишение материальных поощрений; административные наказания; увольнение из МУ; судебные разбирательства и пр.

Риски для МУ в отношении МОА – это, в основном, претензии со стороны пациентов и их родственников; требования материальной компенсации «ущерба», который, по их мнению, был нанесен в процессе ХО. Однако, в большей степени, вред для МУ может определяться «репутационным ущербом» организации с позиций массового восприятия, особенно при тенденциозной подаче информации в СМИ и Интернете.

Анализ возможных моделей принятия решений, связанных с ХО

Мы рассмотрим модели принятия решений, в основном, с позиций пациентов, оговорив отличия в моделях для врачей-хирургов и ВА.

Психологически отдаленные по времени риски воспринимаются как менее значимые (вероятные). Это соответствует замене (2) не на (3), а на

$$R^{**} = \sum_{v=1}^I ((P_v * U_v) / (\alpha_v + \beta_v \Delta_v)), \quad (9)$$

где R^{**} – субъективная оценка СВР; $\alpha_v; \beta_v$ – ненулевые коэффициенты; Δ_v – время для v -го вида риска между моментом его оценки и вероятным моментом реализации. В простейшем случае можно принять: $\alpha_v = \alpha_*$; $\beta_v = \beta_*$. Если для дискретных моментов времени в количестве M_v , в которые возможны реализации v -го вида риска $\{t_i\}_{i=1...M_v}$, известны наборы вероятностей $\{w_{i,j}\}_{i=1...M_v}$, то для Δ_v в (9) можно принять

$$\Delta_v = \sum_{i=1}^{M_v} (w_{i,v} t_{i,v}); \quad \sum_{i=1}^{M_v} w_{i,v} = 1. \quad (10)$$

Необходимое условие ПР о ХО с позиций пациентов (и врачей) – оценка суммы положительных и отрицательных эффектов от операции ($\Psi^{(+)}$) больше, чем аналогичная сумма при отказе от ХО ($\Psi^{(-)}$), то есть

$$\Psi^{(+)} > \Psi^{(-)} \quad (11)$$

$$\Psi^{(+)} = \sum_{i=1}^{A_+^{(+)}} \mu_i^{(+)} E_i^{(+)} - \sum_{i=1}^{A_-^{(+)}} D_i^{(+)} - \sum_{i=1}^{I^{(+)}} R_i^{(+)} \quad (12)$$

$$\Psi^{(-)} = \sum_{i=1}^{A_+^{(-)}} \mu_i^{(-)} E_i^{(-)} - \sum_{i=1}^{A_-^{(-)}} D_i^{(-)} - \sum_{i=1}^{I^{(-)}} R_i^{(-)}, \quad (13)$$

где $A_+^{(+)}; A_-^{(+)}; I^{(+)}$ – количество положительных, детерминированных отрицательных эффектов и вероятностных отрицательных эффектов (рисков) при ПР о ХО; $A_+^{(-)}; A_-^{(-)}; I^{(-)}$ – аналогичные величины при отрицательном решении о ХО; $\{\mu_i^{(+)}\}_{i=1...A_+^{(+)}}; \{D_i^{(+)}\}_{i=1...A_-^{(+)}}; \{R_i^{(+)}\}_{i=1...I^{(+)}}$ – абсолютные величины положительных, детерминированных отрицательных эффектов, рисков при ПР о ХО; $\{E_i^{(-)}\}_{i=1...A_+^{(-)}}; \{D_i^{(-)}\}_{i=1...A_-^{(-)}}; \{R_i^{(-)}\}_{i=1...I^{(-)}}$ – аналогичные величины при отрицательном решении о ХО; $\{\mu_i^{(+)}\}_{i=1...A_+^{(+)}}; \{\mu_i^{(-)}\}_{i=1...A_+^{(-)}}$ – вероятности положительных эффектов (ПЭ) при, соответственно, положительном и отрицательном решении о ХО. К ПЭ можно отнести: улучшение (сохранение) качества жизни пациента; обеспечение его трудоспособности; увеличение длительности жизни и пр. К детерминированным отрицательным эффектам отнесем затраты на ХО, а также те их последствия, которых нельзя избежать. Вектора рисков $\{R_i^{(+)}\}; \{R_i^{(-)}\}$ в (11) предполагаются оцененными по формулам типа (3). Дополнительное необходимое условие ПР о ХО – ограничение суммарных рисков величиной ϕ_0 :

$$\sum_{i=1}^{I^{(+)}} R_i^{(+)} \leq \phi_0 \quad (14)$$

и/или рисков для отдельных компонент ХО:

$$\{R_i^{(+)} \leq R_i^{(*)}\}_{i=1...I^{(+)}} \quad (15)$$

где $\{R_i^{(*)}\}_{i=1...I^{(+)}}$ – некоторые предельные риски для компонент, зависящие от возраста пациента, его физического состояния и пр.

Кроме того, должны быть ограничены суммарные затраты на МОА

$$Z^{(SUM)} \leq Z^{(PRED)}; \quad Z^{(SUM)} = \sum_{i=1}^{I^{(Z+)}} Z_i^{(+)}, \quad (16)$$

где $Z^{(SUM)}$ – прогнозное значение величины суммарных затрат на ХО; $Z^{(PRED)}$ – предельное значение затрат; $I^{(Z+)}$ – количество видов затрат, включая затраты на препараты и медицинские газы для МОА; $Z_i^{(+)}$ – оценка величины затрат i -го вида. Помимо (16) иногда приходится учитывать и суммарное ограничение для затрат по всем планируемым в МУ ХО.

В качестве достаточного условия ПР о ХО может рассматриваться

$$\left\| \Psi^{(+)} - \Psi^{(-)} \right\| = \Phi_1 \geq \Phi_1 \quad (17)$$

(где Φ_1 – пороговая величина «абсолютной полезности» ХО) или

$$\begin{aligned} \Phi_1 / \Phi_2 = \Phi_2 \geq \Phi_2; \quad \Phi_1 &= \left\| \Psi^{(+)} - \Psi^{(-)} \right\|; \\ \Phi_2 &= \left\| \Psi^{(+)} + \Psi^{(-)} \right\| / 2; \end{aligned} \quad (18)$$

здесь Φ_2 – пороговая величина «относительной полезности». Отметим, что отказ от ХО может осуществляться в пользу не «отсутствия действий вообще», а терапевтических методов лечения, в том числе и «консервативных».

Для ВА по ходу ХО: выбор решений носит поливариантный характер; он может производиться исходя из максимума оценки Φ_1 , Φ_2 или какой-то их комбинации; отказ ВА от изменения режима (схемы) ввода препаратов или иных действий может рассматриваться как нулевой вариант выбора; психологические риски отказа от действий могут восприниматься как менее значимые, чем риски выполнения действий.

В процессе ХО ВА в своих решениях учитывает оценку накопленных «негативных последствий» (НП) от начала МОА до текущего момента времени. Эти НП могут быть как заранее предопределенными, так и носить характер «реализации рисков». Объем накопленных НП (Y_{NP}) влияет на политику ВА по «управлению рисками», в том числе на ограничение рисков действий исходя из формул типа (14), (15).

С позиций ВА интегральная априорная оценка «рискованности ХО в целом» ($R^{(PI)}$) может быть дана и иначе – с учетом длительности периода МОА и изменения ВР в процессе операции:

$$R^{(PI)} = \int_0^{t_{oper}} R(t) dt, \quad (19)$$

где $R(t)$ – мгновенные оценки изменяющихся СВР, включая риски имеющие задержки по времени. Формула (19) полезна также для оценки интеллектуально-психофизиологической нагрузки на ВА при МОА и может быть использована и при ретроспективном анализе действий ВА после окончания ХО. В идеале ВА должен распределять свои «располагаемые психофизиологические ресурсы» не просто пропорционально $R(t)$, но еще и сохранять некоторый «резерв» на случай возникновения

«нештатных» ситуаций, затягивания операции сверх планировавшегося времени и пр.

Альтернативный к (19) подход – риск МОА ($R^{(PM)}$) – оценивается по

$$R^{(PM)} = \max_{t=0 \dots t_{oper}} (R(t)), \quad (20)$$

т. е. по наиболее «рискованному моменту» в процессе МОА.

Итак, сделаем в ы в о д ы :

1) при проведении МОА имеются различные виды рисков для пациентов, медработников, МУ;

2) для оценки целесообразности ХО эти риски обычно должны суммироваться;

3) выбор технологий МОА и управление рисками фактически являются медико-экономической задачей, так как снижение рисков достигается чаще всего увеличением затрат;

4) задача оптимального распределения затрат по «направлениям снижения рисков при МОА для ХО» нуждается в дальнейшем анализе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анестезиология и реаниматология / под ред. О. А. Долиной. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006 – 576 с.
2. Брумштейн, Ю. М. Анализ методов исследования процессов, описываемых взаимосвязанными временными рядами / Ю. М. Брумштейн, М. В. Иванова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 10). – С. 45–51.
3. Голубятникова, М. В. Применение алгоритма выбора оптимального технологического режима при нечетко выраженных экспертных оценках / М. В. Голубятникова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 (71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 9). – С. 125–129.
4. Долматов, А. С. Математические модели риск-менеджмента / А. С. Долматов. – М.: Экзамен, 2007. – 319 с.
5. Программно-управляемая инфузия препаратов («FM- controller») для поддержания внутривенной анестезии / И. А. Козлов, С. В. Воронин, Т. А. Виткалова, Д. В. Вершута // Вестник интенсивной терапии. – 2004. – № 5. – С. 41–42.
6. ИЦК и автоматизированная система анестезии на основе дипривана [Электронный ресурс] / В. В. Лихванцев [и др.] // Вестник интенсивной терапии. – 2000. – № 3. – Режим доступа : <http://medi.ru/doc/8100302.htm>
7. Наркоз [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://med-lib.ru/referat/anest/8.php>
8. Санжапов, Б. Х. Модель принятия решений на основе многокритериальной оценки объектов в виде нечетких распределений / Б. Х. Санжапов, И. С. Калина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 78–82.

9. Сокологорский, С. В. Мониторно-компьютерное обеспечение безопасности анестезии при абдоминальных вмешательствах в акушерско-гинекологической клинике : дис. ... д-ра мед. наук / С. В. Сокологорский. – М., 2003. – 226 с.

10. Система поддержания оптимального уровня гемодинамических параметров пациента при хирургическом вмешательстве : П. м. 143701 / В. М. Соколовский. – 12. 01. 2011.

11. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

12. Электронные медкарты станут повседневностью для россиян через 5 лет. (16.03.2010) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.minzdravsoc.ru/health/it/10>

13. McSleepy: Automated Anesthesia System. 6.05.2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://medgadget.com/2008/05/mcsleepy_automated_anesthesia_system.html

14. Lemos J. M., Roma N., Mendonça T., Sousa L., Costa B., Nunes C. S., Esteves S., Amorim P., Antunes L. Development of an integrated control system for anaesthesia automation [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.inesc-id.pt/pt/indicadores/Ficheiros/5>

УДК 519:681

Г. И. Брызгалин

ОЦЕНОЧНЫЙ ВЗГЛЯД НА ФУНКЦИИ ЛОГИКИ ВЫСКАЗЫВАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

maginc@inbox.ru

Рассматриваются проблемы оценочного подхода к прикладным ситуациям логики высказываний в историческом плане и в связи с современными задачами экспертной деятельности и математического образования инженера. Обсуждается определяющая роль естественного языка в задачах оценочного анализа на примере функций типа логического следования.

Ключевые слова: инженерное дело, подготовка решений, экспертная оценка, логическое следование, импликация, естественный язык.

G. I. Bryzgalin

EVALUATION APPROACH TO LOGICAL FUNCTIONS

Volgograd State Technical University

The problems of evaluation approach to logical functions in engineering and mathematical education for engineer are discussing on an example of one terminological question.

Keywords: engineering, decision-making, expert evaluation, logical functions, implication, natural language.

1. Неопределенности и оценки в инженерном деле

Методы моделирования систем в ситуациях высокой неопределенности, представляющие интерес для инженера, не всегда соответствуют принятым нормам математической строгости, что сказывается на качестве инженерных разработок. Как справедливо отмечено авторами [1], «... необходимость рефлексии над основаниями знания возникает тогда, когда обнаруживаются симптомы неблагополучия в теории – контр-примеры, парадоксы, неразрешимые задачи». Математическая логика пережила подобно рода рефлексии к середине 20 века, однако в области приложений и инженерного образования интерес к этим вопросам сохраняет актуальность и в настоящее время. Разнообразие и многоплановость неопределенностей в поступающих сведениях и процессах обработки данных вынуждает тех, кто имеет дело с подготовкой принятия решений, особо ответственно относиться к определенности смысла исполь-

зуемых терминов, чтобы обеспечивать необходимый уровень ясности понимания и достоверности предлагаемых рекомендаций.

Согласно тезису Ю. И. Журавлёва: «задача состоит в том, чтобы, признав как реальность существование и пользу для практики процедур решения плохо формализованных задач, изучить с помощью строгих математических методов само множество таких процедур» [2]. Эту фундаментальную «задачу», по существу, можно принять как программную установку для продвижения в ее решении со стороны математиков. С другой стороны, неопределенности методологического плана, касающиеся смысла корневых понятий, куда их ни отнеси – к философии, системному анализу или метаматематике – строгими математическими методами не раскроешь.

«...предприятия нефтехимического комплекса, начиная с 2005 г., существенно увеличили объемы финансирования строительства новых и реконструкции действующих устано-

вок. Однако сложившаяся обстановка в стране и мире такова, что ни одна из крупнейших нефтяных компаний даже при серьезной государственной поддержке не в состоянии обновить парк оборудования столь кардинально, как это делалось, например, в 60–70-е годы прошлого века...» [3]. Необходимость эксплуатации все более стареющего оборудования повлекла разработку методов оперативной диагностики текущего состояния ответственного изделия после выработки им проектного ресурса, с последующим мониторингом и оценками работоспособности по комплексу критериев качества текущего состояния.

«Вхождение в информационное пространство связано с оценкой имеющейся информации с точки зрения ее полноты, достоверности и значимости для решения поставленной задачи, а также построения информационной модели, отражающей структуру и состояние объекта относительно достижения желаемой цели в пространстве контролируемых и наблюдаемых факторов» [4]. «При этом изучение показателей качества должно подчиняться основной концепции логико-лингвистического подхода: изучать характеристики в реальных условиях, со всеми беспорядками, противоречиями и алогичностями... Первоначально выделяется группа качественных показателей, существенных с точки зрения принятия решения и перечисляются их *возможные лингвистические значения*... Среди таких значений могут оказаться как *допустимые*, так и *недопустимые*. К недопустимым высказываниям относятся либо не имеющие смысла при решении проблемы повышения качества, либо нецелесообразные для нее. *Все остальные высказывания относятся к допустимым и образуют в совокупности базу предметных знаний*» [5]. Естественно, что этот процесс заканчивается *оценкой* степени удовлетворения предпочтений ответственного лица достигнутым целевым результатом.

Как видим, применение логических схем в теории и практике инженерных экспертиз и подготовки принятия решений исходит из молчаливого предположения о, скажем так, «естественном праве» исследователя на собственную, внешнюю по отношению к тексту, в который включено рассматриваемое высказывание, оценку его истинности или допустимости. Это может относиться как к высказываниям – аргументам логических функций, так и к самим функциям, когда обстановка требует подбора

подходящих значений истинности для заданных аргументов.

Изменения, произошедшие в структуре мирового промышленного производства за последние десятилетия, требуют особого внимания к вопросам методологии применения математической логики в оценочной инженерной деятельности.

2. Из истории оценочного подхода в логике

Согласно [6], этика французского логика и философа Пьера Абиляра (1079–1142) «предполагает, что должное и не должное предстоят выбору, а потому доступны разумному осмыслению и оценке». Из исследования Н. И. Стяжкина «Формирование математической логики» [7]: «Абиляр... определяет логику как науку об оценке и различении аргументов по их истинности и ложности... Видное место в логическом наследии Абиляра занимает обсуждение проблемы универсалий (т. е. вопроса о природе общих понятий)... Универсалия не может быть вещью. С другой стороны, универсалия не может быть сведена и к словесной оболочке, так как слово само по себе сингулярно (единично). Поэтому универсалия, во всяком случае, не только слово. Таким образом, продолжает Абиляр, природа общего кроется не в вещах и не в словах, а в значениях соответствующих речей. Он пытался подчеркнуть, прежде всего, в универсалиях их семантическую сторону, т. е. отношение знаков универсалий к обозначаемым ими объектам».

Там же отмечается, что проблемой оценки истинности суждений в 13 веке занимался также учитель Фомы Аквинского Альберт фон Больштедт: «Лишь для узкого класса суждений восприятия согласен допустить он в качестве истинностного критерия опытную проверку... он выставляет субъективистское требование о всеобщем согласии, как якобы надежном гаранте верности высказывания».

Вряд ли необходимо какое-то объяснение, что и понимание «*значения соответствующих речей*» по Абиляру, и достижение «*всеобщего согласия*» по Больштедту – при всей их неизбежной субъективности – суть нечто, неотделимое от процесса познания и выражаемое в достаточной полноте именно на *естественном языке*. Отсюда следует, что средства познания – научные понятия, модели и теории – с необходимостью подлежат анализу, оценке и совершенствованию на этом же языке.

«Существенное различие между логикой и алгеброй, по Булю, состоит в том, что в первой всегда имеет место закон $xx=x$ (принцип идемпотентности), в то время как во второй равенство $x^2=x$ оказывается верным лишь при значениях $x=1$ или $x=0$, являющихся корнями уравнения $x^2-x=0$. Отправляясь отсюда, Буль замечает: «Представим себе алгебру, в которой символы допускают различные значения 0 и 1, но только эти значения. Законы, аксиомы и преобразования в такой алгебре будут тождественны во всем объеме с законами, аксиомами и преобразованиями алгебры логики... Мы можем, – пишет Буль, – фактически пренебречь логической интерпретацией символов в заданном логическом уравнении: превратить их в *количественные знаки*, допускающие лишь значения 0 и 1; преобразовать их в качестве таковых посредством допустимых процессов решения и, наконец, восстановить их действительное логическое значение в конечном результате» [7].

Как видим, Джордж Буль (1815–1864) предельно ясно демонстрирует свою ключевую идею, раскрывая причину парадоксального совпадения между формальными схемами алгебры и логики, а также вводит *четкие количественные оценки* значений логических переменных. Это замечательное открытие в определенной мере реализует идею Лейбница «сводить все к числам»: «единственное средство улучшить наши умозаключения, – пишет он, – сделать их, как и у математиков, наглядными, так чтобы свои ошибки находить глазами» [7]. «Правда, надежды Лейбница построить универсальную характеристику теперь в свете результатов Геделя признаются несбыточными, однако методы решения логических уравнений, начало которым положил Буль, существуют... и было бы невосполнимым упущением не позаботиться об их надлежащей компьютеризации» [8].

Представленное в [9] усеченное пространство булевых векторов, координаты которых (так же, как и скалярные множители при векторах этого пространства) принимают свои значения на множестве $\{0, 1\}$, очевидным образом выявляет изоморфизм логического и алгебраического представлений. Булева алгебра положена, как известно, и в основу аксиоматики теории вероятностей. Оценочное родство этих двух теорий было отмечено Ф. Козловским (цитата и ссылка по книге [7]): «... в частном случае, если вероятность фактов равна 0 или 1,

теория вероятностей переходит в теорию достоверности; анализом же достоверных, т. е. логически необходимых фактов, и занимается формальная логика». «Киевские университетские известия», 1887, № 1,2).

Формальные исчисления современной математической логики послужили основанием колоссальных успехов кибернетики и компьютерных технологий. Тем не менее, представляется очевидным, что создание *единого логически правильного языка*, на котором математики могли бы свободно развивать свою науку, не впадая в противоречия, разночтения и парадоксы и не особо заботясь о его совместимости с естественным языком, – *задача принципиально неосуществимая*. Высокоразвитый естественный язык остается незаменимым универсальным средством как для развития отдельных наук, включая математику и логику, так и для решения междисциплинарных проблем, таких как математическое образование инженера.

3. О логических функциях, определяемых высказываниями « $X \Rightarrow Y$ »

В книге [11, с. 18] дано следующее определение: «Двойная односторонняя стрелка используется при указании на последствия некоторого факта, это символ импликации, или логического следствия, который можно читать «влечет» или «имеет следствием» и т. д. Таким образом, $A \subset B$ и $B \subset C \Rightarrow A \subset C$ можно читать: отношения включения $A \subset B$ и $B \subset C$ имеют следствием отношение $A \subset C$ ».

Составим таблицу значений истинности для аргументов и функции логического следствия $f(X, Y)$, которую определим на основе цитаты из [11]. Эта функция зависит от двух логических аргументов X и Y и определяется операцией $X \Rightarrow Y$ при условии, что аргумент X может принимать только значение 1 (т. е. истинно), поскольку в процитированном определении, первый аргумент понимается как «*некоторый факт*». По этому определению, если X истинно и Y тоже истинно, то высказывание $f(X, Y)$ имеет значение истинности 1, что и отражено первой выходной строкой табл. 1.

Если же факт истинности X сопровождается ложностью Y , т. е. эти высказывания-аргументы получают, соответственно, значения 1 и 0, то высказывание-функция $f(X, Y)$ должно на этой паре аргументов принять значение 0 (ложно), поскольку выполнение условия X не сопровождается выполнением условия Y .

Таблица 1

Определение функции
логического следствия $f(X,Y)$

X	Y	$X \Rightarrow Y$
1	1	1
1	0	0

Таким образом, приходим к логической функции $f(X, Y)$, осуществляющей операцию $X \Rightarrow Y$, которая имеет областью определения множество пар значений своих аргументов $\{(1,1), (1,0)\}$. Эта функция, представленная табл. 1, формализует типичные рассуждения общематематических текстов, когда посылка X , которая *мыслится выполненной*, влечет следствие Y .

Далее, следуя [2], будем четко различать *частичные логические функции* $f_k(A,B)$, определяемые на той или иной собственной части множества пар значений аргументов $\{(1,1), (1,0), (0,1), (0,0)\}$, и *полные логические функции* $F_i(A,B)$, определенные на всем этом множестве.

Для четырех из шестнадцати логических функций двух аргументов построим табл. 2 полных функций, значения которых для первых двух пар значений аргументов тождественно повторяют значения функции $f(A,B)$ из табл. 1, а для второй пары значений аргументов произведен перебор всех возможных пар значений этих функций, не совпадающих между собой. Входная строка этой таблицы отражает пары операций логического следования, которые могут служить определениями соответствующих им полных логических функций. При этом имеется в виду, что истинности взаимно противоположных высказываний A и A' определяются условием: если $A=0$, то $A'=1$ и наоборот. Символ **И** обозначает тождественно истинное высказывание, а символ **Л** – тождественно ложное.

Таблица 2

Полные логические функции типа $X \Rightarrow Y$
плюс импликация $A' \rightarrow B'$

A	B	$A \Rightarrow B$ $A' \Rightarrow И$	$A \Rightarrow B$ $A' \Rightarrow B$	$A \Rightarrow B$ $A' \Rightarrow B$	$A \Rightarrow B$ $A' \Rightarrow Л$	$A' \rightarrow B'$
1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	1
0	1	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1

В литературе по математической логике преобладает расширенное толкование утверждения « A влечет B », которое выражается здесь парой условий: $A \Rightarrow B$, $A' \Rightarrow И$, чем определяется полная функция, представленная в первом выходном столбце табл. 2 и соответствующая операции, называемой *импликацией*, которую здесь, как обычно принято, будем обозначать $A \rightarrow B$.

Поскольку количественное значение истинности высказывания A для первых двух выходных строк табл. 1 получило оценку 1, то все четыре частичные логические функции на значениях аргументов, представленных только в этих первых строках, должны выражаться формулой $A \Rightarrow B$ (A влечет B). Для двух последних строк таблицы высказывание A получило оценку истинности 0, но тогда высказывание A' (т. е. **не** A) с необходимостью должно получить оценку 1, «истинно», и потому может рассматриваться как *факт*. На этом основании каждой паре значений аргументов *второй (нижней) части* табл. 2 явно приписано условие « A' влечет ...» в качестве дополнительного признака, характеризующего логические функции на второй паре значений их аргументов, а четверка полных логических функций этой таблицы может быть названа «*функции типа логического следования $X \Rightarrow Y$* ».

Для демонстрации того, что смыслы понятий «*следования из факта* ($A \Rightarrow B$) и *импликации* ($A \rightarrow B$) не только могут не совпадать, но и быть противопоставлены друг другу; в табл. 2 представлен пятый выходной столбец. Сопоставляя его с третьим выходным столбцом, замечаем, что они задают *разные логические функции*, хотя в одном из них выполняется условие $A' \Rightarrow B'$, а в другом $A' \rightarrow B'$. Называемую *импликацией* операцию $A \rightarrow B$ имеет смысл четко выражать словами « A имплицирует B », тогда как выражение « A влечет B » ($A \Rightarrow B$) целесообразно толковать именно как «истинность A влечет истинность B », или « $A \rightarrow B$ с выполненным A » [2]. Разумеется, существуют ситуации, адекватно описываемые любой полной логической функцией типа $A \Rightarrow B$, но они различаются в том, что же влечет **не** A .

Рассмотренные неточности, если исходить из правил русского языка, в выборе терминов логики высказываний сложились исторически и, несомненно, известны профессионалам. Они вошли в научный и учебный обиход, так что кажутся имеющими чисто формальный термин-

нологический интерес. Тем не менее, особенно если иметь в виду учебную литературу для инженеров, неоднозначное использование термина (нередко в рамках одного текста) не только затрудняет освоение предмета, но разрушает подсознательные природные стереотипы мышления учащегося.

Заключение

Абстрактный номиналистический подход к выбору терминов, допустимый при решении задач логистики, скажем, электротехнического содержания с четко определяемым состоянием переключателей, теряет адекватность в ситуациях, требующих разностороннего системного осмысления [12–15].

Необходимость особого внимания к тонкостям естественного языка становится особо актуальной в связи с ростом значимости, расширением круга областей экспертного оценивания и влиянием этой проблематики на качество инженерного образования.

С другой стороны, и естественный язык может совершенствоваться посредством логической и иной профессиональной деятельности, но такое внешнее воздействие на него будет благотворным *только при соблюдении его собственных писаных и неписаных законов*. Последнее условие явно нарушается при отождествлении понятий логического следования и импликации.

Осознание оценочного характера количественных данных, используемых инженером, не может не влиять на формы подачи соответствующего учебного материала, усиливая его индуктивные и системные акценты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кураев, В. И. Точность, истина и рост научного знания / В. И. Кураев, Ф. И. Лазарев. – М.: Наука, 1988.
2. Журавлев, Ю. И. Избранные научные труды / Ю. И. Журавлев. – М.: Магистр, 1998.
3. Эльманович, В. И. Дифференциальная диагностика технологического оборудования нефтеперерабатывающе-

го предприятия / В. И. Эльманович // Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение. – 2009. – № 5.

4. Ивашкин, Ю. А. Агентные технологии принятия решения в условиях конфликта / Ю. А. Ивашкин // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Теория конфликта и ее приложения». – Воронеж, 2002.

5. Гавшина, Е. В. Основные этапы поиска решений повышения качества пищевых продуктов / Е. В. Гавшина, Ю. С. Сербулов // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции «Теория конфликта и ее приложения». – Воронеж, 2002.

6. Философский энциклопедический словарь / гл. ред. Л. Ф. Ильичев, П. Н. Федосеев, С. М. Ковалев, В. Г. Панов. – М.: Советская энциклопедия, 1983.

7. Стяжкин, Н. И. Формирование математической логики / Н. И. Стяжкин. – М.: Наука, 1967.

8. Брусенцов, Н. П. Компьютеризация булевой алгебры / Н. П. Брусенцов, Ю. С. Владимирова // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 395. – № 1. – С. 7–10.

9. Брызгалин, Г. И. Оценочные структуры на булевых алгебрах / Г. И. Брызгалин // Справочник. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение, 2010. – № 11.

10. Успенский, В. А. Теорема Гёделя о неполноте / В. А. Успенский. – М.: Наука, гл. редакция физ.-мат. литературы, 1982.

11. Фор, Р. Современная математика / Р. Фор, А. Кофман, М. Дени-Пален; пер. с франц. Е. В. Гайдукера и Н. Н. Родман под ред. А. Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1966.

12. Заболеева-Зотова, А. В. Представление модели технической системы как нечеткой решетки / А. В. Заболеева-Зотова, М. В. Набокова // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии»). – С. 34–35.

13. Бутенко, Л. Н. Концепция автоматизированной поддержки технических решений / Л. Н. Бутенко, Е. Н. Шамина, М. В. Бутенко // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 8 (46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 62–64.

14. Петрухин, А. В. Принятие технологических решений в литейном производстве с использованием интегрированной экспертной системы / А. В. Петрухин, В. К. Агеев, Ю. Ф. Воронин // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии»). – С. 64–65.

15. Дворянкин, А. М. Осуществление индуктивного вывода на исчислении отношений множеств / А. М. Дворянкин, О. А. Сычев // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии»). – С. 29–32.

УДК 62-272.5:681.5.512.2.011.056

*Ю. В. Кандырин, А. Д. Чивилев***МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА
МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН****Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва**ywk@mail.ru, 4ibis-88@mail.ru.

Рассматривается решение задачи выбора оптимального варианта механического привода, применительно к полноповоротным зеркальным параболическим антеннам. Приведен алгоритм выбора, необходимый для последующего создания САПР механических приводов АУ РЭС.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, механический привод, антенна, САПР, критерий Парето, частичный порядок.

*Y. V. Kandyrin, A. D. Chivilyov***AUTOMATED METHOD OF MECHANICAL DRIVE MULTICRITERIA
SELECTION REFLECTOR ANTENNAS****National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow**

This paper addresses the problem of solving the problem of optimal variants of mechanical-drive, full-circle with respect to the parabolic mirror antennas. An algorithm for the calculation required for the subsequent creation of CAD mechanical drives AU RECs.

Keywords: multi-criteria selection, mechanical drive, antenna, CAD, the Pareto criterion, partial order.

Введение

Антенны являются обязательным элементом любой системы радиосвязи, радиовещания, телевидения, а также других радиотехнических систем, использующих для передачи информации свободное распространение электромагнитных волн. Основной задачей современных антенных устройств (АУ) является обеспечение передачи сигнала высокого качества на требуемое расстояние. Поэтому направленность АУ является одной из ее важнейших характеристик.

Диаграмма направленности АУ зависит от конструкции антенны. Используя антенны с различными диаграммами направленности, можно повысить дальность и качество связи. Задание требуемого местоположения центрального лепестка зеркальных антенн осуществляется посредством механических систем. От точности наведения зависят все основные электрические и энергетические характеристики АУ. Отсюда – актуальность и важность задач разработки инструментария САПР механических систем управления АУ, которые и рассмотрены в данной работе.

На практике наиболее часто для приема (передачи) сигнала от перемещающихся в пространстве объектов применяют зеркальные антенны. Для нормального функционирования их необходимо оснастить механическим приводом, способным перемещать зеркало АУ, для наведения антенны с требуемой точностью.

Тип привода зависит от способа передачи движения: *с помощью механических узлов, различных пневматических и гидравлических приспособлений, при помощи электричества* и др. Наибольшее распространение сегодня среди передач движения от двигателя к рабочим узлам антенны получили механические передачи.

Оптимизация построения системы механического привода в целом может быть осуществлена на основе многовариантного синтеза с последующим выбором оптимального варианта структурно-параметрического построения, при котором обеспечивается наибольшая эффективность системы в принятом смысле.

Под *эффективностью* обычно понимается степень соответствия системы своему назначению. Отметим, что понятие эффективности – субъективное понятие, отражающее представление проектировщика (заказчика) о качестве системы [1].

В работе рассматриваются вопросы назначения характеристик механических передач, используемых в качестве совокупности показателей качества $\{PK_i\}$. В зависимости от функционального назначения соединения, устанавливается их приоритет, а также решаются задачи формирования критериев и построения алгоритмов и программ автоматизированного выбора предпочтительного типа механической передачи. В качестве примера рассматривается механический привод зеркальной полноповоротной антенны.

Типы механических передач

По способу передачи движения от ведущего элемента к ведомому механические передачи подразделяются следующим образом:

- *передачи трением с непосредственным касанием (фрикционные) или с гибкой связью (ременные);*
- *передачи зацеплением с непосредственным контактом (зубчатые, червячные, храповые, кулачковые) или с гибкой связью (цепные).*

В табл. 1 приведены основные характеристики различных передач приводов, при этом приняты следующие обозначения: v – скорость [м/с]; m/P – удельная масса [кг/кВт] в интервалах мощностей от 10 ÷ 100 кВт и более; δ – относительная ошибка привода, влияющая на точность наведения; α – условный угловой диапазон перемещений узла, обеспечиваемый приводом, для принятого углового интервала.

Каждый вариант системы может описываться набором внешних характеристик, условно подразделяемых на показатели качества, условия и ограничения [1]. Такое условное разбиение на $\{Y\}$, $\{O\}$ и $\{PK\}$ необходимо для

поиска оптимального решения в конкретно поставленной задаче.

Значения характеристик для каждого типа передачи заданы как в абсолютных размерных v_{max} , (m/P), так и в относительных единицах δ , C .

Область допустимых значений

По данным табл. 1 можно сделать вывод, что существует несколько способов передачи механической энергии, причем каждый из приведенных в таблице еще, в свою очередь, подразделяется на различное множество подтипов. Например, *зубчатые цилиндрические* различаются по типу зубьев, углу наклона зубьев, своим габаритам, способу зацепления, материалу и т. д.

Техническое задание (ТЗ) позволяет сократить пространство всех известных типов передачи до некоторой допустимой области, удовлетворяющей набором условий $\{Y\}$ и ограничений $\{O\}$, а также произвести выбор нехудших или лучших вариантов по принятому ЛПР критерию для назначенной им совокупности показателей качества $\{PK\}$, представленных в ТЗ.

Таблица 1

Технические характеристики механических передач

Тип передачи	Внешние характеристики механических приводов АУ				
	Условия, ограничения $\{Y, O\}$			Показатели качества $\{PK\}$	
	α	v_{max} , [м/с]	m/P , [кг/кВт]	δ	C - стоимость
	=	$\geq$	$\leq$	$\downarrow$	$\downarrow$
Зубчатая цилиндрическая	Не ограничен	100	1,8	3	1
Зубчатая коническая	Не ограничен	50	2,5	1,5	2,2
Червячная	Не ограничен	25	4,5	3,5	1,6
Планетарная	Не ограничен	70	1	2	1,6
Ременная	$90 \pm 10^\circ$	40	5	5,5	0,6
Цепная	$90 \pm 10^\circ$	35	3,5	3	0,35
Винт – гайка скольжения	$90 \pm 10^\circ$	15	3	2,5	0,8
Винт – гайка качения	$90 \pm 10^\circ$	20	3,5	1	2

Основные характеристики ТЗ, достаточные для начала работ по проектированию механического привода антенной системы (АС), следующие:

- 1) количество осей перемещения зеркальной системы (число приводов);
- 2) диапазон перемещения, учитывающий возможность применения того или иного типа привода;

- 3) точность наведения АС, определяемая допустимыми погрешностями наведения для каждого узла;

- 4) необходимые скорости наведения АС;

- 5) наличие специальных требований, например, переход зеркала через зенит.

Анализ ТЗ позволяет определить область допустимых значений характеристик для выбора типа привода, а также задать совокупность

ПК и критерии, которые должны формировать решения в процессе синтеза приводного механизма антенной системы.

Решение задачи выбора по принятым критериям для совокупности ПК

Проектный многокритериальный выбор (МКВ) является сложной многомерной комбинаторной задачей, которую целесообразно решать по частям. Первый этап ее решения – формирование целевого набора $\{ПК_i\}$ и назначение формализованного критерия предпочтения. При этом, в каждой конкретной задаче,

часть характеристик необходимо отнести к $\{ПК_i\}$, а часть – к условиям и ограничениям $\{У, О\}$. Для сравнительного анализа и выбора типа механической передачи можно использовать безусловные и/или условные критерии предпочтения (табл. 2). Выбор того или иного критерия предпочтения зависит от степени информированности конструктора о поставленной проблеме. При слабой информированности целесообразно использовать безусловные π или S -критерии предпочтения, а при более полном понимании тонкостей задачи – условные L -критерии, или интегральные Σ , P -свертки.

Таблица 2

Возможные критерии предпочтения при выборе механических приводов АУ

Критерии предпочтения	БКП	Критерий Парето	Вариант ω_i предпочтительнее варианта ω_j , если среди множества k_l при их бинарном сравнении (для минимизации) по правилу $k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j); \forall l=\{1, M\}; i \neq j; i, j=\{1, N\}$ среди нестрогих неравенств найдется хотя бы одно строгое
	УКП	L -критерий	В условном критерии предпочтения используется назначаемый ЛПП приоритет показателей качества $\langle k_1, k_2, \dots, k_M \rangle$. При этом если $k_1(\omega_i) < k_1(\omega_j)$ / то $\omega_i > \omega_j$, $k_1(\omega_i) = k_1(\omega_j), k_2(\omega_i) < k_2(\omega_j)$ / то $\omega_i > \omega_j$, $k_t(\omega_i) = k_t(\omega_j), k_{t+1}(\omega_i) < k_{t+1}(\omega_j)$ / то $\omega_i > \omega_j$, $K_t(\omega_i) = k_t(\omega_j), t=[1 - (M-1) k_M(\omega_i) < k_M(\omega_j)]$ / то $\omega_i > \omega_j$,
		Σ, P -свертки	$F^1 = \sum_{l=1}^M a_l k_l(\omega_i) = \min; / \sum_{l=1}^M a_l = 1, a_l \geq 0, l=\{1, M\}, \forall l=\{1, M\}$ $F^{11} = \prod_{l=1}^M k_l(\omega_i)^{\alpha_l} = \min; / \sum_{l=1}^M \alpha_l = 1, \alpha_l \geq 0, l=\{1, M\}, \forall l=\{1, M\}$

Исходя из онтологических (сущностных) предпосылок задачи выбора структуры механического привода, и с учетом табл. 1, введем следующее условное подразделение внешних характеристик:

- *условия*. Описываются отношением $R_y = \{=, \neq, \approx\}$. Условием является α – условный угловой диапазон перемещений узла. Для каждого перемещаемого узла антенны задается диапазон углов, в котором необходимо обеспечить требуемое по ТЗ перемещение. Например, диапазон перемещений по азимуту $\pm 270^\circ$, а по углу места от 0 до 180° (это – условие для полноповоротной антенны), что означает $\alpha_{Az} = 270^\circ$, $\alpha_{УМ} = 180^\circ$. При $\alpha > 90^\circ$ становится невозможным использование ряда приводов;

- *ограничения*. Описываются отношением $R_O = \{>, < , \geq, \leq\}$. К ним относятся:

$v_{\max} \geq v_{\text{треб}}$ – максимальная скорость перемещения, обеспечиваемая приводом, которая должна быть больше или равна требуемой по ТЗ;

$m/P \leq [m/P]_{\text{ТЗ}}$ – удельная масса привода не должна превышать допустимую по ТЗ

- *показателями качества* при выборе структуры назначим две внешних характеристики, оказывающие существенное влияние на АУ, значение которых требуется минимизировать. Например, привод антенной системы должен обеспечивать минимальную ошибку наведения $\delta \downarrow$ при минимальной стоимости $C \downarrow$.

Сформулируем задачу выбора типа механической передачи АУ.

Необходимо разработать механический привод обеспечивающий поворот зеркальной системы антенны в диапазоне от $\alpha_1 = 0$ до $\alpha_2 = 180^\circ$, при этом скорость перемещения должна быть

не ниже требуемой по ТЗ $[v_{\text{троб}}]_{\text{ТЗ}} = 5$ м/с, а удельная масса не должна превышать допустимую $[m/P]_{\text{ТЗ}}$.

В качестве ПК выберем ошибку δ и стоимость C , которые необходимо минимизировать.

Для начала представим исходные данные по характеристикам в задаче выбора *линейными порядками* в порядке возрастания. Через ω_i обозначены варианты проектного решения. Множество возможных вариантов $\Omega = \{\omega_i\}$, $i = \{1, 8\}$ для табл. 1 представлено в табл. 3.

Рассмотрим формализованный выбор механического привода для исходных данных, приведенных в табл. 3 по *безусловному критерию*

Парето через фактор множества $\Phi_{\Omega}(k_1)$ и $\Phi_{\Omega}(k_2)$ для линейных порядков по ПК.

Для этого на основании табл. 3 построим цепи лексикографии для $\delta = k_1 \downarrow$ и $C = k_2 \downarrow$

$$L(\Omega/k_1(\omega_i)) = \langle \omega_8, \omega_2, \omega_4, \omega_7, \{\omega_1, \omega_6\}, \omega_3, \omega_5 \rangle, \\ \forall i = \{1, 8\};$$

$$L(\Omega/k_2(\omega_i)) = \langle \omega_6, \omega_5, \omega_7, \omega_1, \{\omega_3, \omega_4\}, \omega_8, \omega_2 \rangle, \\ \forall i = \{1, 8\}$$

и соответствующие им реляционные таблицы для транзитивных фактор множеств $\Phi_{\Omega}^T(k_1)$ и $\Phi_{\Omega}^T(k_2)$ (табл. 4, 5) как совокупности окрестностей альтернатив $\{O_i(\omega_i)_{k1}\}$ и $\{O_i(\omega_i)_{k2}\}$.

Таблица 3

Технические характеристики механических передач

Тип передачи		Внешние характеристики механических приводов АУ				
		Условия, ограничения {У, О}			Показатели качества {ПК}	
		α^*	v_{max}	m/P	δ	C - стоимость
		=	$\geq$	$\leq$	$\downarrow$	$\downarrow$
Зубчатая цилиндрическая	ω_1	1	1	2	5	4
Зубчатая коническая	ω_2	1	3	3	2	7
Червячная	ω_3	1	6	6	6	5
Планетарная	ω_4	1	2	1	3	5
Ременная	ω_5	2	4	7	7	2
Цепная	ω_6	2	5	5	5	1
Винт – гайка скольжения	ω_7	2	8	4	4	3
Винт – гайка качения	ω_8	2	7	5	1	6

*1 – диапазон перемещений не ограничен – $\alpha = 360^\circ$; 2 – $\alpha = (90 \pm 10)^\circ$

Таблица 4

Фактор-множество $\Phi_{\Omega}^T(k_1)$

$\Phi_{\Omega}^T(k_1)$	
ω_i	$O_i(\omega_i)_{k1}$
ω_1	$\omega_2; \omega_4; \omega_6; \omega_7; \omega_8$
ω_2	ω_8
ω_3	$\omega_1; \omega_2; \omega_4; \omega_6; \omega_7; \omega_8$
ω_4	$\omega_2; \omega_8$
ω_5	$\omega_1; \omega_2; \omega_3; \omega_4; \omega_6; \omega_7; \omega_8$
ω_6	$\omega_1; \omega_2; \omega_4; \omega_7; \omega_8$
ω_7	$\omega_2; \omega_4; \omega_8$
ω_8	$\emptyset$

Таблица 5

Фактор-множество $\Phi_{\Omega}^T(k_2)$

$\Phi_{\Omega}^T(k_2)$	
ω_i	$O_i(\omega_i)_{k2}$
ω_1	$\omega_5; \omega_6; \omega_7;$
ω_2	$\omega_1; \omega_3; \omega_4; \omega_5; \omega_6; \omega_7; \omega_8$
ω_3	$\omega_1; \omega_4; \omega_5; \omega_6; \omega_7$
ω_4	$\omega_1; \omega_3; \omega_5; \omega_6; \omega_7$
ω_5	ω_6
ω_6	$\emptyset$
ω_7	$\omega_5; \omega_6$
ω_8	$\omega_1; \omega_3; \omega_4; \omega_5; \omega_6; \omega_7$

Известно [4], что полный частичный порядок на Ω в виде фактор-множества для критерия Парето произвольной размерности $\pi(\Omega/\{k_1, \dots, k_l\})$ определяется пересечением ок-

рестностей $O_i(\omega_i)_{kl}$ элементов ω_i фактор множеств $\Phi^T(\Omega/k_1), \dots, \Phi^T(\Omega/k_M)$ более низких порядков $\forall l = \{1, M\}$

$$O_l(\Omega/k_l) \cap \dots \cap O_l(\Omega/k_l) = \{ \{ \omega_j : [k_l(\omega_j) \leq k_l(\omega_i)] \} \wedge \{ \omega_p : [k_2(\omega_p) \leq k_2(\omega_i)] \} \wedge \dots \\ \dots \wedge \{ \omega_q : [k_l(\omega_q) \leq k_l(\omega_i)] \} \}, \omega_{i,j,p,q} \in \Omega \}.$$

Или более компактно для $l \in M$ получим

$$\bigcap_{l=1} O_l(\Omega/k_l) = \bigcap_{l=1} \{ \omega_j : [k_l(\omega_j) \leq k_l(\omega_i)] \wedge [k_l(\omega_s) < k_l(\omega_i)], \forall l \in M, \omega_{j,i,s} \subseteq \Omega \}. \quad (1)$$

Перейдем далее к решению задачи выбора оптимальных по π -критерию вариантов механических приводов АУ при описании фактор-множеств ассоциативными матрицами. Это целесообразно при использовании автоматизированных систем выбора, в которых лучше работать, используя бинарные данные и Булеву алгебру. Для этого, как следует из выражения (1), необходимо реализовать пересечение фактор-множеств всех, назначенных ЛППР, показателей качества. Рассмотрим пересечение столбцов C_{l1} и C_{l2} произвольных ассоциативных матриц (АМ) $A_{l1} \cap A_{l2}$ фактор-множеств.

$$C_{l1} \cap C_{l2} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{pmatrix}_{l1} \cap \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_N \end{pmatrix}_{l2} = \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \dots \\ G_N \end{pmatrix},$$

где $G_i = (B_i)_{l1} \cap (B_i)_{l2}$, $i = \{1, N\}$.

Очевидно, что результат будет аналогичным для всех столбцов ассоциативных матриц A_{l1}, A_{l2} :

$$C_{l1k} \cap C_{l2k} = \begin{pmatrix} B_{1k} \\ B_{2k} \\ \dots \\ B_{Nk} \end{pmatrix}_{l1} \cap \begin{pmatrix} B_{1k} \\ B_{2k} \\ \dots \\ B_{Nk} \end{pmatrix}_{l2} = \begin{pmatrix} G_{1k} \\ G_{2k} \\ \dots \\ G_{Nk} \end{pmatrix},$$

где $G_{ik} = (B_{ik})_{l1} \cap (B_{ik})_{l2}$, $i = \{1, N\}$, $k = \{1, N\}$.

Окончательно, обобщая для всех ассоциативных матриц фактор-множеств показателей качества произвольной размерности, получаем выражение, определяющее *результатирующую* ассоциативную матрицу (РАМ) $A_{рез, 1,2,\dots,m}$

$$G_{ik} = B_{ik}^1 \cap B_{ik}^2 \cap \dots \cap B_{ik}^m, \quad i, k = \{1, N\}. \quad (2)$$

Вхождение варианта в соответствующую окрестность идентифицируется «1» в данной ячейке, отсутствие – «0». Так, если вариант входит в окрестность i -й альтернативы, то элемент ассоциативной матрицы $B_{ij} = 1$ и, соответственно, $B_{ij} = 0$, если – не входит. В ассоциативной форме, окрестности представляют собой столбцы ассоциативной матрицы, и матри-

ца результирующего фактор-множества для выбранных показателей качества формируется в виде последовательного поэлементного пересечения столбцов ассоциативных матриц фактор-множеств меньшей размерности

$$G_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } B_{i,j}^1 \wedge B_{i,j}^2 \wedge \dots \wedge B_{i,j}^l \wedge \dots \wedge B_{i,j}^M = 1 \\ 0, & \text{если } B_{i,j}^1 \wedge B_{i,j}^2 \wedge \dots \wedge B_{i,j}^l \wedge \dots \wedge B_{i,j}^M = 0 \end{cases},$$

$$l = \{1, M\}.$$

Представим реляционные таблицы для фактор-множеств по ПК $\Phi^T(\Omega/k_1)$ и $\Phi^T(\Omega/k_2)$ (табл. 4, 5) в виде соответствующих им ассоциативных матриц (табл. 6, 7) и их пересечения по правилу (2) (табл. 8).

Таблица 6

Ассоциативная матрица AM_1 для $\Phi^T(\Omega/k_1)$

	AM ₁							
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8
ω_1	0	0	1	0	1	1	0	0
ω_2	1	0	1	1	1	1	1	0
ω_3	0	0	0	0	1	0	0	0
ω_4	1	0	1	0	1	1	1	0
ω_5	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_6	1	0	1	0	1	0	0	0
ω_7	1	0	1	0	1	1	0	0
ω_8	1	1	1	1	1	1	1	0

Таблица 7

Ассоциативная матрица AM_2 для $\Phi^T(\Omega/k_2)$

	AM ₂							
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8
ω_1	0	1	1	1	0	0	0	1
ω_2	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	1	0	1	0	0	0	1
ω_4	0	1	1	0	0	0	0	1
ω_5	1	1	1	1	0	0	1	1
ω_6	1	1	1	1	1	0	1	1
ω_7	1	1	1	1	0	0	0	1
ω_8	0	1	0	0	0	0	0	0

Альтернатива ω_i включается во множество нехудших решений, если ее окрестностью является пустое множество, т. е. для столбца AM_i для i -й окрестности $O_i(\omega_i / \{k_1, \dots, k_M\})$ альтернативы ω_i выполняется условие (3) для элементов [1]:

$$\bigcup_{k=1}^N G_{ki} = 0. \quad (3)$$

Результирующая АМ для фактор-множества $\Phi^T(\Omega / \{k_1, k_2\})$ на основании выражения (2) будет иметь вид:

Таблица 8

Ассоциативная матрица AM_{12} для $\Phi^T(\Omega / \{k_1, k_2\})$

	AM_{12}							
	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8
ω_1	0	0	1	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	0	1	0	0	0	0	0
ω_5	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_6	1	0	1	0	1	0	0	0
ω_7	1	0	1	0	0	0	0	0
ω_8	0	1	0	0	0	0	0	0

Транзитивный граф $G^T(\Omega, U^T_{ij})$, соответствующий найденному фактор-множеству $\Phi^T(\Omega / \{k_1, k_2\})$ для π -критерия $\pi(\Omega / \{k_1, k_2\})$ будет содержать дуги, которые идентифицируются «1» в AM_{12} , и которые определяются по правилу

$$\{U^T_{ij}\} = \{<I, j>: (\forall i \neq j \in \{1, N_D\}), (\forall I \in \{1, M\}), k_I(\omega_i) \geq k_I(\omega_j) \wedge \exists l_0 \in \{1, M\}; k_l(\omega_i) > k_l(\omega_j)\}.$$

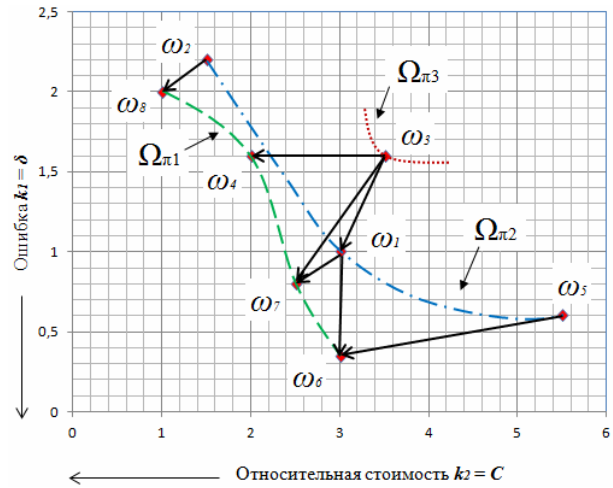


Рис. 1. Графическая интерпретация $G^T(\Omega, U^T_{ij})$ для фактор-множества $\Phi^T(\Omega / \{k_1, k_2\})$

Этой ассоциативной матрице AM_{12} можно поставить в соответствие графическую интерпретацию найденного транзитивного графа $G^T(\Omega, U^T_{ij})$.

Из рис. 1 и табл. 8 следует, что оптимальными по Парето будут конечные недоминируемые варианты типов механических приводов $\{\omega_4, \omega_6, \omega_7, \omega_8\}$. Количество дуг в $G^T(\Omega, U^T_{ij})$ точно соответствует числу «1» в AM_{12} , представленной в табл. 8 ($N_{«1»} = 8$), а число π -слоев – максимальному числу элементов цепей (нетранзитивных дуг) в найденном графе частичного порядка $G^T(\Omega, U^T_{ij})$.

В ТЗ задан диапазон по углу от $\alpha_1 = 0$ до $\alpha_2 = 180^\circ$, следовательно, удовлетворяющими поставленной задаче вариантами из табл. 3 будут те, которым соответствует значение «1» для α , т. е. $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$. Следовательно, оптимальным по Парето будет вариант ω_4 .

Выбор 12M - C:\Users\Dom\Desktop\Аспирантура\vibor_12m\статья2.sh						
Файл Процедуры выбора Выбор по прототипу Графическое отображение Помощь Выход						
	Вариант	P1	P2	P3	P4	P5
Характеристика		Диапазон	Максимальная скорость	Удельная масса	Ошибка	Относительная стоимость
V1	Зуб. цилиндрическая	1	100	1,8	3	1
V2	Зуб. коническая	1	50	2,5	1,5	2,2
V3	Червячная	1	25	4,5	3,5	1,6
V4	Планетарная	1	70	1	2	1,6
V5	Ременная	2	40	5	5,5	0,6
V6	Цепная	2	35	3,5	3	0,35
V7	Винт-гайка скольжения	2	15	3	2,5	0,8
V8	Винт-гайка качения	2	20	3,5	1	2

Рис. 2. Скриншот окна ввода данных

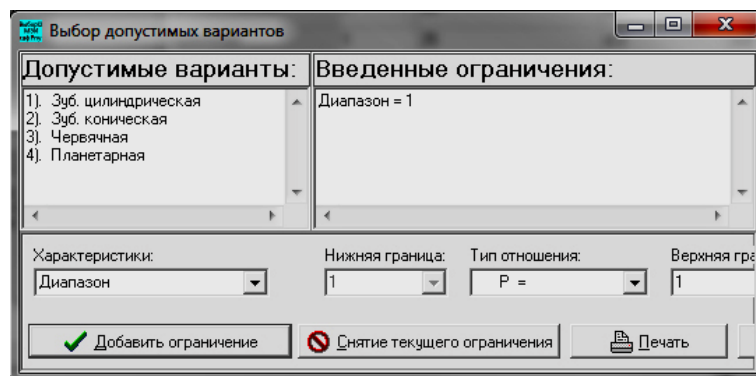


Рис. 3. Скриншот окна поиска допустимых вариантов

Проведенный при помощи программы «Выбор 12м» виртуальный эксперимент представлен на рис. 2, 3, 4. На рис. 2 показан скриншот основного меню программы, в котором происходит ввод исходных данных. Скриншот на рис. 3 показывает допустимые варианты при введении усло-

вия на требуемый диапазон перемещения. Рис. 4 отображает нехудшие по Парето варианты.

Из проведенного виртуального эксперимента следует, что нехудших по Парето вариантов три. С учетом допустимости оптимальными по Парето будут варианты ω_1 , ω_2 , ω_4 .

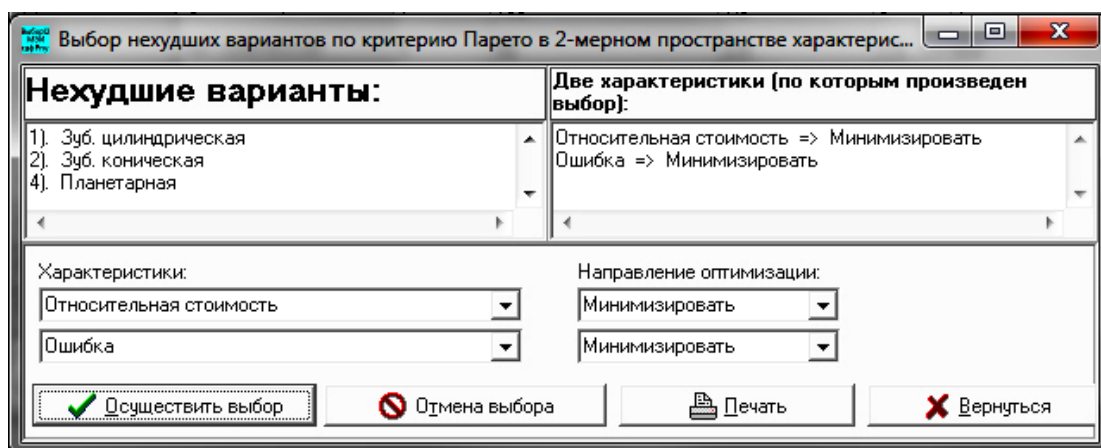


Рис. 4. Скриншот окна поиска нехудших по Парето вариантов

Для выбора единственного варианта можно провести дальнейшее усечение альтернатив по более сильному критерию, за счет введения приоритета ПК или назначения дополнительных условий и ограничений.

Алгоритм выбора привода

На основании проведенных исследований становится возможным создание алгоритма выбора оптимального варианта для привода антенны (рис. 5).



Рис. 5. Алгоритм выбора привода для зеркальной антенной системы:

* – создание базы данных с возможностью последующего внесения новых данных.

Применение условий и ограничений из ТЗ на варианты из базы данных.

** – Выбор осуществляется по алгоритму программы «Выбор 12».

Вывод вариантов и уточняющий расчет габаритов привода.

Выбор ЛПР оптимального варианта из представленных после уточняющего расчета.

Заключение

В работе приведена методика автоматизированного выбора механического привода АУ, включающая: описание способов формализованного назначения условий, ограничений и ПК; разработку алгоритма построения частичного порядка на МВВ Ω , выделения π -слоев и нехудших вариантов.

Проведен виртуальный эксперимент и осуществлен проектный выбор реального привода АУ по ТЗ, подтверждающий работоспособность разработанной методики и программного обеспечения. Результаты работы внедрены в ОКБ МЭИ, а также в учебном процессе на кафедре РПУ ИРЭ НИУ «МЭИ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кандырин, Ю. В. Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.
2. Камаев, В. А. Применение структурирования функции качества для изменения технических характеристик продукции на основе требований потребителей / В. А. Камаев, Ю. Ю. Андрейчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 1). – С. 59–64.
3. Орлов, П. И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие / П. И. Орлов. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.
4. Кандырин, Ю. В. Автоматизация многокритериального структурирования альтернатив на основе их последовательного упорядочивания / Ю. В. Кандырин, А. М. Кошелев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 (46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 31–36.

УДК 004.89

*А. В. Кучуганов, А. Н. Соловьева***РАСПОЗНАВАНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК ПО ФОТОГРАФИЯМ
В ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЕ ПОСТРОЕНИЯ СЛОВЕСНОГО ПОРТРЕТА*****Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова**

kuchuganov@istu.ru, alexandra-solovyova@yandex.ru

В работе описан метод распознавания характерных элементов лица, реализованный в экспертной системе построения словесного портрета по паре фотографий в фас и профиль. Распознавание заключается в сопоставлении результатам векторизации заданных изображений значимых объектов (характерных элементов), информация о которых представлена в виде нечеткого нагруженного графа. Предлагаемый подход позволяет задавать и настраивать гибкие и подробные правила распознавания на языке, близком к естественному, и упрощает переход к словесному описанию изображения.

Ключевые слова: характерные точки, распознавание изображений, лингвистические переменные, нечеткий нагруженный граф, словесный портрет, вербализация изображений.

*A. V. Kuchuganov, A. N. Solovyova***FEATURE POINTS RECOGNITION FROM PHOTOGRAPHS
IN AN EXPERT SYSTEM OF VERBAL DESCRIPTION SYNTHESIS****M.T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University**

In the paper a method for facial feature elements recognition is described, which is implemented in an expert system of verbal description synthesis using the face and profile photographs. The recognition process consists in associating the vectorization results with the significant objects (feature elements) described in terms of a fuzzy weighted graph. The proposed method makes it possible to create and adjust flexible and detailed recognition rules using a close to natural language, as well as simplifies the conversion of the recognition results to the verbal description of the image.

Keywords: feature points, image recognition, linguistic variables, fuzzy weighted graph, verbal description, image verbalization.

Введение

Задача распознавания и идентификации лиц лежит в основе дружественного взаимодействия человека и компьютера. Автоматизация работы с высокоуровневым описанием содержимого изображений повышает его эффективность.

Для перехода от анализа низкоуровневых характеристик, извлеченных методами компьютерного зрения, к вербальному описанию необходимо построить модель взаимосвязей между значимыми элементами.

Для идентификации и описания лиц человек использует аналитическое восприятие отдельных признаков. Формализация основных параметров лица и наборов их возможных значений (в стандартной терминологии) воспроизводит действия эксперта при составлении словесного описания.

Предлагается описывать взаимосвязи между характерными элементами лица составными

лингвистическими переменными. Нечеткий характер параметров позволяет повысить гибкость распознавания и его устойчивость к изменениям освещения, ракурса и помехам, а также упростить и автоматизировать переход от распознавания к словесному портрету.

**1. Описание изображения
с помощью графов**

В изображении можно выделить три уровня информации:

1. *Растровый уровень* – набор пикселей.

2. *Уровень геометрических (векторных) объектов* – результаты векторизации изображения. Для объектов уровня с некоторой точностью известны значения координат, которым нужно сопоставить семантику.

3. *Уровень физических (значимых) объектов* – воспринимаемые глазом характерные элементы: антропометрические точки, а также отдельные сложные элементы, такие как глаза, нос, брови и др. Элементы данного уровня всегда присутствуют на исходном объекте, но точное их расположение и иногда сам факт наличия на изображении неизвестны.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-07-00632-а, 11-07-00783-а) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (проект № 16.740.11.0423 от 03 декабря 2010 г.).

Распознавание заключается в сопоставлении физическим объектам объектов низших уровней. Возможный способ решения этой задачи – представление информации каждого уровня в виде графа и сопоставление полученных структур.

Полученные в результате векторизации цепочки отрезков образуют *граф изображения* $G_{img} = \langle V_{img}, E_{img} \rangle$, где $V_{img} \subset \mathbb{R}^2$ – вершины, соответствующие конечным точкам отрезков; E_{img} – ребра, соответствующие отрезкам. Отдельные контуры и границы цветовых областей представляют собой связные подграфы графа изображения.

Взаимосвязи на уровне физических объектов описываются *графом объекта* [1] $G_{obj} = \langle V_{obj}, E_{obj} \rangle$, где V_{obj} – характерные элементы; E_{obj} – дуги, реализующие четкие и нечеткие отношения между ними.

В ходе распознавания характерных элементов устанавливается соответствие между геометрическими и физическими объектами изображения.

2. Описание характерных элементов и взаимосвязей между ними

Распознаваемые характерные элементы различаются по типам:

1. *Области*. Характеризуются цепочкой отрезков границы, площадью и средним цветом.

2. *Контур*ы. Характеризуются координатами образующих отрезков, длиной и кривизной.

3. *Точки*. Определяются как функции от областей и контуров: центр области, крайняя точка области или контура и т. п. Характеризуются координатами на изображении.

При необходимости выполняются вспомогательные построения, а также уточнение и модификация распознаваемых характерных элементов.

Для каждого из характерных элементов могут быть определены признаки, применяемые в словесном описании (назовем их собственными):

– *форма* (круглый, треугольный, овальный, извилистый, прямой);

– *наклон*;

– *цвет* (корректность оценки зависит от условий освещения);

– *особые признаки* (наличие родинок, морщин; реализуется отдельными алгоритмами, настроенными на предметную область).

Описание взаимосвязей между характерными элементами осуществляется на основе ряда отношений, четких и нечетких.

Характерные элементы связаны отношением принадлежности:

$$\text{Принадлежит} \subseteq V_{obj} \times V_{obj}.$$

Подграф графа объекта, образованный отношением принадлежности, представляет собой дерево, корнем которого является вся область изображения (рис. 1).

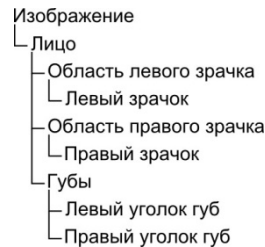


Рис. 1. Фрагмент дерева характерных элементов

Также взаимосвязи между характерными элементами описываются с помощью следующих нечетких отношений $\{R_i\}_{i=1}^m$, таких что

$$\forall (v_1, v_2) \in V_{obj} \times V_{obj}: \mu_{R_i}(v_1, v_2) \in [0, 1],$$

где μ_{R_i} – функция принадлежности:

– отношения *расстояния* (близко, далеко и др.);

– отношения *направления* (выше, слева от);

– отношения *положения* (параллельно, перпендикулярно, скошено к);

– *симметричности* относительно вертикальной оси лица;

– (со)отношения *размера* (больше, меньше и др.);

– отношения *формы* (уже, более круглый и др.);

– *тоновые* и *цветовые* отношения (темнее, краснее и др.).

Собственные признаки объектов задаются множеством лингвистических переменных (качественных характеристик) $\{Q_i(v_0)\}_{i=1}^n$, наименования лингвистических значений и функции принадлежности для которых определяются типом характерного элемента $v_0 \in V_{obj}$. Каждому из нечетких отношений $\{R_i\}_{i=1}^m$ также сопоставлена лингвистическая переменная $L_i(v_1, v_2)$, набор значений и функции совместности для которой определяются типами связанных этим отношением характерных элементов v_1 и v_2 .

Каждую переменную $W \in \{Q_i(v_0)\}_{i=1}^n \cup \{L_i(v_1, v_2)\}_{i=1}^m$ можно охарактеризовать набором $W = (X^W, T^W, U, G, M^W)$ [2], где X^W – название переменной, соответствующее собственному признаку или формулировке отношения W ;

T^W – терм-множество переменной X^W ; набор доступных лингвистических значений (формулировок значений признака) определяется типом характерного элемента v_0 (для $W \in Q(v_0)\}_{i=n}$) или типами характерных элементов v_1 и v_2 (для $W \in L_i(v_1, v_2)\}_{i=1}$; $U = [0, 1]$ – универсальное множество, на котором определяются функции совместимости для значений X^W ; G – синтаксическое правило, порождающее названия значений переменной X^W ; M^W – множество функций совместимости переменной X^W . Вид функций совместимости доступных лингвистических значений определяется типом характерного элемента v_0 или пары v_1 и v_2 .

Наборы допустимых лингвистических значений и соответствующие им функции принадлежности сопоставляются признакам на основе стандартизированной терминологии, принятой в криминалистике и антропологических соотношений [3].

3. Распознавание характерных элементов в экспертной системе построения словесного портрета

Предлагаемый подход реализуется в программной системе, которая выполняет распознавание характерных элементов лица на основе пары фотографий в фас и профиль с дальнейшим построением словесного описания изображения. Предполагается, что условия съемки управляемы, фотографии получены при равномерном освещении со стороны фотоаппарата и лицо на снимках расположено вертикально.

Векторизация заключается в выделении контуров и разбиении изображения на цветовые области. Выделение контуров выполняется с помощью анализатора локальных областей, использующего принципы биоалгоритмов анализа изображений [4]. Для разбиения изображения на цветовые области выполняется двух-

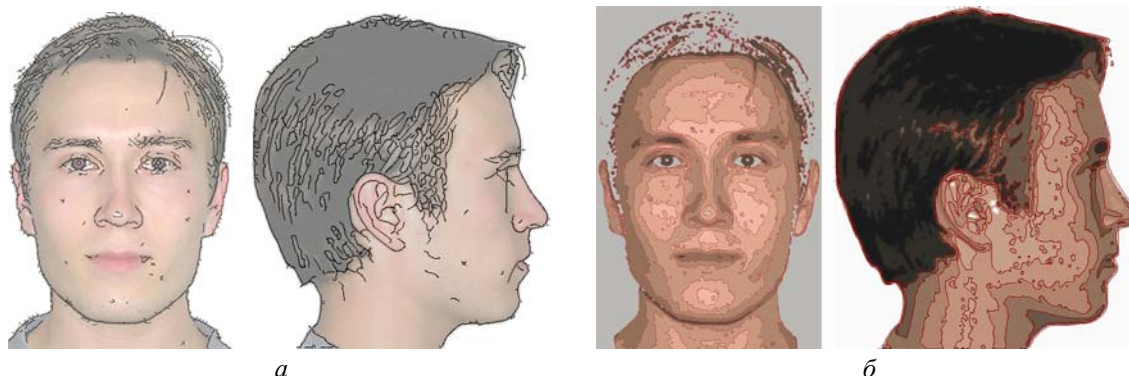


Рис. 2. Обработка фотографий:
а – результат выделения контуров; б – результат цветовой кластеризации

этапная кластеризация: по параметрам цветности и по яркости, характеризующей изменение формы. Полученные цепочки отрезков аппроксимируются (рис. 2).

Экспертные правила применяются к результатам векторизации и обобщают априорные представления о структуре изображенного на снимках объекта. Левые части правил распознавания представляют собой конъюнкции предикатов, описывающих отдельные свойства физических объектов и связей между ними: $\{\langle f_i, A_i \wedge B_i \rangle\}_{i=1}^{N_E}$, где f_i – характерные элементы, доступные для распознавания; $A_i = \bigwedge_{j=1}^{N_V} (Q_j(f_i) = T_k^{Q_j}(f_i))$ – конъюнкция утверждений о значениях лингвистических переменных, описывающих признаки характерного элемента f_i , где N_V – количество за-

данных экспертом признаков характерного элемента; $k \in \{1, \dots, N_{Q_j}\}$; N_{Q_j} – количество термов лингвистической переменной Q_j , применимых к описанию характерного элемента f_i ;

$B_i = \bigwedge_{k=1}^{N_E} (L_k(f_i, f_j) = T_p^{L_k}(f_i, f_j))$ – конъюнкция ут-

верждений о значениях лингвистических переменных, описывающих признаки связи между характерными элементами f_i и f_j , $j \neq i$, где N_E – количество заданных экспертом признаков связи между характерными элементами; $p \in \{1, \dots, N_{L_k}\}$; N_{L_k} – количество термов лингвистической переменной L_k , применимых к описанию связи между характерными элементами f_i и f_j .

Обработка графа объекта организована в три прохода. На первом проходе для цепочек отрезков контуров и границ цветовых областей

Таким образом, при распознавании учитывается сложная система взаимосвязей между характерными элементами лица, что повышает

Для определения значений качественных параметров в программной системе заданы функции расчета нечетких отношений R_i , при необходимости производящие дополнительные преобразования геометрических объектов. Функция посылает запрос к базе данных векторизации изображения, результаты которого преобразуются в цепочки отрезков искомой области или контура, или значения координат для точки.



(Область 2) = Большие среднего, вначале рассчитывается относительный размер областей

в интервале $[0, 1]$ $\mu_{\text{Больше среднего}}(\text{Область 1, Область 2}) = S(\text{Область 1}) / S(\text{Область 2})$, где $S(\text{Область})$ – функция, возвращающая значение площади заданной области. Для проверки

лингвистического значения признака *Относительный Размер* используется функция совместимости значения *Больше среднего*:

$$M_{\text{Больше среднего}}(\mu_{\text{Больше среднего}}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \mu_{\text{Больше среднего}} < 0,4; \\ 5\mu_{\text{Больше среднего}} - 2, & 0,4 \leq \mu_{\text{Больше среднего}} < 0,6; \\ 1, & 0,6 \leq \mu_{\text{Больше среднего}} < 0,8; \\ 5 - 5\mu_{\text{Больше среднего}}, & 0,8 \leq \mu_{\text{Больше среднего}} \leq 1. \end{cases}$$

Каждому правилу распознавания на основании экспериментов и частоты встречаемости признака сопоставлен коэффициент значимости. Так, вес связи расположения зрачка с уголком губ больше, чем вес его связи с вершиной левой брови.

Результаты распознавания антропометрических точек головы, значимых для словесного

описания контуров и областей (рис. 4), передаются в модуль построения словесного портрета, который формируется путем выполнения запросов к базе данных, содержащей лингвистические значения признаков вершин и дуг графа объекта. Результаты запросов преобразуются в форму, близкую к традиционному словесному портрету.



Рис. 4. Результаты распознавания характерных элементов:

a – выделенные области лица, зрачков и губ; *б* – точки зрачков и уголки губ; *в* – сетка антропометрических точек, использующихся в словесном портрете

В результате обработки фотографий, представленных на рис. 2, получено следующее словесное описание [3, 5]: *Лицо овальное. Лоб высокий. Брови дугообразные, длинные, низкие, темные. Длина глазной щели малая. Большое расстояние между наружными углами глаз. Положение глаз горизонтальное. Глаза темные. Нос короткий, широкий. Спинка носа широкая. Рот прямой, малый. Углы рта горизонтальные. Носогубная выемка мелкая. Скулы средние. Подбородок прямой, угловатый, широкий. Губы широкие. Верхняя губа малая. Волосы темные. Линия роста волос прямая.*

Заключение

Описанная экспертная система выполняет распознавание характерных элементов лица по заданной паре фотографий в фас и профиль на

основе результатов их векторизации. Характерные элементы и взаимосвязи между ними описываются лингвистическими переменными и образуют нечеткий граф, что позволяет выделять объекты, сложные для распознавания.

Разработанные методы распознавания характерных элементов ориентированы на упрощение процесса получения гибкого, полного и подробного словесного описания изображенных на снимках объектов. Эксперт может уточнять правила и настраивать их для конкретных условий съемки, используя терминологию традиционного словесного портрета. Аналогичным образом можно ввести любые нетипичные образования на лице, например, с помощью библиотеки.

Описанная экспертная система может применяться для быстрого построения трехмерной геометрической модели и подробного словес-

ного портрета по фотографиям, поиска в базах данных изображений лиц с заданными характеристиками и лиц, похожих на заданное, по запросам, сформулированным на языке, близком к естественному.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фу, К. Структурные методы в распознавании образов / К. Фу. – М.: Мир, 1977. – 314 с.
2. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и

его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

3. Зинин, А. М. Криминалистическая фотопортретная экспертиза : учеб. пособие / А. М. Зинин, Л. З. Кирсанова ; под ред. В. А. Снеткова, З. И. Кирсанова. – М.: ВНКД МВД СССР, 1991. – 88 с.

4. Kuchuganov A.V. Recursions in tasks of images analysis // Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-9-2008). V. 1. P. 365–367.

5. Топорков, А. А. Словесный портрет : практ. пособие / А. А. Топорков. – М.: Юрист, 1999. – 112 с.

УДК 004.032.26 + 338.27

Май Нгок Тханг, В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. П. Тюков

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИДОВ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Волгоградский государственный технический университет

mnthang464@mail.ru, kamaev@unix.cad.vstu.ru, vstu@gebeus.ru, anton.tyukov@gmail.com

В статье приведен обзор современных исследований в области интеллектуальной обработки сенсорных данных для решения задачи идентификации деятельности человека. Данная информация является полезной для прогнозирования потребления электроэнергии и реализации мероприятий по повышению энергетической эффективности.

Ключевые слова: прогнозирование потребления электроэнергии, нейронные сети, распознавание видов деятельности человека, сенсорные данные.

Mai Ngoc Thang, V. A. Kamaev, M. V. Scherbakov, A. P. Tyukov

A REVIEW OF THE APPROACHES OF HUMAN ACTIVITY IDENTIFICATION FOR OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION

Volgograd State Technical University

The problem of contemporary research of intelligent processing sensor data is considered in this paper. Algorithms activities' recognitions are considered here. Paper presents the general description of the framework and the list of specific features connected with observed domain.

Keywords: energy consumption forecasting, neural networks, activities' recognitions, sensor data.

Введение

В среднем электропотребление в жилых домах составляет 40 % общего потребления и в настоящее время это число постоянно растет, что связано с увеличением числа бытовых электроприборов. Поэтому мониторинг электропотребления является актуальной задачей для анализа текущего состояния и выработки мероприятий по повышению энергетической эффективности [1; 2; 3]. Могут быть применены различные подходы повышения эффективности использования электроэнергии: исследование электропотребления приборов и выдача сообщений, если приборы используют энергию больше ожидаемой (BeaWare project); исследование электрических шумов, возникающих при включении и выключении приборов (PowerLine Positioning); распознавание электропотребления с помощью датчиков, установленных на линии

электропередачи (MIT platform). Самым эффективным способом является мониторинг электропотребления приборов с применением технологии распознавания видов деятельности человека, так как этот способ дает наименьшую погрешность при прогнозировании электропотребления в доме и значительное понижение затрат на электроэнергию на основе исключения лишней мощности электроустройств [1, 3]. В работах [4; 7; 9] предлагаются четыре процесса интеллектуального контроля электропотребления: распознавание видов деятельности человека, анализ электропотребления соответственно каждому виду деятельности для мониторинга и обнаружения аномалий; прогнозирование электропотребления в зависимости от измеряемых данных; автоматизация контроля работы приборов для повышения энергоэффективности.

Обзор подходов к идентификации деятельности человека

Частной и важной задачей здесь является прогнозирование деятельности человека в доме и, следовательно, прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от различных видов деятельности. Существуют два подхода сбора данных о видах деятельности человека: использование установленных датчиков в доме (датчик температуры, датчик движения, датчик освещения, датчик электропотребления...) и использование часов регистрации активности. Первый подход является традиционным, так как данные о видах деятельности человека собираются проводными приборами (датчиками), следовательно, требуется огромное количество датчиков для установления в разных местах дома. Новый метод сбора данных беспроводными приборами позволяет получить необходимую информацию небольшим количеством датчиков.

В работе [5] рассматривается подход сбора данных ЧРА (ЧРА – часы регистрации активности) для прогнозирования ежедневных видов деятельности человека. Применение такого подхода имеет следующие преимущества: ЧРА – компактные, портативные, способны регистри-

ровать физические движения, сохранять информацию о движении в централизованной базе данных. В работе [7] рассматривается решение задачи прогнозирования потребления электроэнергии на основе сенсорных данных о предполагаемом (или классифицированном) виде деятельности, движениях человека, текущем времени и других.

В работе [9] представляется прототип умного дома с установленными датчиками для проверки работы системы интеллектуального контроля электропотребления. В этом прототипе все измеренные данные были обработаны с целью исключения аномалий и сохранены в базе данных SQL. Эти данные являются входными параметрами для мониторинга электропотребления дома. Так как объем информации весьма значителен, все данные визуализируются с помощью программы PyViz visualize. В процессе анализа сенсорных данных выделяются шесть основных видов деятельности человека в доме [9]: работа за компьютером, сон, приготовление пищи, просмотр телевизора, купание, уборка. При выполнении выделенных видов деятельности используются соответствующие электроприборы (см. таблицу) [6; 9].

Виды деятельности человека в доме

Тип деятельности	Связанные устройства	Несвязанные устройства
Работа за компьютером	Компьютер, принтер	Локальное освещение устройства
Сон	Нет	Нет
Приготовление пищи	Микроволновая печь, электронная плита	Локальное освещение устройства
Просмотр телевизора	Телевизор, DVD-проигрыватель	Локальное освещение устройства
Купание	Нагреватель воды	Локальное освещение устройства
Уборка	Устройство для уборки	Локальное освещение устройства

Все виды деятельности связаны с измеряемыми параметрами, такими как время, положение человека в доме, состояния электроприбора (включен или выключен), мощность потребления электроэнергии приборами, время продолжительности деятельности и т. д. В работе [4] представлен график электропотребления в течение одного дня в зависимости от вида деятельности человека (рис. 1).

В процессе анализа факторов, значительно влияющих на электропотребление, выделяются

семь параметров: вид деятельности человека; время продолжения деятельности; предыдущая деятельность; следующая деятельность; количество сигналов от датчиков движения; количество датчиков движения, получивших сигнал; состояния каждого датчика (вкл/выкл) [9]. Все указанные выше переменные являются входными параметрами для системы прогнозирования электропотребления, а выходным является прогнозируемое количество потребления электроэнергии (в Вт).

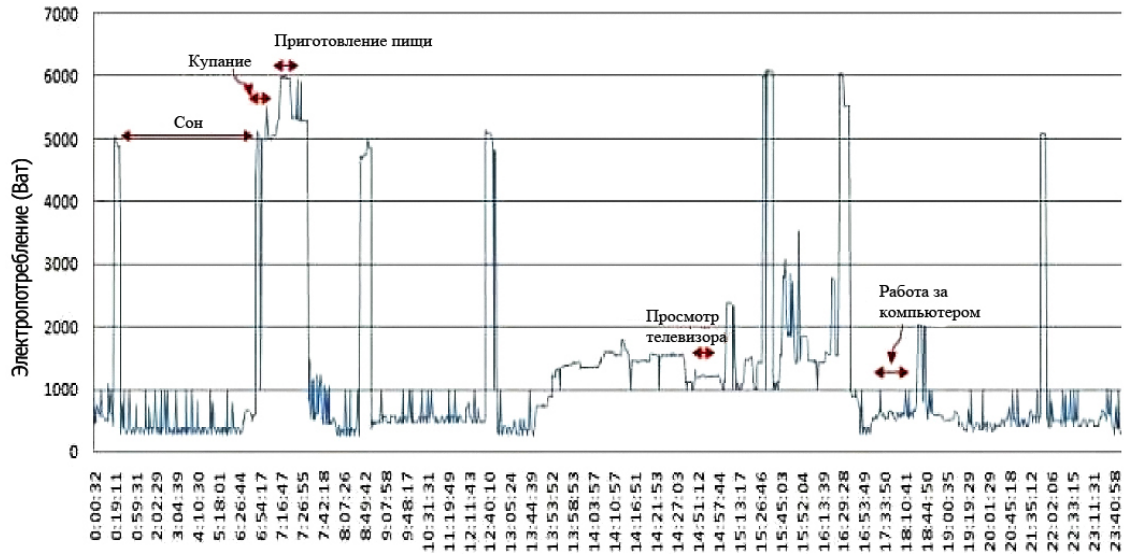


Рис. 1. Электропотребление человека в течение дня

Другой подход к процессу распознавания поведения человека в умном доме предлагается в работе [6]. Исходное пространство данных S , которое содержит данные о деятельности человека, получены посредством датчиков. Входные данные e представляются в виде:

$$e = \langle ts, s, l \rangle,$$

где ts — метка времени; s — идентификатор датчика; l — маркер деятельности. Деятельность человека определяется множеством параметров:

$$a = \langle \varepsilon, l, t, d, \zeta \rangle,$$

где ε — порядок событий; t — время начала события, d — время продолжения события; ζ — место прохождения события.

Процесс распознавания видов деятельности человека проходит в несколько этапов. На первом этапе выполняется обработка маркированных исходных данных S и немаркированных исходных данных T для выделения модели деятельности. На втором этапе осуществляется инициализация модели деятельности, которая получена из исходных данных S на основе сходства данных о виде деятельности человека, времени и пространства. После инициализации модели немаркированные исходные данные T преобразуются алгоритмом максимального правдоподобия как показано в работе [12]. На последнем этапе выполняется распознавание деятельности человека методом наибольшего голосования.

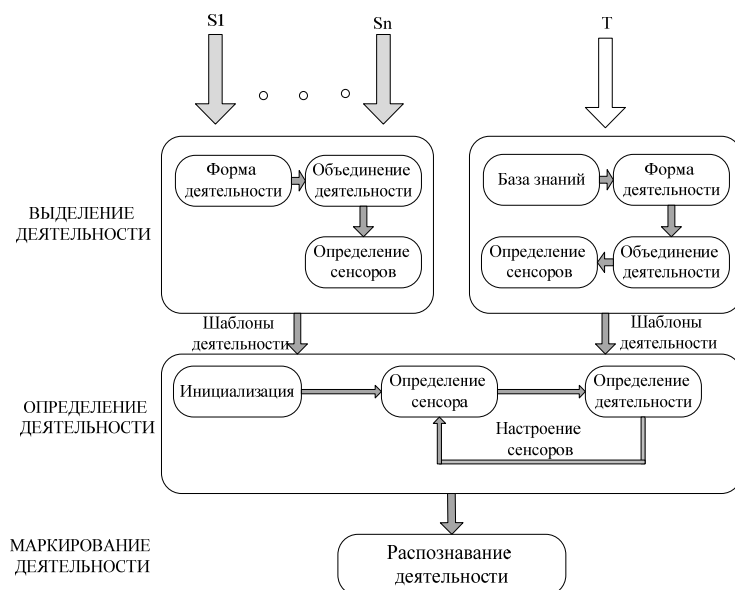


Рис. 2. Процесс распознавания деятельности человека

Для проверки работы системы было выполнено распознавание деятельности человека в пяти помещениях с точностью свыше 90 %. Однако описанный метод распознавания деятельности человека оказывается неэффективным при мониторинге электропотребления, так как этот метод не учитывает особенности каждого человека. Любой человек занимается разными делами, соответственно пользуется разными электроприборами.

Другой подход идентификации деятельности человека разрабатывается на основе компьютерного зрения. В [12] рассматривается система для распознавания лица человека в ре-

альном времени. Система установлена в умном доме и реализует интеллектуальное управление с использованием средств автоматической идентификации человека. Рассматриваемые системы на основе компьютерного зрения требуют интенсивное вычисление, поэтому значительно повышаются затраты на оборудование, так как необходимо захватывать и обрабатывать высококачественное видео в режиме реального времени. Для устранения этих недостатков в [12] представлена архитектура системы распознавания человека и идентификации видов деятельности человека на основе последовательной обработки образцов, как показано в [10; 11].

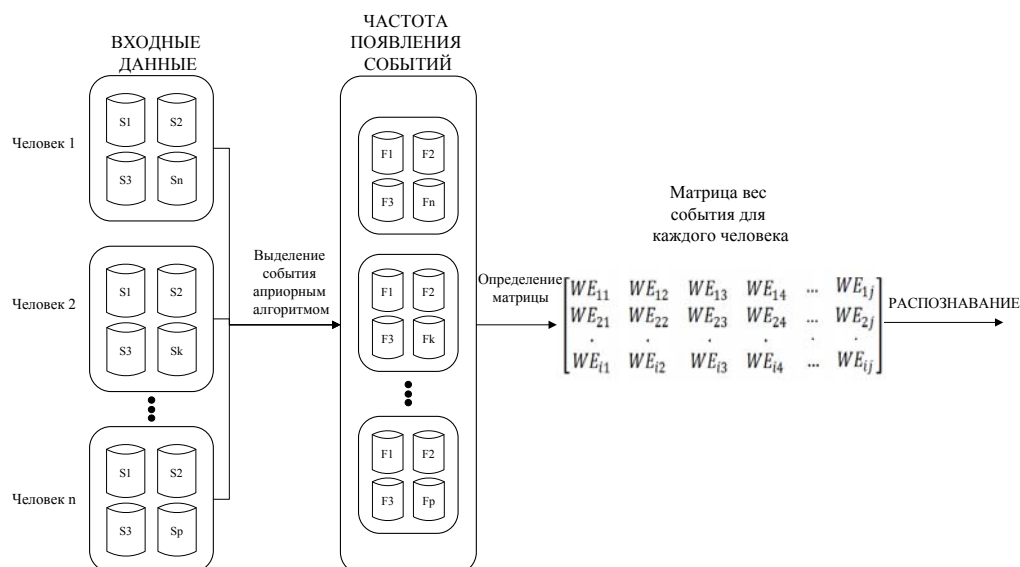


Рис. 3. Процесс идентификации поведения человека на основе последовательной обработки образцов

Алгоритм идентификации поведения человека состоит из трех основных этапов:

- 1) генерация событий;
- 2) атрибуция веса повторяющихся событий, генерированных в первом этапе и построение матрицы веса повторяющихся событий (FEWM – frequent episode weight matrix);

- 3) выполнение алгоритма классификации. Входными данными системы являются: последовательные базы данных $D = \{S_1, S_1, S_1, \dots, S_m\}$; минимальный коэффициент границы min-sur; длина события. Выходными данными является матрица FEWM.

Процесс идентификации поведения человека представляет таким образом:

- П1: анализ последовательных баз данных для выделения событий с помощью алгоритма Arpiori;

- П2: выделение частоты генерируемых событий для каждого порядка баз данных и построение матрицы FEWM;

- П3: обновление матрицы FEWM на основе атрибуции веса повторяющихся событий;

- П4: возвращение матрицы FEWM;

- П5: классификация матрицы FEWM.

Для подтверждения алгоритма строится система «Testbed smart home». В результате тестирования работы системы автор отмечает, что данный алгоритм обеспечивает точность идентификации в зоне 93–100 % видов деятельности человека в диапа-

Заключение

В статье дан обзор работ, связанных с идентификацией деятельности человека и использование этой информации для решения задач энергосбережения. Данные подходы различаются способами применения различных датчиков, а следовательно, могут рассматриваться как альтернативные концепции при реализации систем сбора информации. Полученные результаты анализа подходов к идентификации видов дея-

тельности человека являются базой для создания элементов системы интеллектуального управления энергосбережением. Предполагается внедрение в существующие SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) с целью повышения эффективности потребления энергетических ресурсов посредством интеллектуального анализа данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Применение коннективистских систем для прогнозирования потребления электроэнергии в торговых центрах / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, Д. П. Панченко, Н. Л. Щербакова, А. Бребельс // Управление большими системами : сб. тр. – 2010. – № 31. – С. 92–109.
2. Методика выявления потенциала энергосбережения на основе интеллектуального анализа данных / М. В. Щербаков, Т. А. Яновский, А. Бребельс, Н. Л. Щербакова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2. – С. 51–55.
3. Щербаков, М. В. Применение эволюционных коннективистских моделей идентификации состояний динамики систем для решения задачи прогнозирования потребления электроэнергии в автоматическом режиме / М. В. Щербаков, И. П. Козлов, Н. Л. Щербакова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 4. – С. 70–74.
4. Chao Chen, Barnan Das, Diane Cook, Energy Prediction Based on Resident's Activity / Chao Chen, Barnan Das, Diane Cook // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2010. – P. 45–51.
5. Raghavendiran Srinivasan, Chao Chen, Diane Cook, Activity Recognition using Actigraph Sensor/Raghavendiran Srinivasan, Chao Chen, Diane Cook // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2010. – P. 29–35.
6. Parisa Rashidi, Diane Cook, Multi Home Transfer Learning for Resident Activity Discovery and Recognition / Parisa Rashidi, Diane Cook // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2010. – P. 53–63.
7. Mennan Guder, Clustering of Power Quality Event Data Collected via Monitoring Systems Installed on the Electricity Network / Mennan Guder // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2009. – P. 124–129.
8. Marwan Hassani, Emmanuel Muller, Thomas Seidl. EDISKO: Energy Efficient Distributed in-Sensor-Network K-center Clustering with Outliers / Marwan Hassani, Emmanuel Muller, Thomas Seidl // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2009. – P. 39–49.
9. Li Wan, Jianxin Liao, Xiaomin Zhu. A Frequent Pattern Based Framework for Event Detection in Sensor Network Stream Data / Li Wan, Jianxin Liao, Xiaomin Zhu // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2009. – P. 87–96.
10. Belkacem Chikhaoui, Shengrui Wang, Helene Pigot, A New Algorithm Based On Sequential Pattern Mining For Person Identification In Ubiquitous Environments / Belkacem Chikhaoui, Shengrui Wang, Helene Pigot // Knowledge Discovery from Sensor Data. – 2010. – P. 19–29.
11. Jaakko Suutala, Juha Roning, Methods for person identification on a pressure-sensitive floor : Experiments with multiple classifiers and reject option / Jaakko Suutala, Juha Roning // Information Fusion, № 9. – 2008. – P. 21–40.
12. Peter H. N. de, Fei Zuo, Real-time face recognition for smart home applications / Peter H. N. de, Fei Zuo // International Conference on Consumer Electronics. – 2005. – P. 183–190.
13. T. G. Dietterich, Ensemble methods in machine learning / Dietterich T. G. // In MCS '00: Proceedings of the First International Workshop on Multiple Classifier Systems. – 2000. – P. 1–15.

УДК 681.513: 681.511

А. П. Тюков¹, В. А. Камаев¹, А. Бребельс²

АРХИТЕКТУРА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ КОНТРОЛЯ МИКРОКЛИМАТА В КОММЕРЧЕСКИХ ЗДАНИЯХ*

¹Волгоградский государственный технический университет

anton.tyukov@gmail.com, kamaev@vstu.ru

²Высшая католическая школа Кемпен

adriaan.brebels@khk.be

Авторами предлагается алгоритм оптимального управления HVAC-системами, использующий прогноз внешней температуры для сокращения расхода электрической энергии и газа. Рассматриваются особенности программной архитектуры, механизмы интеграции клиента и HVAC-системы, механизмы взаимодействия с пользователем. Система установлена и управляет температурой крупного супермаркета в г. Ейндховен (Голландия), что привело к сокращению потребления электроэнергии на 8 % за счет оптимизации работы системы отопления в весенне-осенний сезон.

Ключевые слова: HVAC, клиент-серверная, синхронизация данных, энергосбережение, надсистема.

A. P. Tyukov¹, V. A. Kamaev¹, A. Brebels²

ARCHITECTURE OF CENTRALIZED CLIMATE CONTROL SYSTEM FOR COMMERCIAL BUILDINGS

¹Volgograd State Technical University

²Katholieke Hogeschool Kempen

The paper describes the mechanisms of integration of embedded controller and HVAC system, software and hardware architecture of the solution and communicational client-server communicational mechanisms. The solution is installed and operates in large supermarket in Eindhoven (The Netherlands). Installation of the system brought 8 % of energy savings because of changing control strategy of control in middle season.

Keywords: HVAC, client-server, data synchronization, energy, supercontroller.

* Работа поддержана грантом РФФИ № 10-07-97008-р_поволжье_a

Введение

Системы климат-контроля (или HVAC-системы) предназначены для поддержания температуры, влажности внутри помещения в пределах установленного диапазона. Это обеспечивается посредством запуска оборудования, установленного в здании: котлы, тепловые насосы, вентиляторы и радиаторы. Как правило, до 40 % энергии, потребляемой в зданиях, приходится на HVAC-системы [1]. Повышение эффективности работы HVAC-системы на 25 % приведет к 10 % сокращения энергопотребления во всем здании [2, 3, 4]. Основным ограничением оптимальных алгоритмов управления системами отопления зданий является отсутствие быстрой адаптации HVAC-систем к изменяющимся погодным условиям, что приводит к неоптимальному расходу потребления электроэнергии.

В статье представлена концепция централизованной системы управления микроклиматом в коммерческих зданиях (BAATS), реализующая алгоритм управления HVAC-системой с помощью метода управления с прогнозирующими моделями, основанного на использовании прогноза погоды. Управление с прогнозирующими моделями в алгоритме управления микроклиматом позволяет увеличить эффективность HVAC-системы в крупных зданиях [5, 6, 7].

Архитектура системы

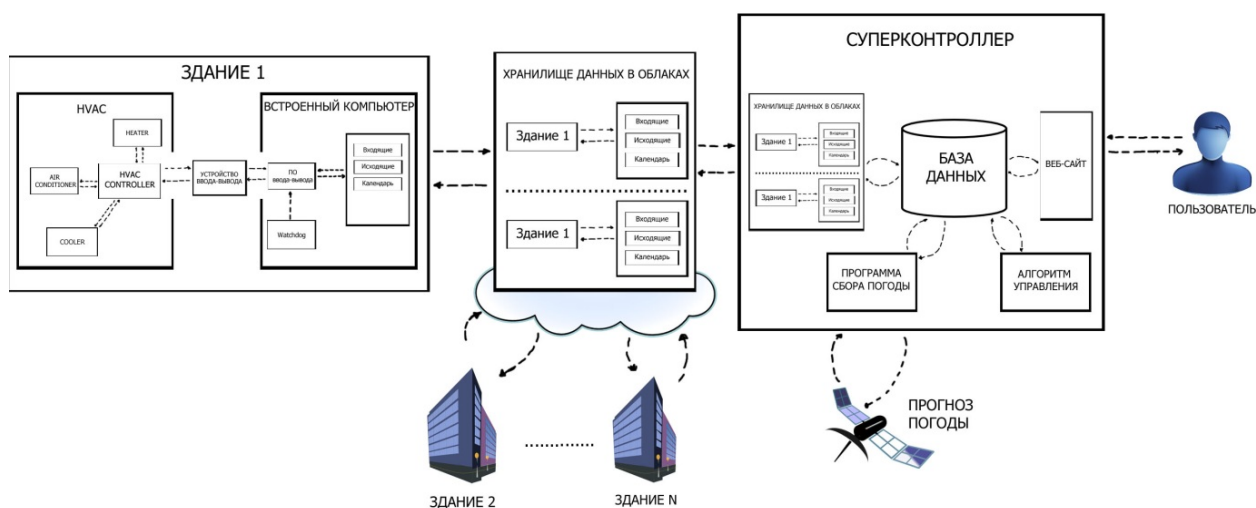
BAATS должна реализовывать следующие функции:

- 1) считывать данные с датчиков HVAC-системы о текущем состоянии посредством интерфейсов получения данных с датчиков;
- 2) собирать данные о прогнозе погоды;
- 3) создавать алгоритм оптимального контроля микроклимата в здании;
- 4) управлять HVAC-системой.

Система BAATS состоит из следующих компонент:

- 1) встраиваемый компьютер, устанавливаемый в помещении вместе с системой контроля климата и собирающий данные из системы. Устройство подключается к блоку управления HVAC-системой в помещении через устройство информационного ввода-вывода, системе к системе устанавливаются датчики, собирающие данные о температуре и энергопотреблении в каждой секции здания, в котором работает система;
- 2) сервер, формирующий алгоритмы управления для каждого встраиваемого компьютера, подключенного к нему;
- 3) система синхронизации между клиентом и серверами. Сервер обменивается данными с клиентами через облачное хранилище данных [8; 9]. Лучший метод синхронизации был рассмотрен авторами в статье [10].

На приведенном рисунке отображена архитектура программной части системы.



Архитектура программной части системы

Клиент

Назначением клиента – встраиваемого компьютера – является исполнение полученных от сервера управляющих воздействий управления hvac-системой. Клиент подключается к hvac-

системе в помещении и выполняет следующие функции:

- 1) сбор данных с информационных входов (цифровых, счетчиков, аналоговых), выполнение параллельных задач, основанных на полу-

ченных данных, локальных операций, управления оборудованием и уведомления об ошибках в системе;

2) отправление и получение данных с сервера [10]. Клиент поддерживает работу алгоритмов управления HVAC-системы (система кондиционирования), используя данные, измеренные локально, и также информацию, полученную с сервера;

3) включение-выключение HVAC-системы.

Клиент состоит из следующих подсистем:

1) подсистема ввода-вывода. Используется для считывания данных с датчиков, установленных в системе и управления HVAC-системой. Она взаимодействует с устройством через последовательный интерфейс RS-232, RS-485 или Ethernet, подключенный к устройству ввода-вывода и встроенному компьютеру. Приложение управляет устройством ввода-вывода по протоколу ModBus [11];

2) подсистема восстановления после сбоев. Используется для автоматического восстановления системы после программных и аппаратных сбоев. Она уведомляет при возникновении неисправности;

3) подсистема обновления программного обеспечения. Обновляет ПО автоматически при появлении новых версий на сервере. После скачивания новой версии программа приостанавливает работу исполняемых систем и заменяет их на обновленные; установленные приложения запускаются в обычном режиме;

4) подсистема удаленного управления управлением клиентом. Администратор HVAC-системы или группы систем подключается к системе в режиме «программное обеспечение как услуга» (SAAS) через Интернет и просматривает статистику работы HVAC-системы; изменяет целевые параметры управления, такие как тип помещения, часы открытия-закрытия здания; устанавливает целевую температуру для каждой секции.

Техническое обеспечение клиента представляет собой встраиваемый персональный компьютер без двигающихся компонент с подключенными к нему модулями сбора данных. К нему могут быть подключены дополнительные устройства ввода-вывода через интерфейсы: USB, Ethernet порты, последовательные порты RS232 и RS485, цифровые входы/выходы. Данные от устройств могут быть получены по следующим протоколам: TCP/IP, LON, KNX/EIB,

Modbus и др. Компьютер управляется многозадачной операционной системой Windows 7 Starter Edition. Все оборудование размещено в электрическом шкафу. Провода модулей сбора данных выходят из электрического шкафа вместе с проводом подключения к сети Ethernet, подключаются к реле HVAC-системы и датчикам.

Сервер

Назначением сервера является исполнение алгоритма супервизорного управления HVAC-системой с использованием прогноза погоды. Сервер создает управляющие сигналы, которые отправляются клиенту для управления HVAC-системой. Сервер выполняет следующие функции:

1) удаленное управление микроклиматом в помещении. Администратор HVAC-системы удаленно изменяет целевые значения температуры через Интернет;

2) получение погодных данных [12, 13]. Система собирает реальные и прогнозные данные (24-часовой горизонт прогноза) с ближайшей к зданию погодной станции в формате WYEC2 [14];

3) создание алгоритма управления микроклиматом помещения. На входе алгоритм получает данные о часах работы здания, эволюции температуры внутри помещения, профиле потребления газа и электроэнергии по секциям, текущем состоянии и прогнозе погоды.

Результатом работы алгоритма является файл, содержащий профиль управления подсистемами отопления и охлаждения HVAC-системы. Файл синхронизируется с клиентом и исправляется.

Сервером выполняются следующие дополнительные функции:

1) хранение исторических данных в системе: трехуровневый календарь работы здания, координаты, исторические данные по энергопотреблению, температуре внутри помещения, прогнозу погоды, данные о функциональном состоянии клиента (загрузка процессора, количество свободного дискового пространства и т. д.);

2) информирование администратора о неисправности компонент системы;

3) предоставление обратной связи системы. При возникновении неполадок HVAC пользователь получает информацию о неисправности системы и телефон службы поддержки подсистем, в которой замечена неисправность;

4) резервное копирование данных. В большинстве случаев достаточно создания еже-

дневной инкрементной копии базы данных, но иногда владельцы данных настаивают на изменении исходных данных;

5) шифрование данных. Данные об энергопотреблении относятся к личным данным и должны быть зашифрованы при передаче. Они могут быть зашифрованы как на момент передачи, так и при хранении.

Сервер состоит из следующих подсистем:

1) подсистема сбора погодных данных. Подсистема содержит два приложения. Первая часть приложения подключается к серверам погодных данных и сохраняет их в файл. Второе приложение размещает данные в базе данных. Для получения реальных значений приложение выгрузки погодных данных подключается к серверу 24 раза в день. Для получения прогноза с горизонтом в 24 часа приложение получает информацию каждые 12 часов;

2) подсистема управления контролем климата создает алгоритм управления для каждой системы управления данными с помощью собранных в помещении данных и прогноза погоды. Прогноз погоды выполняется по следующему алгоритму:

шаг 1. Формируется 24-часовой прогноз изменения целевой температуры в помещении;

шаг 2. Прогнозируется изменение температуры внутри помещения в течение 24 часов;

шаг 3. Целевая температура сравнивается с прогнозной и вырабатываются управляющие сигналы на управление системой контроля микроклимата в секции, в которой применяется алгоритм;

шаг 4. Определяется эффективность работы алгоритма;

3) подсистема связи с пользователем. С помощью данной подсистемы пользователь может: получать информацию об энергопотреблении и состоянии системы; изменять время работы здания; изменять целевую температуру в помещении. Система содержит программу анализа данных, автоматически уведомляющего администратора о возникновении неисправностей.

Синхронизация данных

Назначением синхронизации данных является доставка алгоритмов управления HVAC-системой на сервер. Авторами выбрана синхронизация данных через облачное файловое хранилище [10]. Приложение, синхронизирующее данные с облачным хранилищем дан-

ных, установлено как на сервере, так и на клиенте [4, 6].

Исследования

Разработанная система установлена в здании площадью 1000 м² в г. Эйнховен (Голландия). В нем были установлены датчики суммарного расхода электричества и газа, датчик температуры вне помещения, в столовой, холле и семи комнатах. Клиент был подключен к HVAC-системе через устройство ввода-вывода. Данные считываются с датчиков каждые 15 минут. Система синхронизации [10] доставляет информацию на сервер. Сервер обрабатывает данные и применяет полученный с сервера алгоритм управления HVAC-системой отдельно для каждой секции здания: холла, столовой и семи офисных помещений. Далее данные передаются клиенту, который управляет HVAC-системой – включает или выключает котлы системы через блок управления HVAC по протоколу ModBus. В установленной версии алгоритма система использует прогноз погоды без учета температуры внутри помещения.

Выводы и результаты

В ходе проведенных исследований авторами была разработана архитектура программно-аппаратного решения для интеллектуального централизованного управления HVAC-системами (BAATs). С помощью разработанной архитектуры стало возможным управлять HVAC-системами удаленно. Установка разработанной системы привела к 8 %-й экономии электроэнергии в голландском городе Эйнховен. Эффективность применяемой методики определялась сравнением энергопотребления и уровня комфорта в помещении с попеременным включением и отключением разработанного алгоритма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Klee, D. Seven steps to maximizing central plant efficiency / D. Klee // Johnson Controls white paper. – 2006.
2. Камаев, В. А. Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. – 2009. – № 2. – С. 227–231.
3. Методика выявления потенциала энергосбережения на основе интеллектуального анализа данных / М. В. Щербаков, Т. А. Яновский, А. Бребельс, Н. Л. Щербакова. – № 2. – С. 51–55.
4. Применение коннективистских систем для прогнозирования потребления электроэнергии в торговых центрах / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, Д. П. Панченко,

Н. Л. Щербакова, А. Бребельс // Управление большими системами. – 2010. – № 31. – С. 92–109.

5. Zavala, V. M. On-line economic optimization of energy systems using weather forecast information / V. M. Zavala // Journal of Process Control. – 2009. – № 19. – С. 1725–1736.

6. Kaisa, S. Weather forecast controlled heating / S. Kaisa // eGain White papers. – 2010.

7. Utsumi, Y. Feed-forward air-conditioning control using a weather forecasting data in school building in a heating season / Y. Utsumi [и др.] // 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. – Sydney, 2011.

8. Online Backup Reviews. Online Data Backup, Remote Offsite File Storage, Small Businesses, Enterprises, Online File Backup, Online Backups Providers Directory. [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.backupreview.info/>, свободный. – Загл. с экрана

9. Doe, J. Ultimate Review List of Best Free Online Storage and Backup Application Services [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://tomuse.com/ultimate-review-list-of-best-free-online-storage-and-backup-application-services>,

свободный. – Загл. с экрана.

10. Tyukov, A. Automatic two way synchronization between server and multiple clients for HVAC system / A. Tyukov, A. Brebels, M. Shcherbakov // The 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services. – Ho Chi Minh City, 2011. – P. 147–152.

11. Montllor, A. S. Modbus application protocol specification / A. S. Montllor // The ModBus IDA organization, 2006.

12. Brooks, H. E. Verification of public weather forecasts available via the media / H. E. Brooks, A. Witt, M. D. Eilts // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1997. – № 10. – С. 2167–2178.

13. Sharma, N. P. Cloudy computing: Leveraging weather forecasts in energy harvesting sensor systems / N. P. Sharma // IEEE Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. – 2010. – P. 1–9.

14. Crawley, D. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? / D. Crawley // Transactions-American society of heating refrigerating and air conditioning engineers. – 1998. – Vol. 104. – P. 498–515.

УДК 343.983.25

А. М. Чмутин, Р. Р. Шарипов***

ФЕНОМЕН JPEG-СТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕЕ СВОЙСТВА

*Волгоградский государственный университет

**Волгоградский государственный технический университет

amchmutin@yandex.ru, james1401@yandex.ru

Рассмотрен феномен JPEG-структуры цифровых фотографических изображений. Изучено формирование и исследованы изобразительные свойства JPEG-структур. Исходя из информативности этих свойств, показано, что JPEG-структура может служить устойчивым идентификационным признаком целостности цифрового фотографического изображения. Рассмотрено влияние инструментальных факторов фотосъемки на формирование JPEG-структуры. Отталкиваясь от результатов исследования этих факторов, предположена в перспективе возможность сличения объектов съемки по их фотографическим изображениям путем анализа соответствующих JPEG-структур.

Ключевые слова: цифровая фотография, JPEG-структура изображения, информативные свойства, сличение, идентификация, экспертные приложения.

A. M. Chmutin, R. R. Sharipov

DIGITAL PHOTOGRAPHIC IMAGE JPEG-STRUCTURE PHENOMENON AND ITS PROPERTIES

*Volgograd State University

**Volgograd State Technical University

The phenomenon of digital photographic images JPEG-structure is considered. Formation of JPEG-structures is studied and graphic properties of JPEG-structures are investigated. Starting with these properties informative content, it is shown that the JPEG-structure can serve as a steady identification sign of the digital photographic image integrity. Pressure of photographing instrumental factors on JPEG-structure formation is considered. Occurring from results of these factors research, possibility to compare photography objects under their photographic images by means of corresponding JPEG-structures analysis is assumed in the long term.

Keywords: digital photography, image JPEG-structure, informative properties, graphic information, comparison, identification, expert applications.

Сегодня можно не доказывать, что самым распространенным форматом файлов, в которых хранятся цифровые фотографические изображения, является JPG. Это связано и с пред-

почтениями бытовой фототехники, и с небесконечной скоростью передачи в Интернет. Даже если сейчас, к примеру, графический файл имеет иное расширение, это не значит, что ра-

нее он не просуществовал то или другое время в этом формате. Как результат, фотография подвергалась характерному для алгоритма JPEG сжатию с потерей информации, что проявляется в возникновении изобразительного эффекта, впервые обнаруженного и описанного в [1], и названного нами JPEG-структурой цифрового фотографического изображения. Последующее изучение JPEG-структур позволило найти им эффективное применение в сфере криминалистической экспертизы. Было создано, запатентовано [2] и внедрено [3] оригинальное программное обеспечение для их выявления и исследования, – пришло время обобщить научные аспекты проведенной работы.

Исследовались JPEG-структуры по представительным выборкам (всего несколько тысяч изображений). Масштаб проведенной работы подтвердил, что JPEG-структура – не единственный артефакт, а категория систематичная. Это позволяет квалифицировать ее, и в дальнейшем вести речь о новом феномене.

Продemonстрируем сущность этого феномена. На рис. 1 приведены фрагмент цифровой фотографии и его JPEG-структура. Она представляет собой не всегда целую и в той или иной степени заполненную сетку. И, хотя первым делом эту сетку хочется соотнести с текстурой изображения (по смыслу, придаваемому текстуре в [4]), как то сразу вспоминается, что у самого изображаемого объекта этой сетки нет. Да и нефизическое происхождение сетки очевидно – оно имеет явную математическую подоплеку. Это границы блоков, на которые делится изображение в формате JPG. Чтобы сетка JPEG-структуры не потерялась на фоне прочих возможных перепадов яркости, диапазон детектирования и отображения перепадов в JPEG-структуре специально выбирается достаточно узким – таким, чтобы отсечь как можно больше этих прочих перепадов. Выбор диапазона отображения производится оператором. В первом приближении для такого выбора можно использовать метод проб и ошибок, по мере накопления опыта имеет смысл опираться на данные предшествующих исследований.

Охарактеризуем этот феномен. Для целей выявления изобразительной информации JPEG-структура вполне релевантна, поскольку она определяется свойствами каждого элемента изображения. JPEG-структура – это характеристика дифференциальная, поскольку определяется не самими яркостями элементов изображе-



Рис. 1. Изображение (сверху) и его JPEG-структура (снизу). Яркости пикселей в исходном изображении распределены в диапазоне от 0 до 242. При конвертации в формат JPG показатель качества устанавливался равным 6, детектируемый диапазон перепадов яркости – в пределах 001...255

ния, а их перепадами. JPEG-структура – это характеристика пороговая, поскольку ее информативность зависит от выбора границ отображаемого диапазона перепадов яркости. Как следствие, отметим, что для формирования проявляющего JPEG-структуру вейвлета, наверное, не обязательно использовать функцию Хаара – можно, по-видимому, применить и функцию Уолша, и функцию Хевисайда... [5].

Теперь систематизируем семантические изобразительные свойства [6] JPEG-структуры, имея в виду их утилитарность для последующего визуального анализа. Правда, в рамках короткой статьи мы сможем изложить их только тезисно, опуская потребную в ряде случаев аналитику.

JPEG-структура индивидуальна. У всех изображений JPEG-структуры в той или иной степени различны (если не рассматривать малоинформативные однотонные поля, у которых все

перепады яркости нулевые, и она просто вырождается). Эта неповторимость свидетельствует в пользу целесообразности использования JPEG-структур на предмет идентификации, как самого цифрового изображения, так и его целостности.

JPEG-структура скрыта. В исходном изображении она присутствует, но неявно. Там JPEG-структура незаметна на глаз, ибо соседствующие пиксели, как правило, сами по себе имеют разную яркость и цвет, – межблочные границы теряются на фоне этих перепадов. Программа же прорисовывает ее черно-белой, то есть с максимальным яркостным контрастом. Как результат, даже без цветовых эффектов JPEG-структура визуализируется очень эффективно.

JPEG-структура симметрична. Как уже было сказано ранее [7], возникает JPEG-структура вследствие особенностей сжатия в алгоритме JPEG. В силу своей математической формализации всегда она имеет двумерную трансляционную симметрию. Период JPEG-структуры – размер стороны квадратной ячейки, выраженный в числе пикселей – определяется только избранным стандартом сжатия в JPEG и не зависит от показателя качества сохранения изображения в JPG-формате.

JPEG-структура стохастична. Составляющие ее ячейки могут быть в той или иной мере заполнены, могут быть совсем пусты, а могут быть даже и не до конца прорисованы (в пределах, при вырождении JPEG-структуры ее ячейки вообще не прорисовываются). Степень заполнения и прорисовки ячеек сильно зависит от показателя качества, выбранного при первичном преобразовании файла с изображением в формат JPG, и от установленного диапазона индицируемых в JPEG-структуре перепадов яркости.

JPEG-структура хроматична. Фундаментальность этого свойства лежит в природе различия порождающих JPEG-структуру соседствующих блоков пикселей. Это различие возникает вследствие индивидуального характера округления цветовых данных в пределах блока при сжатии по алгоритму JPEG. Отсюда вытекает и возможность цветного исходного изображения, и возможность цветного представления результата, и зависимость результата от яркостного уравнивания.

JPEG-структура связна (пространственно когерентна). Линии, образующие JPEG-структуру, понижают все поле изображения без

изгибов и смещений. Единственное их искажение, проявляющееся в виде разрывов, при конечности последних не мешает визуальному восприятию связности JPEG-структуры. Нарушение связности JPEG-структуры позволяет сделать категорический вывод об имевшем место вмешательстве в изображения.

JPEG-структура – феномен системный по определению. Если рассматривать изображение как систему, то линии, формирующие сетку JPEG-структуры, являются элементами этой системы – изображение без них не побывало в формате JPG. В размерном плане ячейки, образующие JPEG-структуру, несоизмеримы с изображением, и в то же время сама JPEG-структура порождается свойствами пикселей – элементов еще более мелкомасштабных по отношению к ее ячейкам.

JPEG-структура – феномен исключительно устойчивый: характерно, что JPEG-структура, однажды обретенная изображением не может ни потеряться, ни исказиться при переводе файла из JPG в любой другой графический формат. Только вместе с самим изображением ее можно каким-либо образом изменить или уничтожить (здесь, естественно, мы не затрагиваем потенциально возможную, но исключительно трудоемкую процедуру попиксельной ретуши).

JPEG-структура информативна. И, как правило, если JPEG-структура актуальную информацию несет, то эта информация – о целостности изображения или его искажении [8], то есть значимая прежде всего с точки зрения криминалистики. На этом свойстве основан способ экспертного исследования цифровых фотографий изображений, всесторонне освещенный в методической разработке [9].

Наконец, теоретически JPEG-структура инвариантна к смещению и засветке (математически – это инвариантность относительно сдвигов в фокальной плоскости и в свете [10]). JPEG-структура не инвариантна к развороту и масштабу (как следствие, к ракурсу при фотографировании) [11]. Но, если эти свойства в пространственном измерении интуитивно более или менее очевидны априори, то в световом – они еще требуют подтверждения. Для этого мы провели следующий модельный эксперимент. На рис. 2 приведены изображения известного логотипа, полученные при вдвое различающихся освещенностях, и соответствующие им JPEG-структуры. При этом границы диапазона отображения для более светлого снимка тоже уве-

личены вдвое*. Результат сравнения JPEG-структур говорит сам за себя.

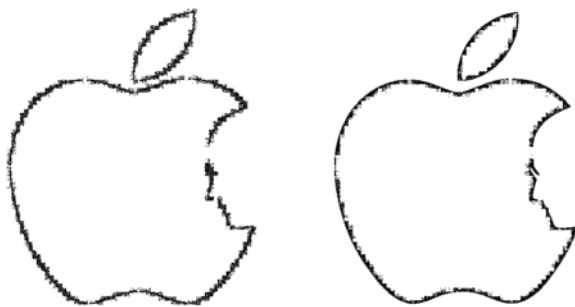


Рис. 2. Слева – JPEG-структура изображения при полной засветке; справа – при половинной

Изложенные свойства инвариантности JPEG-структур позволяют генерализовать вывод о принципиальной возможности сличения по JPEG-структурам не только цифровых фотографических изображений, но и самих объектов фотографирования. Сличение, естественно, предполагается с использованием уже не корреляционного, а структурно-лингвистического подхода к анализу изобразительной информации [6]. А подобная задача, хотя и кажется поначалу несколько академичной, в криминалистике может иметь серьезные экспертные приложения; в технике – может быть востребована в системах распознавания образов, что с учетом взрывного роста количества цифровой фотографической аппаратуры делает ее весьма актуальной.

*Описанная здесь и ранее совокупность приемов отнюдь не отрицает иных путей отображения JPEG-структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарипов, Р. Р. Разработка пакета прикладных программ для обработки изображений объектов экспертизы методом вейвлет-анализа : дипломная работа / рук. А. М. Чмутин. – Волгоград : ВолГУ, 2007. – 69 с.
2. Шарипов, Р. Р. Программа для идентификации целостности цифровых изображений : Свидетельство о государственной регистрации № 2009613106 от 16.06.2009.
3. Чмутин, А. М. Пакет прикладных программ, реализующий вейвлет-анализ цифровых фотографических изображений для выявления вставленных фрагментов : Акт внедрения результатов инициативной разработки от 01.09.2008.
4. Прэтт, Э. Цифровая обработка изображений / Э. Прэтт. В 2 кн. Кн. 2. – М.: Мир, 1982. – 480 с.
5. Залманзон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях / Л. А. Залманзон. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
6. Информационная оптика : учеб. пособие / Б. С. Ринкевичус [и др.] ; под ред. Н. Н. Евтихьева. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 612 с.
7. Чмутин, А. М. Исследование целостности цифровых фотоизображений методом вейвлет-анализа / А. М. Чмутин, Р. Р. Шарипов // Сб. докл. 19 Междунар. конф. «Лазеры. Измерения. Информация». Т. 2. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. – С. 202–212.
8. Ганзен, В. А. Восприятие целостных объектов / В. А. Ганзен. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 319 с.
9. Рвачева, О. В. Спецпрактикум : Методическое пособие к выполнению лабораторных работ по компьютерным технологиям криминалистической экспертизы / О. В. Рвачева, А. М. Чмутин, Р. Р. Шарипов ; под ред. А. М. Чмутина. – Волгоград : ВолГУ, 2012. – 48 с.: ил.
10. Вигнер, Ю. Этюды о симметрии / Ю. Вигнер. – М.: Мир, 1971. – 318 с.
11. Раушенбах, Б. В. Геометрия картины и зрительное восприятие / Б. В. Раушенбах. – СПб.: Азбука-классика, 2002. – 320 с.

УДК 621.31:51

С. В. Шевченко, В. А. Камаев*, Р. И. Манева****

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РЕГИОНЕ

***Волгоградский государственный технический университет**

****Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»**
sv_shevchenko@mail.ru, kamaev@unix.cad.vstu.ru, rosya.maneva@yandex.ua

В статье рассматривается решение проблемы прогнозирования потребления электроэнергии в регионе. Предлагается методика прогнозирования, основанная на использовании нечетких продукционных правил и нейронных сетей. Приводится описание и результаты применения различных методов прогнозирования.

Ключевые слова: нечеткие продукционные правила, нейронная сеть, прогнозирование, энергокомпания.

S. V. Shevchenko, V. A. Kamaev*, R. I. Maneva****

APPLICATION OF FUZZY PRODUCTION RULES AND NEURAL NETWORKS FOR FORECASTING OF CONSUMPTION OF ELECTRICITY IN THE REGION

***Volgograd State Technical University**

****National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»**

In article we consider the problem of forecasting electricity consumption in the region. A method of forecasting based on the use of fuzzy production rules and neural networks. The description and results of various forecasting methods.

Keywords: fuzzy production rules, neural network, forecasting, energy company.

Необходимость прогнозирования потребления электроэнергии обусловлена значимостью данного ресурса для экономики любой страны. Точное прогнозирование обеспечивает возможность эффективного распределения производства и поставок электроэнергии между энергокомпаниями, способствует повышению экономической обоснованности операций по покупке и продаже электроэнергии. Прогноз потребления электроэнергии с учетом возможностей его покрытия позволяет более точно и эффективно обеспечить поддержку баланса мощности, что в свою очередь способствует общему повышению эффективности производства, распределения, поставок и потребления электроэнергии.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что в существующих моделях и методах прогнозирования потребления электроэнергии недостаточно точно учитываются существующие тенденции в связи с исключением из рассмотрения достаточно важных в сложившихся условиях факторов, а использование ключевых параметров в известных подходах для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования в данной предметной области не обеспечивает требуемой точности получаемых результатов [1]. Поэтому в реальных экономических условиях вопросы расширения средств анализа временных рядов и усовершенствования прогнозных моделей с целью снижения ошибок прогнозирования, включая и рассматриваемую предметную область, являются весьма актуальными.

Задачей исследования является разработка программных решений для прогнозирования потребления электроэнергии в регионе с использованием нечетких продукционных правил и нейронных сетей.

Актуальность исследований обусловлена возможностью применения полученных результатов для оперативного, текущего и долгосрочного планирования производства электроэнергии с целью повышения эффективности ее производства, поставок, распределения и использования.

В данной работе в качестве предмета анализа для получения прогнозов потребления элект-

роэнергии в регионе были использованы данные функционирования основного потребителя электроэнергии в Харьковской области – предприятия «Харьковоблэнерго». Особенностью потребления электроэнергии промышленными предприятиями в Украине является разделение их на два класса. Целью такого разделения является поддержка эффективного управления экономическими аспектами производственных процессов и условиями формирования бюджета. В данном разрезе процесс потребления электроэнергии можно представить в виде некоторой зависимости, использующей, например, следующие внутренние и внешние параметры. Это цена электроэнергии 1-го класса потребителей электроэнергии; цена электроэнергии 2-го класса; время года (месяц) и год; валовой внутренний продукт (ВВП); количество рабочих дней; средняя температура окружающей среды. Для учета состояния экономики в целом будем использовать индексы потребительских цен и цен производителя. В качестве внешнего фактора в работе используется оценка влияния состояния экономики Евросоюза на экономику Украины. Для этого в рассматриваемой зависимости в составе входных параметров используются значения сводного индекса крупнейших предприятий Европы – Stoxx Europe 50 [2].

Обозначим используемые исходные данные: J – год; M – пора года (месяц); N – количество рабочих дней в месяце; GDP – валовой внутренний продукт (ВВП Украины), млн. грн; I_S – индекс DJ Euro STOXX 50; I_C – индекс потребительских цен; I_P – индекс цен производителя; C_1 – цена электроэнергии 1-го класса напряжения; C_2 – цена электроэнергии 2-го класса напряжения; T_{cp} – средняя температура окружающей среды.

Тогда объем потребления электроэнергии Y в зависимости от выделенных факторов в рассматриваемой задаче может быть представлен следующей математической моделью:

$$Y = F(J, M, N, GDP, I_S, I_C, I_P, C_1, C_2, T_{cp});$$

здесь F – некоторая функция, которая является решением следующей задачи:

$$\sum_{i \in S} (F(J^i, M^i, N^i, GDP^i, I_S^i, I_C^i, I_P^i, C_1^i, C_2^i, T_{cp}^i) - Y^i)^2 \rightarrow \min,$$

где S – множество статистических данных, состоящих из пар входных $\{J^i, M^i, N^i, GDP^i,$

$I_S^i, I_C^i, I_P^i, C_1^i, C_2^i, T_{cp}^i\}$ и выходных $\{Y^i\}$ значений, $i \in S$.

Прогнозирование потребления электроэнергии осложняется тем, что каждый процесс потребления содержит индивидуальные технологические циклы, которые, суммируясь, образуют уникальный временной процесс. Однако во всех производственных циклах потребления энергии можно найти общие черты, тем самым образуя методическую базу для выполнения точного прогноза.

Из существующих методов прогнозирования в области потребления энергоресурсов наиболее часто применяются *статистические методы и методы эвристического прогнозирования* [3].

Основной недостаток статистических методов состоит в малой степени детализации прогнозируемых показателей и низком уровне доверия к получаемым результатам. Это обусловлено тем, что в рамках общих тенденций скрыты конкретные причины происходящих изменений уровня энергопотребления, отсутствуют взаимосвязи с характеристиками социально-экономического развития региона, с соотношениями потребления электроэнергии, тепла и топлива. Кроме того, использование данных подходов для прогнозирования энергопотребления небольшого региона или отдельного административного района при неустойчивой динамике изменения уровня потребления может привести к значительным погрешностям. Что касается разработанных математических моделей, то возможности их применения ограничены, поскольку большинство их предназначено для расчета энергопотребления по стране в целом.

Эвристические методы предполагают, что подходы, используемые для формирования прогноза, не изложены в явной форме и неотделимы от лица, делающего прогноз. Они могут использовать весьма сложный математический аппарат [3].

Достоинствами использования методов нечеткой логики являются возможность обработки входных данных с нечеткими значениями, изменяющимися во времени, которые реально представляют рассматриваемые ситуации; возможность нечеткой формализации критериев оценки и сравнения с использованием понятий типа «большинство», «возможно», «преимущественно»; возможность проведения качествен-

ных оценок входных данных и выходных результатов с использованием значений данных и их уровня достоверности; возможность проведения быстрого моделирования сложных динамических систем с целью сравнительного анализа вариантов решений с заданной степенью точности [4].

После анализа преимуществ и недостатков различных подходов к прогнозированию был выбран подход для прогнозирования потребления электроэнергии на основе продукционных правил и нейронных сетей [5].

В качестве нечеткой нейронной сети рассматривается нечеткая нейронная сеть Такаги-Сугено-Канга (ТСК). В работе ТСК-сети позволяют решить вопрос одновременной идентификации нечетких правил и адаптации функций принадлежности.

Компоненты нечетких продукционных моделей могут быть реализованы по-разному. Совокупность отдельных реализаций описанных выше компонентов нечеткой продукционной модели определяет алгоритм нечеткого вывода. В рассматриваемой задаче используются алгоритмы нечеткого вывода Мамдани и Сугено [6].

Алгоритм Мамдани позволяет избежать чрезмерно большого объема вычислений. Этот алгоритм в настоящее время получил наибольшее практическое применение в задачах нечеткого моделирования.

Алгоритм Сугено аналогичен алгоритму Мамдани за исключением заключений правил, которые задаются не нечеткими термами, а линейной функцией от входов. Правила в базе знаний Сугено являются своего рода переключателями с одного линейного закона «входы – выход» на другой, тоже линейный.

Для создания программного решения поставленной задачи были использованы Java-технологии, которым присущи многие положительные свойства, включая мобильность, универсальность и безопасность.

В результате серии расчетов по прогнозированию потребления электроэнергии были построены графики прогнозных и реальных значений объемов потребления электроэнергии в Харьковском регионе для семи месяцев тестовой выборки. Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

J	M	N	GDP	I_s	I_C	I_P	C_1	C_2	$T_{ср.}$	Y
2010	11	22	98429	2864,2	100,3	99,7	55,27	68,6	7,9	524,211
2010	12	23	114531	2788,6	100,9	100,8	55,27	68,6	-1,6	443,899
2011	01	19	79947	2897,4	101	101,3	57,47	72,03	-7	417,929
2011	02	20	82842	3074,8	100,9	104,8	60,34	75,63	-8,9	335,170
2011	03	22	100612	3026,3	101,4	102,1	61,76	77,44	-0,5	258,736
2011	04	20	105693	3180,6	101,3	103,4	62,26	79,27	8,5	339,252
2011	05	19	192830	3090,0	100,8	102,6	62,71	82,37	17,9	364,214

На рисунке представлен результат прогнозирования объемов потребления электроэнергии с помощью алгоритма нечеткого вывода Мамдани, алгоритма Сугено и искусственной нейронной сети Такаги – Сугено – Канга.

В табл. 2 приведены абсолютные и относительные отклонения результатов прогнозирования от реальных значений.

На основании данных вышеприведенной таблицы видно, что наименьшее отклонение наблюдается в результатах прогнозирования, полученных с использованием алгоритма Сугено. В данном контексте это наилучший алгоритм для использования при прочих равных условиях.

Кроме этого, алгоритм Сугено с вычислительной точки зрения реализуется значительно

проще, чем алгоритм Мамдани, а время выполнения на его основе расчетов меньше, чем для алгоритма Мамдани в 50–100 раз.

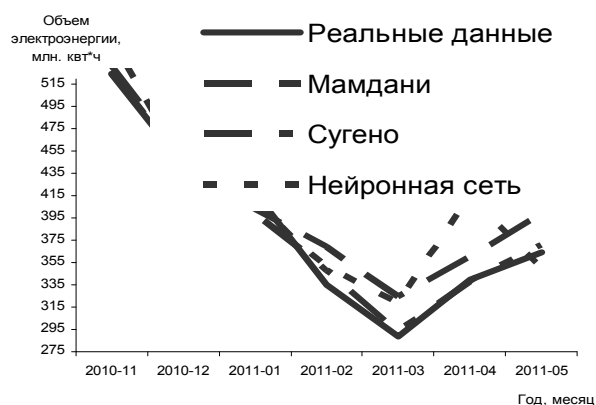


Таблица 2

Абсолютные и относительные отклонения реальных и полученных значений

Период	Алгоритмы прогнозирования					
	Мамдани		Сугено		Нечеткая нейронная сеть	
	Абс.	Отн.	Абс.	Отн.	Абс.	Отн.
2010–11	30,0005	5,41	6,99	1,32	0	0,00
2010–12	1,04853	0,24	1,99147	0,45	0,00053	0,00
2011–01	15,40045	3,83	19,38145	4,86	10,26645	2,52
2011–02	33,35919	9,05	13,00719	3,74	15,89319	4,53
2011–03	35,66387	10,99	4,229867	1,44	29,67787	9,32
2011–04	20,2769	5,64	1,830103	0,54	74,6989	18,05
2011–05	34,31503	8,61	6,22803	1,68	13,89397	3,97
Среднее	27,80309	6,25	8,935329	2,00	28,88608	5,48

Следует отметить, что имеются результаты применения других алгоритмов, которые в некоторых случаях дают лучшие результаты, чем Сугено. Например, для первых двух месяцев наилучшие результаты получены по алгоритмам, реализующим искусственные нейронные сети.

Алгоритм Сугено и нечетких нейронных сетей является более гибким, чем алгоритм Мамдани в силу использования линейных форм в выводе, в отличие от применения усреднения термов по уровню, процедуры которых используются в алгоритме Мамдани.

Погрешность при использовании прогнозирования с помощью алгоритмов искусственных нейронных сетей может быть связана с ошибкой при обучении: обучение произошло не по закономерности, отражающей получение объемов потребления, а по какой-либо другой скрытой зависимости.

Результаты работы и проведенное тестирование программной реализации алгоритмов прогнозирования показали, что предлагаемые подходы и разработанные программные решения могут быть использованы для получения прогнозных значений объемов потребления электроэнергии в регионе с высокой достоверностью. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности построенной модели и возможности ее применения в реальных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прогноз потребления электроэнергии [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.basegroup.ru/solutions/case/electra/>
2. Фондовые индексы STOXX Europe 50 и EURO STOXX 50 [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://enc.fxeuroclub.ru/535/>.
3. Єріна, А. М. Статистичне моделювання та прогнозування : навч. посібник. – К.: КНЕУ, 2001. – 168 с.
4. Мелихов, А. Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А. Н. Мелихов. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
5. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
6. Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2001. – 382 с.
7. Національна комісія регулювання електроенергетики України. Ціни та тарифи. [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.nerc.gov.ua/control/uk/publish/article/main/>.
8. Погода и климат [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://pogoda.ru.net/monitor.php>.
9. Основні показники соціально-економічного розвитку України. [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/mp/1>.
10. Індекси споживчих цін та цін виробників промислової продукції [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : <http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/htm>

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.3.07:004

Ю. М. Брумштейн, И. Ю. Петрова, Ю. Н. Попова

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В РЕГИОНАЛЬНЫХ ВУЗАХ: АНАЛИЗ ВОПРОСОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Астраханский государственный университет

brum2003@mail.ru, petrova@aspu.ru, yulianna2501@mail.ru

Дана характеристика целей и информационных процессов, связанных с организацией научной деятельности (НД) в региональных вузах. Исследовано влияние конкуренции в сфере НД на информационную безопасность (ИБ). Проанализированы виды рисков ИБ для НД с позиций руководства вузов, отдельных подразделений, преподавателей, аспирантов, студентов в условиях широкого использования информационных технологий. Обоснована эффективность возможных мер по обеспечению ИБ НД.

Ключевые слова: научная деятельность, информационная безопасность, региональный вуз, конкуренция, модели поведения, риск-менеджмент, информационные технологии.

J. M. Brumshtejn, I. J. Petrova, J. N. Popova

SCIENTIFIC ACTIVITY IN REGIONAL UNIVERSITIES: ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY QUESTIONS

The Astrakhan State University

brum2003@mail.ru, petrova@aspu.ru, yulianna2501@mail.ru

The characteristic of the goals and information processes, connected with scientific activity (SA) organization in regional universities, is given. Competition influence in SA-sphere at information safety (IS) of universities and separate researchers is investigated. Kinds of IS-risks for SA from positions of universities top-management, departments, lecturers, post-graduate students, students in the conditions of wide use of information technologies are analyzed. Efficiency of IS-maintenance possible measures for SA is proved.

Keywords: scientific activity, information safety, regional universities, competition, behavior models, risk-management, information technologies.

В настоящее время результативность научной деятельности (НД) региональных вузов (РВ) России во многом определяется эффективностью работы с информацией. При этом ряд вопросов информационной безопасности (ИБ) НД в типичных руководствах по ИБ (например, [11]) вообще не затрагивается. Поэтому в данной статье авторы ставили следующие задачи: комплексная характеристика целей НД с точки зрения руководства РВ, его отдельных подразделений, сотрудников, студентов, аспирантов; анализ с позиций ИБ информационных процессов, связанных с НД – в том числе внутри РВ; выявление состава рисков, связанных с ИБ НД; обоснование целесообразности некоторых методов обеспечения ИБ для сферы НД.

Научная деятельность в региональном вузе – анализ целей и направлений конкуренции

Цели НД для руководства РВ, его подразделений, отдельных ФЛ могут быть оперативными, среднесрочными, долгосрочными. При этом решения принимаются с учетом рисков ИБ. Последние оказывают влияние: на технологии работы с информацией при НД; полноту достижения поставленных целей НД; конкурентоспособность и интеллектуальный капитал РВ [3, с. 88; 4, с. 81], а также отдельных ФЛ.

Для руководства РВ *основные цели НД* – это поддержание и усиление научного авторитета (репутации) РВ на региональном, федеральном, международном уровнях; развитие внутрисистемных и международных связей РВ в сфере

НД, в том числе с научно-исследовательскими и производственными организациями; «увязка» направлений НД в РВ с потребностями социально-экономического развития регионов; получение РВ, его подразделениями и ФЛ (в том числе на конкурсной основе) необходимых объемов бюджетного финансирования, хозяйственных работ научно-исследовательского характера, грантов; открытие и организационное обеспечение работы в РВ ученых советов по защите диссертаций; открытие в РВ аспирантур и докторантур; привлечение на обучение в РВ аспирантов, докторантов (на бюджетной и коммерческой основе); обеспечение успешных защит ими диссертаций, в том числе в ученых советах при РВ; рациональный подбор научных руководителей для аспирантов; издание РВ научных журналов, получение и сохранение ими статусов «ВАКовских»; проведение в РВ научных конференций, симпозиумов (и прочее), в том числе за счет средств вневузовских грантов; стимулирование активности студентов в отношении НД; поддержка руководства студенческой НД со стороны преподавателей и аспирантов; обеспечение научного приоритета РВ по результатам исследований, включая поддержку публикации научных статей и монографий; юридическая фиксация прав РВ на результаты интеллектуальной деятельности, прежде всего на объекты интеллектуальной собственности (ОИС); обеспечение эффективной коммерциализации результатов научных исследований и разработок – в том числе за счет деятельности малых предприятий при РВ, сотрудничества с производственными организациями и пр.

Цели управляющих структур (УС), связанных с НД (в том числе отделов: научных, интеллектуальной собственности, фандрайзинга, коммерциализации научных исследований и др.) определяются целями РВ. Эти подразделения осуществляют, в основном, информационно-техническую поддержку НД в РВ. Поэтому они подвержены «информационным рискам», в том числе связанным с использованием больших объемов персональных данных ФЛ [8, с. 5], «коммерчески значимой» для ФЛ и РВ информации и пр.

Прямыми и косвенными целями кафедр РВ в области НД можно считать: подготовку кадров высшей квалификации – желательно с соблюдением установленных сроков защит диссертаций; получение средств по грантам; по-

вышение научного авторитета кафедр; поддержка студенческой научной деятельности; обеспечение набора студентов и магистрантов.

Основные цели преподавателей РВ, связанные с НД: подготовка и защита диссертаций лично ими; получение ученых званий; подготовка научных статей, монографий, докладов на научных конференциях; обеспечение научного приоритета своих исследований, высокого уровня цитируемости публикаций, личного научного авторитета; участие в научных конференциях, в том числе иногородних и зарубежных; научные командировки и стажировки, в том числе и вне России; избрание в члены различных академий, научно-технических обществ; вхождение в состав членов ученых советов по защите диссертаций; обеспечение результативности работы с аспирантами в рамках аспирантур при кафедрах РВ; подготовка в РВ докторантов; получение грантов, в том числе в составе научных коллективов; обеспечение руководства студенческой научной деятельностью в сфере НД; повышение научного уровня лекций, практических занятий, подготовки учебников, учебно-методических комплексов; удовлетворение личных амбиций и пр.

Главной целью аспирантов и докторантов, обучающихся в РВ, является защита диссертаций. Остальные цели (публикация статей, участие в научных конференциях и пр.) обычно являются вспомогательными.

Цели студентов в отношении НД: научные публикации (в том числе в соавторстве с преподавателями); участие в научных конференциях, в том числе и вне РВ; получение грантов на конкурсной основе; получение повышенных и персональных стипендий, дополнительных выплат.

Мотивация к достижению указанных выше целей для руководства РВ и его подразделений носит, в основном, служебно-личностный характер, а для других ФЛ – в основном личностный [5, с. 106].

Помимо нормативных, календарных и ресурсных ограничений руководство РВ и другие ФЛ при принятии решений, связанных с НД, учитывают также *конкуренцию*: между РВ и иными организациями; в некоторых случаях – между кафедрами внутри РВ за ресурсы; между ФЛ внутри РВ, а иногда и внутри кафедр. Основные конкуренты РВ в отношении НД – это другие РВ (в том числе в отношении хозяйственных работ по региональной тематике); филиалы иногородних вузов (в том числе за использова-

ние преподавательского состава РВ в НД); региональные научные и научно-производственные организации, филиалы иногородних организаций этого же типа; научно-исследовательские и проектные подразделения корпораций (могут конкурировать с РВ в отношении использования персонала, получения прав на ОИС, имеющих коммерческую значимость).

Модели принятия решений по управлению научной деятельностью в региональных вузах и средства ее информационного обеспечения

В рамках управления НД в РВ решаются многокритериальные задачи принятия и реализации взаимосвязанных решений – одновременных и/или разновременных. При этом учитываются: интересы РВ; субъективные и объективные интересы кафедр и ФЛ; факторы неопределенности и риска; потенциальные и реальные конфликты ФЛ и кафедр в РВ. Собственно управление НД включает в себя: организационные решения; планирование и распределение располагаемых ресурсов (в том числе финансовых, трудовых, помещений и пр.); воспроизводство и наращивание интеллектуальных ресурсов РВ [3, с. 88], в том числе связанных с персоналом РВ и теми ОИС, имущественные права на которые принадлежат вузу; обеспечение ИБ НД с позиций интересов «РВ в целом», кафедр, отдельных ФЛ и их групп.

Для организации НД в РВ могут использоваться бюджетные и внебюджетные средства, в том числе полученные от коммерческого обучения студентов. Однако за внебюджетные средства «конкурируют» и иные направления деятельности РВ, включая обеспечение ИБ «вуза в целом».

Необходимым условием принятия руководством РВ или отдельными ФЛ положительных решений о выполнении конкретных работ, связанных с НД, является существенное превышение суммы вероятных положительных эффектов (ПЭ) от их выполнения (S^+) над суммарными затратами трудовых, финансовых и других видов ресурсов (Z^+) на эти работы:

$$(S^+ - Z^+) / Z^+ \geq \varepsilon, \quad (1)$$

где ε – величина относительного превышения. При этом мы для определенности считаем, что S^+ и Z^+ выражены в рублях; величина S^+ соответствует оперативным и долгосрочным ПЭ. Для S^+ примем

$$S^+ = \sum_{n=1}^N (P_n^{(s)} S_n), \quad (2)$$

где N – количество учитываемых ПЭ; $\{P_n^{(s)}\}_{n=1...N}$ – вероятности частных ПЭ; S_n – оценки величин частных ПЭ. К ПЭ мы относим, помимо прочего, и уменьшение уровней рисков, связанных с любой деятельностью ФЛ – не только с НД. Для Z^+ примем

$$Z^+ = \sum_{m=1}^M (P_m^{(z)} Z_m), \quad (3)$$

где M – количество учитываемых видов затрат; $\{P_m^{(z)}\}_{m=1...M}$ – вероятности по видам затрат; Z_n – оценки величин затрат по видам. При долгосрочных оценках в отношении ПЭ и затрат целесообразно использовать коэффициенты дисконтирования – для учета инфляционных процессов.

В простейшем случае оптимальное решение, связанное с проведением какой-то совокупности работ для достижения множества целей управления НД (для РВ, его подразделений, отдельных ФЛ) может рассматриваться как задача «линейного программирования» [9, с. 5] с функционалом

$$F = \sum_{g=1}^G \eta_g B_g, \quad (4)$$

где F – значение функционала, которое необходимо максимизировать; G – количество учитываемых целей НД; $\{B_g\}_{g=1...G}$ – оценки полноты (степени) достижения целей НД в относительных единицах (баллах); $\{\eta_g\}_{g=1...G}$ – коэффициенты «важности» в отношении целей. Такие задачи возникают, в частности, в рамках «организации управления инновационными процессами вуза», границы между которыми и НД «достаточно условны» [1, с. 83]; при «распределении средств дополнительного финансирования кафедр в вузах на основе комплексных оценок качества их работы» [2, с. 83] и пр.

Для отдельных «целей деятельности» значения «критериев» (на них осуществляется «нормировка» фактических показателей при расчетах $\{B_g\}$) могут быть: установлены извне РВ; определяться руководством РВ; определяться ФЛ в РВ – в отношении личных целей, связанных с НД. Если для значений «критериев» по всем целям приняты одинаковые балльные оценки, то величины $\{\eta_g\}$ могут быть использованы для «ранжирования» приоритетов в отношении этих целей.

Система ограничений для (4) может быть взята типичной для задач линейного программирования [9, с. 5]:

$$\left\{ \sum_{g=1}^G \alpha_{l,g} B_g \leq \omega_l \right\}_{l=1...L}, \quad (5)$$

где L – количество ограничений; $[\alpha_{l,g}]$ – матрица коэффициентов, связанных с затратами «ресурсов» для достижения целей; $\{\omega_l\}_{l=1...L}$ – ограничения по отдельным видам «ресурсов». В качестве «ограничений» могут рассматриваться: общие финансово-экономические возможности РВ, связанные с НД; нормативные ограничения; ограничения по трудозатратам совокупности ФЛ в РВ (преподавателей, аспирантов и пр.) или отдельных ФЛ (если решения принимаются лично ими); ограничения по трудозатратам на обеспечение НД со стороны руководства РВ и его УС; ограничения, связанные с доступными для выполнения НД площадями, оборудованием, программными средствами (ПС) и др.

Риски выбора «неоптимальных» решений по (4), (5) определяются: неправильным выбором приоритетов целей; неточными оценками «ресурсоемкости» решений, задаваемых ограничений и пр. При этом для оценки может быть полезно средство MsExcel «анализ устойчивости решений».

Постановку задачи управления НД в виде (4), (5) можно рассматривать как «статическую», относящуюся к определенному периоду (например, году). Ее возможные обобщения связаны с переходом от «линейного программирования» к «нелинейному» [9, с. 120].

Со временем приоритеты целей НД для РВ и ФЛ могут меняться – это зависит также и от изменения характеристик «внешней среды», включая: требования к вузам и ФЛ; степени спроса на результаты НД и пр. Для длительных периодов времени распределение ресурсов при управлении НД в РВ может рассматриваться с позиций задач динамического программирования [9, с. 145]. При этом для отдельных видов ресурсов (в том числе для изменяющихся во времени значениях «критериев») задачи могут решаться стандартно – с использованием функции Беллмана [9, с. 146]. Для взаимосвязанных ресурсов более эффективными могут быть методы из [6, с. 112], в том числе «генетические» алгоритмы и «мультиагентные системы».

В рамках достижения рассмотренных выше целей *информационные технологии* применя-

ются для получения, учета, обработки (анализа), структуризации, накопления, селективного распространения информации.

Входящие информационные потоки, связанные с НД, для «РВ в целом» включают в себя сведения: о предстоящих внешних научных конференциях, семинарах, других научно-технических мероприятиях; возможностях получения грантов научного и инновационного характера; стажировках вне РВ, курсах повышения квалификации; возможностях и условиях публикаций во вневузовских изданиях, включая электронные; требованиях по представлению от РВ различных сведений по НД и пр. Часть такой информации в РВ поступает в виде «писем на бумаге», часть – по электронной почте. Сейчас УС РВ большие объемы «внешней информации» по НД «добывают» и в инициативном порядке, в том числе через сайты в Интернете других РВ, различных фондов, иных организаций.

На основе полученных сведений УС РВ осуществляют информирование кафедр и ФЛ (преподавателей, аспирантов, студентов и пр.) об имеющихся возможностях, связанных с НД. Способы такого информирования: рассылка сведений по электронной почте; размещение информации на сайтах РВ; доведение информации до ФЛ на заседаниях, совещаниях и прочее; информирование ФЛ по телефону или при непосредственных контактах. Связанные с этими способами информационные риски: несвоевременное или неполное поступление информации ФЛ; информация просто не доходит до заинтересованных в ней ФЛ; недостаточно селективное распространение информации и, как следствие, чрезмерно высокие объемы информации не позволяют ФЛ ее прорабатывать в должной мере и пр.

В условиях развития информационных технологий кафедры и ФЛ в РВ активно получают «научную» информацию и по собственным каналам – главным образом, через Интернет. На основе информации из разных источников ФЛ в РВ осуществляют НД с учетом своих целей, мотивации и различных ограничений, включая располагаемые ресурсы времени. При этом для оптимизации решений могут использоваться модели типа (4), (5) в которых отражены все виды деятельности, а не только НД.

Обратная связь «кафедры и физические лица => УС РВ» сейчас все в большей степени осуществляется на основе средств электронной

почты. При этом снижение информационных рисков может быть достигнуто за счет применения ПС: учета передачи/поступления информации; контроля предусмотренных сроков выполнения поручений (мероприятий); получения «электронных квитанций» о прочтении сообщений и пр.

Информационные взаимосвязи ФЛ в РВ по линии НД с «внешними» организациями и ФЛ сейчас часто осуществляются минуя УС вузов. Это может приводить к информационным рискам для самих ФЛ, ведущих переписку; других ФЛ в РВ; кафедр; «РВ в целом».

Модели и методы управления рисками информационной безопасности, связанными с научной деятельностью

В литературе риски обычно связывают с двумя факторами: «подверженностью внешнему воздействию» и «неопределенностью» [7, с. 16]. Мы будем связывать риски с возможностями наступления неблагоприятных событий (НС). Величину i -го вида риска (R_i) за заданный период времени будем считать равной произведению вероятности наступления НС (P_i) на ущерб (U_i) в случае, если НС наступит:

$$\{R_i = P_i U_i\}_{i=1...I}, \quad (6)$$

где I – количество видов рисков. Модель оценки (6) предполагает: независимость всех рисков друг от друга; возможность только однократного наступления НС для каждого вида рисков за рассматриваемый период. Если принять, что одно НС i -го вида за заданный период может наступить неоднократно; известно распределение вероятностей для каждого из «количеств раз» (n) его наступления ($\{p_i^{(n)}\}_{n=1...I}$) за заданный период, то вместо (6) получим для оценки величины риска:

$$\left\{ R_i = 0 * p_i^{(0)} + \sum_{n=1}^N (p_i^{(n)} (n U_i)) \right\}_{i=1...I}; \quad \sum_{n=0}^N p_i^{(n)} = 1, \quad (7)$$

где член « $0 * p_i^{(0)}$ » соответствует вероятности того, что НС вообще не наступит; N – количество «членов ряда», на котором мы «обрываем» суммирование. Модель (7) за счет задания распределений $\{p_i^{(n)}\}_{i=1...I, n=1...N}$ позволяет учесть влияние предыдущих НС i -го типа на вероятность наступления последующих НС того же типа. Это может быть важно, например, для учета «обучения» ФЛ на негативных результатах своих решений (действий).

Распределение НС за заданный промежуток времени модель (7) не учитывает. На практике после негативного результата каких-то действий, совершение таких же действий более вероятно после значительного промежутка времени, а не после малого («модель с забыванием»).

Структура рисков ИБ «для РВ в целом» включает в себя: несвоевременное и неполное получение информации, значимой для НД РВ, а также «недоведение» этой информации до кафедр и ФЛ; в условиях отсутствия координирующих мер – возникновение неуправляемой внутренней конкуренции ФЛ и/или кафедр за тематику научных исследований, хозяйственных работ, грантов; неэффективность затрат ресурсов на разработку тем с низкой научной и/или практической значимостью; использование ФЛ и кафедрами на служебных ПЭВМ нелицензионных версий ПС; потеря приоритета РВ и отдельных ФЛ на результаты научных исследований из-за несвоевременной публикации их результатов; несанкционированные утечки информации о предполагаемых к проведению в РВ перспективных исследованиях и разработках; слабое «продвижение» в информационном пространстве результатов НД РВ, снижающее его «научную репутацию»; выявление плагиата сотрудников РВ и аспирантов в научных публикациях; нарушения правил оформления документов, связанных с защитами диссертаций в РВ; потери накопленной и передаваемой информации в РВ, в том числе из-за воздействия вредоносных ПС, выхода из строя аппаратных средств; временные утраты доступа к каналам связи и внешним информационным ресурсам из-за нарушений в работе программно-аппаратных средств; потеря РВ имущественных прав на ОИС (особенно имеющих коммерческие перспективы) из-за уклонения ФЛ от такой регистрации, пропусков сроков УС РВ продления таких прав и пр.

В общем случае риск-менеджмент (РМ), в том числе связанный с вопросами ИБ НД, возможен в отношении: рисков НС; вероятностей НС; величин ущербов от НС. Для ФЛ в вузах (преподавателей, аспирантов и пр.) такой РМ могут осуществлять: они сами; руководство кафедр, РВ. Итак, в рамках РМ могут ограничиваться: суммарные уровни рисков

$$\left(\sum_{i=1}^I R_i \right) \leq \varepsilon_2 \quad (8)$$

(где ε_2 – предельный уровень суммы рисков); отдельные виды рисков

$$\{R_i \leq R_i^e\}_{i=1...I} \quad (9)$$

(где $\{R_i^e\}_{i=1...I}$ – предельные уровни частных рисков); риски для некоторых «групп решений» (действий). Для РМ вероятностей НС и величин ущербов от реализации НС, могут быть (исходя из формулы (6)) предложены

$$\{P_i \leq P_i^e\}_{i=1...I}; \{U_i \leq U_i^e\}_{i=1...I}, \quad (10)$$

где $\{P_i^e\}_{i=1...I}; \{U_i^e\}_{i=1...I}$ – заданные системы ограничений. Отметим, что РМ для РВ, отдельных подразделений и ФЛ может осуществляться также в виде ограничений для задач линейного программирования (формулы (5)). Рассмотрим *подробнее* некоторые из видов рисков и возможности их РМ.

Для повышения результативности заявок на получение ФЛ и их коллективами грантов в большинстве РВ созданы профильные отделы или секторы; систематически осуществляется обучение ФЛ в отношении фандрайзинга на специальных курсах; распространяются соответствующие методические материалы и информация о возможностях получения грантов.

В то же время в учебных программах большинства студенческих и аспирантских специальностей РВ (в том числе и технических) отсутствуют курсы, связанные с методологией проведения информационных и патентных исследований в рамках НД; способами повышения эффективности решения «изобретательских задач»; правилами оформления заявок на ОИС – изобретения, полезные модели, программы для ЭВМ, базы данных; оценкой целесообразности и методов «поддержания» прав на ОИС; информационной поддержки «продвижения» ОИС в рыночных условиях; состава прав на ОИС (в том числе личных неимущественных прав), а также преимуществ, которые дает официальная регистрация ОИС. По этим направлениям в РВ обычно не осуществляется и плановое обучение преподавателей.

Регистрация ОИС (особенно изобретений и полезных моделей) требует со стороны ФЛ серьезных трудовых затрат, в том числе на «патентную проработку» заявок. Большие объемы таких трудовых затрат (особенно если это делается ФЛ впервые), а также вероятностный характер получения положительных решений по «объектам промышленной собственности», нередко приводят к отказу ФЛ от такой регистрации и, как следствие, потере прав РВ на ОИС, в том числе имеющих потенциальную коммерческую значимость.

Еще одна причина потенциальных потерь РВ из-за отсутствия регистрации прав на ОИС – неполный контроль УС РВ над исходящими информационными потоками. В частности, «акты экспертизы» по научным публикациям требуются сейчас лишь в немногих изданиях; эти акты подтверждают отсутствие в публикуемых материалах лишь «секретных сведений», но не описаний коммерчески значимых ОИС. Поэтому ФЛ, особенно заинтересованные в быстрее публикациях из-за приближения сроков защит диссертаций, могут отправлять для опубликования работы, заведомо содержащие описания объектов промышленной собственности, «в обход» руководства РВ, его УС и кафедр. Для объективности оценки ситуации отметим такие факторы: в трудовых договорах РВ с ФЛ вопросы регистрации прав на ОИС, как правило, не регламентированы (следовательно, возможные «уклонения» ФЛ от «патентной проработки» информации и, собственно, регистрации ОИС не являются формальными нарушениями трудовой дисциплины); содержательный анализ научных публикаций на предмет возможного «раскрытия» информации о потенциальных объектах промышленной собственности трудоемок, требует привлечения узкопрофильных экспертов, может нарушать интересы авторов работ из-за удлинения сроков, «раскрытия» информации до момента публикации и пр.

Для руководства РВ модели принятия положительных решений о регистрации отдельных ОИС от имени РВ, а также о «продлении прав» на них в математическом отношении аналогичны (1)–(3). При принятии решений учитываются, в частности, возможности: использования регистрируемых ОИС для обоснования подаваемых заявок на гранты, хоздоговора; степени личной заинтересованности авторов ОИС в их рыночном продвижении. Принимается во внимание также: общее количество ОИС, права на которые принадлежат РВ; фактический и ожидаемый уровень спроса на них; целесообразность материального поощрения авторов ОИС. При наличии «суммарных ограничений», связанных с фиксацией имущественных прав и их продлением, авторы ОИС могут «конкурировать» за регистрацию таких объектов от имени РВ.

Вопросы использования в РВ нелицензионных копий ПС могут стать особенно актуальными после присоединения России к всемир-

ной торговой организации. Причинами использования ФЛ таких копий в рамках НД могут быть: необходимость выполнения научных исследований на «конкурентоспособном уровне» – сейчас он определяется не только располагаемым экспериментальным оборудованием, но и ПС; высокая стоимость коммерческих версий таких ПС при малом количестве в РВ заинтересованных в них; отсутствие демонстрационных версий таких ПС или их недостаточная функциональность; невозможность использования необходимых ПС на основе «академических лицензий» с льготными условиями; отсутствием возможностей дистанционного использования таких ПС на серверах в Интернете. Для ФЛ альтернативой применения для НД нелегальных ПС на служебных ПЭВМ РВ может быть использование личных портативных ПЭВМ – они в России пока практически никак не контролируются.

Исключение использования нелегальных копий ПС на ПЭВМ в РВ технически может быть достигнуто: блокированием возможностей инсталляции ПС на ПЭВМ не уполномоченными на это лицами; мониторингом ПЭВМ в рамках локальных сетей РВ в отношении появления на них новых ПС; контролем серверов в отношении размещения на них дистрибутивов нелегальных копий ПС и пр.

Организационно-правовые средства обеспечения ИБ РВ в отношении нелегальных копий ПС могут относиться к студентам, преподавателям, аспирантам и включать в себя чтение специальных лекций. Отметим еще обеспечение доступа к дистрибутивам свободно распространяемых ПС.

Для преподавателей и аспирантов РВ риски ИБ в отношении НД могут быть связаны следующими факторами: потеря информации на служебных ПЭВМ из-за воздействия вредоносных программ, ошибок ФЛ и прочее; несанкционированный доступ к неопубликованной информации; несвоевременное получение значимой для НД информации; возникновение конкуренции с другими ФЛ за тематику (направления) исследований – в том числе грантовых и диссертационных. В отношении последнего вида рисков аспиранты, их научные руководители, руководители аспирантур обычно принимают такие меры: обеспечение «широкого» информационного поиска перед утверждением тем диссертаций; мониторинг научных публикаций в процессе работы над диссертаци-

ей и, при необходимости, корректировка темы; использование, по возможности, достаточно «узких» по содержанию тем диссертационных исследований.

Для повышения «устойчивости» к рискам НД ФЛ (особенно занимающие руководящие должности) нередко стремятся диверсифицировать направления НД – личной, своих аспирантов, студентов. Из-за «распыления» ресурсов это может приводить к снижению эффективности НД.

Риски ИБ, связанные с плагиатом в рамках НД, в техническом плане могут быть уменьшены за счет использования ПС автоматизированного контроля текстов научных работ – например, www.antiplagiat.ru. Однако такие ПС пока применяются лишь в части РВ и только в отношении достаточно ограниченного круга объектов НД. Отметим также неэффективность таких ПС при плагиате из иноязычных источников; специально принятых мерах корректировки содержания заимствованных текстов и пр.

Организационно-правовые меры по снижению рисков плагиата могут включать: чтение лекций по этике научной деятельности – если не студентам, то хотя бы магистрантам и аспирантам; обеспечение публичности наказаний за выявленные случаи плагиата. Отметим, что выявление плагиата в уже защищенных диссертациях не приводит к автоматической отмене присужденных ученых степеней. Формально такую отмену должны были бы осуществлять те же ученые советы, которые присудили степень. Однако такие советы имеют ограниченные сроки существования, а возможности принятия решений «по плагиату» другими советами фактически не регламентированы. С другой стороны, выявление плагиата, связанного с НД, может «поставить крест» на научной или политической карьере. Например, недавно, после выявления плагиата в диссертации двадцатилетней давности, президенту Венгрии П. Шмиту пришлось уйти в отставку [10].

Итак, сделаем выводы: 1) в настоящее время НД региональных вузов и ФЛ в них осуществляется в условиях различных ограничений, часто – конкуренции за ресурсы и тематику; 2) качественное информационное обеспечение НД – один из важнейших факторов ее результативности, снижения информационных рисков; 3) для большинства проанализированных в статье информационных рисков возможно лишь частичное управление со стороны РВ и

ФЛ; 4) принятие решений, связанных с риск-менеджментом НД, обычно осуществляется в условиях неполноты и неточности информации; 5) предложенные математические модели, связанные с управлением НД в РВ, могут быть в дальнейшем развиты в различных направлениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башкарев, А. Я. Организация управления инновационными процессами вуза / А. Я. Башкарев, Д. Ю. Нурулин, С. А. Пташкин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 6). – С. 83–88.
2. Беззубикова, С. С. О возможных подходах к распределению средств дополнительного финансирования кафедр в вузах на основе комплексных оценок качества их работы / С. С. Беззубикова, Ю. М. Брумштейн, А. А. Ветрова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 83–86.
3. Конкурентоспособность и интеллектуальный капитал вузов – анализ взаимосвязей и подходы к управлению структурой затрат / Ю. М. Брумштейн, Д. А. Каргина, Н. И. Гуськова, Н. Н. Пугина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 6). – С. 88–91.
4. Брумштейн, Ю. М. Анализ методов и математических моделей обеспечения вуза кадрами высшей квалификации / Ю. М. Брумштейн, Т. А. Горюнова, Н. Н. Пугина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 9). – С. 81–84.
5. Брумштейн, Ю. М. Анализ некоторых вопросов мотивации и управления интеллектуальной деятельностью в региональных вузах / Ю. М. Брумштейн // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 11). – С. 105–110.
6. Дворянкин, А. М. Обзор методов составления расписания вузов / А. М. Дворянкин, В. С. Чалышев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 11). – С. 110–113.
7. Долматов, А. С. Математические методы риск-менеджмента / А. С. Долматов. – М.: Экзамен, 2007. – 319 с.
8. Защита персональных данных // Высший пилотаж. Журнал группы компаний «Пилот» для бухгалтеров. – № 4(13), Август-сентябрь 2010. – С. 5.
9. Небезжин, В. П. Исследование операций и принятие решений в экономике / В. П. Небезжин, С. И. Кружилов, Ю. В. Небезжин. – М.: Форум, 2012. – 400 с.
10. Президент Венгрии Пал Шмит сегодня объявил о своей отставке [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://news.mail.ru/politics/8521168/?frommail=1> (2.04.2012, 16:21)
11. Садердинов, А. А. Информационная безопасность предприятия / А. А. Садердинов, В. А. Трайнев, А. А. Федюлов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2004. – 336 с.

УДК 72.681.3.068:63

Ю. А. Волошин

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Волгоградский государственный технический университет

voloshin-y@yandex.ru

Предложена архитектура системы автоматизированного проектирования технологий производства сельскохозяйственных культур. Описана логика работы системы. Приведен перечень входных данных системы. Представлена схема архитектуры системы.

Ключевые слова: автоматизация, система машин, система удобрений, защита растений, технология производства сельскохозяйственной культуры.

Y. A. Voloshin

ARCHITECTURE OF SYSTEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF CROP PRODUCTION TECHNOLOGIES

Volgograd State Technical University

Architecture of system of computer-aided design of crop production is offered. The logic of system working is described. The list of system input data is given. The scheme of system architecture is presented.

Keywords: automation, machine system, fertilizer system, plant protection crop production technology.

Технологии производства сельскохозяйственных культур, разработанные для крупных территорий, требуют уточнения с учетом усло-

вий конкретного поля. Это уточнение предполагает обширные знания в различных областях сельского хозяйства, которыми сельскохозяй-

ственные производители зачастую не обладают. Возникает потребность в сборе, обобщении, удобном представлении и рекомендациях по системному применению данных знаний. Эти задачи способно решить автоматизированное проектирование технологий производства сельскохозяйственных культур (ТПК) [1].

Предлагаемая в работе архитектура системы автоматизированного проектирования (далее САПР) ТПК разработана с учетом подходов, предложенных в работе [2].

САПР ТПК должна предоставлять пользователю достаточно подробные сведения о необходимых операциях, средствах и затратах для возделывания выбранной пользователем культуры при конкретных природно-климатических и ландшафтных условиях.

САПР ТПК должна выполнять следующие функции [3, 4]:

- предоставление пользователю рекомендаций по структуре севооборотов;
- автоматизированное формирование технологических карт для звеньев севооборота;
- автоматизированный подбор и расчет необходимых объемов удобрений, средств защиты растений, стимуляторов роста;
- автоматизированный подбор системы машин;
- автоматизированное формирование системы машин на основе выбранных пользователем моделей техники;
- автоматизированный расчет потребности в горюче-смазочных материалах (далее ГСМ);
- автоматизированный расчет потребности в трудовых ресурсах;
- расчет стоимости требуемых ресурсов.

Укажем способы получения требуемой информации. Рекомендованные схемы севооборотов районированы для определенных зон земледелия. Технологические карты также районированы по зонам земледелия и уточняются с учетом ландшафта полевого участка. Дозы вносимых удобрений рассчитываются исходя из содержания в почве участка питательных веществ. Дозы вносимых средств защиты растений рассчитываются на основе ожидаемого видового и количественного состава сорных растений, болезней, насекомых и животных вредителей. Система машин подбирается исходя из технологических требований к операциям, а также ландшафтной конфигурации участка. Одновременно с подбором системы машин рассчитывается потребность в ГСМ. Потребность в трудо-

вых ресурсах рассчитывается на основе технологической карты и системы машин. Расчет стоимости ресурсов производится исходя из результатов предыдущих расчетов [5, 6].

Результаты расчетов должны быть представлены в удобной для пользователя форме. Пользователю может потребоваться такая информация, как рентабельность производства, затраты на единицу площади полевого участка, затраты на различные операции и т. д. [5]. За экономические расчеты и представление информации в желаемой форме должен отвечать отдельный модуль.

Все входные данные можно разделить на данные, индивидуальные для каждого хозяйства (вводятся пользователем) и данные, общие для всех хозяйств (хранятся в базе данных).

Данные, вводимые пользователем:

- главная культура севооборота;
- предпочитаемая структура севооборота, содержащая главную культуру;
- агроклиматическая зона, в которой расположен участок;
- механические свойства почвы участка;
- размеры и рельеф участка;
- химические свойства почвы участка;
- желаемый уровень интенсивности для технологий выращивания культур, входящих в состав севооборота;
- имеющаяся в хозяйстве сельскохозяйственная техника.

Аспекты, информация по которым хранится в базе данных:

- сельскохозяйственные культуры;
- агроклиматические зоны;
- типы почв;
- севообороты, технологические операции, правила уточнения (адаптеры) технологических операций;
- болезни сельскохозяйственных культур, сорные растения, насекомые-вредители и животные-вредители;
- имеющиеся на рынке сельскохозяйственные машины, удобрения, химические средства защиты растений и стимуляторы роста;
- требуемые при производстве культур профессии [6, 7].

В последние годы все более широкое распространение в сельскохозяйственном производстве получают геоинформационные системы (ГИС), позволяющие работать с многослойными электронными картами. Из таких карт могут быть получены данные о химических и

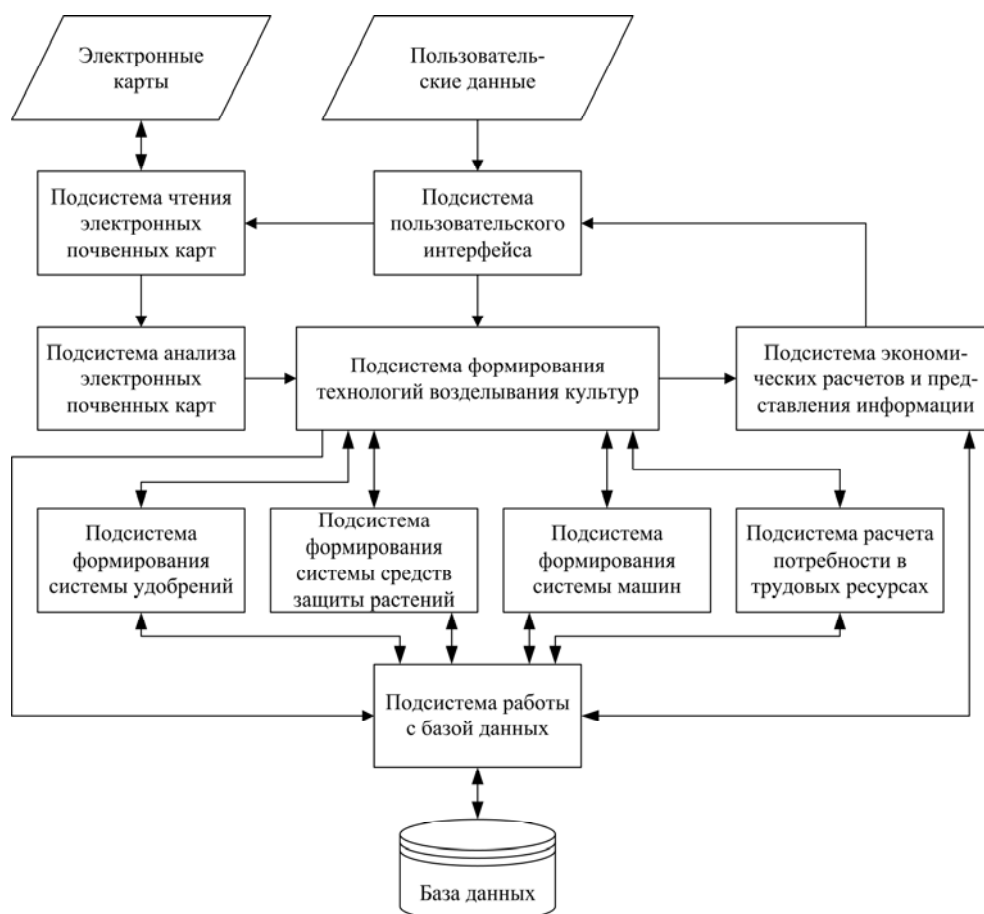
механических характеристиках участка, а также его размерах и рельефе. Сельскохозяйственная техника, оборудованная бортовыми компьютерами, может работать с такими картами и выполнять операции более точно – в частности, изменять дозу вносимых удобрений в зависимости от содержания питательных веществ в почве в конкретном месте полевого участка [5, 6]. Соответственно, для точного расчета технологических параметров операций и необходимых затрат на технологические материалы следует включить в разрабатываемую САПР ТПК возможность извлечения информации из популярных форматов почвенных карт. При загрузке в САПР ТПК такой карты пользователь должен задать соответствие между слоями карты и параметрами полевого участка.

На основании вышесказанного опишем логику работы САПР ТПК.

Вначале производится ввод данных, необходимых для расчетов. Пользователь выбирает главную культуру севооборота и указывает условия выращивания культур – сведения о климате, почве, полевом участке. САПР предлагает поль-

зователю на выбор севооборота, разработанные для указанных главной культуры и зоны земледелия. При наличии файла электронной карты полевого участка пользователь может указать этот файл, а также поставить в соответствие характеристики участка и слои электронной карты.

Для указанных пользователем данных САПР выбирает из базы подходящую технологию возделывания культуры и уточняет ее при помощи технологических адаптеров. Затем на основе технологических требований, а также карт плодородия почвы (при их наличии) производится формирование системы удобрений – выбор типов удобрений, их доз и способов внесения. Далее по данным о характерных для данной зоны земледелия вредителях, сорняках и болезнях, а также данных о текущем состоянии поля (включая данные электронных карт), САПР подбирает типы и рассчитывает необходимые дозы средств защиты растений. После формирования систем удобрений и защиты растений в технологию вносятся соответствующие уточнения. Эти шаги повторяются для каждого звена севооборота.



Архитектура САПР ТПК

После формирования точных технологических карт для севооборота производится расчет системы машин. Так как при выполнении севооборота при возделывании различных культур выгодно использовать одни и те же машины, система машин должна выбираться сразу для всего севооборота, а не для отдельных технологий поочередно. Рентабельность системы машин невозможно оценить без учета затрат на ГСМ и работающих на технике людей (трактористов, комбайнеров, механизаторов), поэтому на этом этапе проводятся соответствующие расчеты [8]. Из подобранных моделей техники составляются машинно-тракторные агрегаты (МТА) для всех технологических операций всех рассчитываемых технологий. Таким образом, после этого шага в памяти САПР хранятся полностью готовые технологии возделывания культур.

Предложенная нами архитектура САПР ТПК спроектирована на основе приведенной логики работы (см. рисунок).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аксёнова, О. В. Использование информационных систем в ландшафтном земледелии / О. В. Аксёнова // Аграрное и земельное право. – 2008. – № 2. – С. 73–74.
2. Вахранев, И. Б. Методика построения архитектуры информационных систем / И. Б. Вахранев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 7). – С. 74–80.
3. Каличкин, В. К. Автоматизированное проектирование севооборотов / В. К. Каличкин, А. И. Павлова // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2008. – № 12. – С. 5–11.
4. Лопатина, Л. М. Создание автоматизированной системы мониторинга, анализа, прогноза и управления продуктивностью сельскохозяйственных культур / Л. М. Лопатина, Е. В. Луценко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2003. – № 2. – С. 111–120.
5. Понькина, Е. В. Разработка системы информационной поддержки процессов управления производством продукции растениеводства / Е. В. Понькина, О. В. Русакова // Известия Алтайского государственного университета. – 2006. – № 1. – С. 74–75.
6. Программирование урожайности сельскохозяйственных культур при возделывании их с применением инновационных технологий: монография / А. С. Овчинников, И. Б. Борисенко, Ю. Н. Плещачёв. – Волгоград : Волгоградская ГСХА, 2011. – 124 с.
7. Савченко, О. Ф. Методологические аспекты создания информационных систем в сельском хозяйстве / О. Ф. Савченко // Достижения науки и техники АПК. – 2006. – № 11. – С. 5–10.
8. Ткаченко, В. В. Система поддержки принятия решений для управления экономическими параметрами в растениеводстве / В. В. Ткаченко // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. – 2009. – № 96. – С. 110–114.

УДК 004.83:[656.13:338.47]

Л. С. Кригер, И. Ю. Квятковская

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ УСЛУГ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Астраханский государственный технический университет
kriger_l@mail.ru

В статье рассматривается социальный критерий эффективности работы общественного транспорта, в качестве которого выступает индекс удовлетворенности пассажиров транспортными услугами. Приводится оценка удовлетворенности потребителей услуг городского электротранспорта путем построения его интеллектуальной модели.

Ключевые слова: индекс удовлетворенности, интеллектуальная модель, электротранспорт.

L. Kriger, I. Kvyatkovskaya

INTELLECTUAL MODEL SATISFACTION EVALUATION OF CONSUMER SERVICES URBAN PASSENGER ELECTRIC

Astrakhan State Technical University

The article deals with the social criterion of the efficiency of public transport, which serves as an index of satisfaction with passenger transport services. The evaluation of customer satisfaction municipal electric service by building its intellectual model.

Keywords: index of satisfaction, mental model, electric transport.

К числу важнейших отраслей жизнеобеспечения городов относится пассажирский транспорт, от функционирования которого зависит

как работа хозяйственного комплекса, так и качество жизни населения. Интерес к проблеме организации движения общественного транс-

порта растет вместе с усложнением схемы транспортных потоков, увеличившейся конкуренцией в данной отрасли и динамикой изменения пассажиропотока.

Учитывая ярко выраженную социальную значимость общественного транспорта и то, что транспортные организации являются производителями пассажирских услуг, максимальный доход от пассажирских перевозок возможно получить лишь при условии мини-

мизации транспортных расходов. С точки зрения конечных потребителей услуги, в качестве критерия эффективности работы общественного транспорта выступает индекс удовлетворенности, который характеризует социальных эффект.

На основе анализа рассматриваемой задачи и опроса экспертов предметной области были выделены факторы, влияющие на удовлетворенность потребителей (рис. 1).

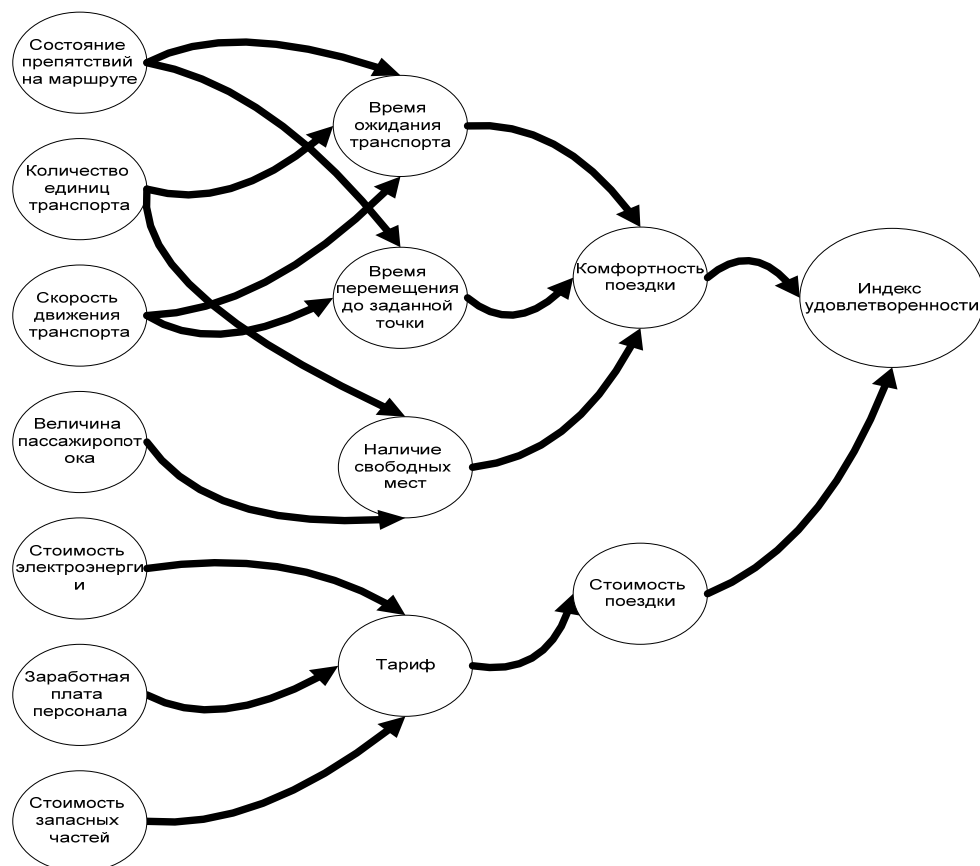


Рис. 1. Семантическая структура параметров, влияющих на определение индекса удовлетворенности

На рисунке приведена графическая структура в виде семантической сети, показывающей направления влияния факторов, определяющих степень удовлетворенности потребителей I_2 .

Для получения значения индекса удовлетворенности I_2 , расположенного в интервале $[0; 1]$ воспользуемся наиболее подходящим способом, а именно аппаратом продукционных правил. Задача получения I_2 сводится к тривиальной задаче построения правил вида «ЕСЛИ ..., ТО» (продукционных правил), для участков семантической сети с одной выходной переменной.

Разобьем полученную графическую структуру на несколько элементарных участков:

«Время ожидания транспорта» t_0 – переменная, на которую оказывают влияние переменные «Состояние препятствий на маршруте» S_p и «Количество единиц транспорта» N ; «Время перемещения до заданной точки» t_z – переменная, на которую оказывают влияние переменные «Состояние препятствий на маршруте» S_p и «Скорость движения транспорта» v_N ; «Наличие свободных мест» B_N – переменная, на которую оказывают влияние переменные «Количество единиц транспорта» N и «Величина пассажиропотока» Q_I ; «Тариф» T – переменная, на которую оказывают влияние пере-

менные «Стоимость электроэнергии» q_E , «Зарботная плата персонала» q_Z и «Стоимость запасных частей» q_C ; «Комфортность поездки» K – переменная, на которую оказывают влияние переменные «Время ожидания транспорта» t_o , «Время перемещения до заданной точки» t_Z и «Наличие свободных мест» B_N ; «Стоимость поездки» C – переменная, на которую оказывают влияние переменная «Тариф» T ; «Индекс удовлетворенности» I_2 – переменная, на которую оказывают влияние переменные «Комфортность поездки» K и «Стоимость поездки» C .

Ряд переменных входящих в модель оценки индекса удовлетворенности представлен четкими значениями (t_o , N , t_Z , v_N , B_N , Q_i , T , q_E , q_Z , q_C , C), а некоторые лингвистическими, выраженными в вербальной форме (S_p , K , I_2). Оба типа переменных для построения продукционных правил необходимо представить в виде лингвистических переменных (ЛП), заданных своими терм-множествами [2]. Терм-множество переменной следует задавать в виде:

$$x_k = \{BND, MND, SND, N, SPD, MPD, LPD\}, \quad (1)$$

где B – большое, M – среднее, S – малое, D – отклонение, в N -отрицательном, P -положительном направлении от N -нормального значения.

Для формализации качественной информации воспользуемся следующими исходными данными. В качестве базового универсального множества (универсум) U для неизмеряемых величин примем диапазон $[0; 1]$, а функции принадлежности зададим, используя известное

выражение (2). В качестве числа $(L - R)$ -типа выберем Гауссову ФП:

$$\mu(u_i) = e^{-(u_i - c)^2 / \lambda}. \quad (2)$$

Переход в область реальных значений будем осуществлять с применением принципа обобщения [1], который можно выразить с помощью равенства:

$$g_i = g_0 + u_i k_m, \quad (3)$$

где g_i – значение параметра, соответствующее значению u_i базового универсального множества; g_0 – начальное значение параметра G ; k_m – масштабный коэффициент перехода.

Используя описанный подход, определим ФП для каждой ЛП, представляющей соответствующий параметр (см. таблицу). На рис. 2 отражены примеры терм-множеств лингвистических переменных математической модели индекса удовлетворенности. Для переменной S_p значение BND – препятствий нет; LPD – маршрут максимально загружен (пробка, авария и т. д.). Для N значение BND – на маршруте находится десятая часть подвижного состава (1–2 единицы); LPD – на маршруте находится максимально возможное число единиц транспорта. Для t_o значение BND – время ожидания минимально (не более 1 мин); LPD – время ожидания приближается к пороговому значению ожидания единицы транспорта (10 мин). Для v_N значение BND – скорость движения минимальна; LPD – скорость движения максимальна. Для t_Z значение BND – время перемещения до заданной точки минимально (не более установленного регламентом при свободном маршруте и максимальной скорости движения – 60 км/ч); LPD – время перемещения до заданной точки максимально.

Функции принадлежности ЛП

Название переменной	Параметр ФП	BND	MND	SND	N	SPD	MPD	LPD
Время ожидания транспорта	u	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]
	c	1	3	4	5	7	8	9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Состояние препятствий на маршруте	u	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]
	c	1	3	4	5	7	8	9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Количество единиц транспорта	u	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]
	c	1	3	4	5	7	8	9
	λ	1	1	1	1	1	1	1

Окончание таблицы

Название переменной	Параметр ФП	BND	MND	SND	N	SPD	MPD	LPD
Время перемещения до заданной точки	u	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]
	c	10	20	25	30	45	50	60
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Скорость движения транспорта	u	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]	[5;60]
	c	10	20	25	30	45	50	60
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Наличие свободных мест	u	[1;30]	[1;30]	[1;30]	[1;30]	[1;30]	[1;30]	[1;30]
	c	5	10	12	15	23	25	28
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Величина пассажиропотока	u	[5;80]	[5;80]	[5;80]	[5;80]	[5;80]	[5;80]	[5;80]
	c	8	20	30	40	52	70	78
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Тариф	u	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]
	c	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Стоимость электроэнергии	u	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]
	c	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Зарботная плата персонала	u	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]
	c	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Стоимость запасных частей	u	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]
	c	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Комфортность поездки	u	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]	[1;10]
	c	1	3	4	5	7	8	9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Стоимость поездки	u	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]
	c	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
	λ	1	1	1	1	1	1	1
Индекс удовлетворенности	u	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]	[0;1]
	c	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9
	λ	1	1	1	1	1	1	1

Для Q_i значение BND – пассажиропоток небольшой, LPD – пассажиропоток максимальный. Для переменной B_N значение BND – количество свободных мест минимальное (свободные места отсутствуют); LPD – количество свободных мест максимальное (все места свободны). Для T , q_E , q_Z , q_C , C значение MND – параметр имеет значение «низкий»; N – пара-

метр имеет значение «средний»; MPD – параметр имеет значение «высокий». Для K значение BND – комфортность находится на самом низком уровне; LPD – комфортность находится на самом высоком уровне. Для I_2 значение BND – индекс удовлетворенности находится на самом низком уровне; LPD – индекс удовлетворенности находится на самом высоком уровне.

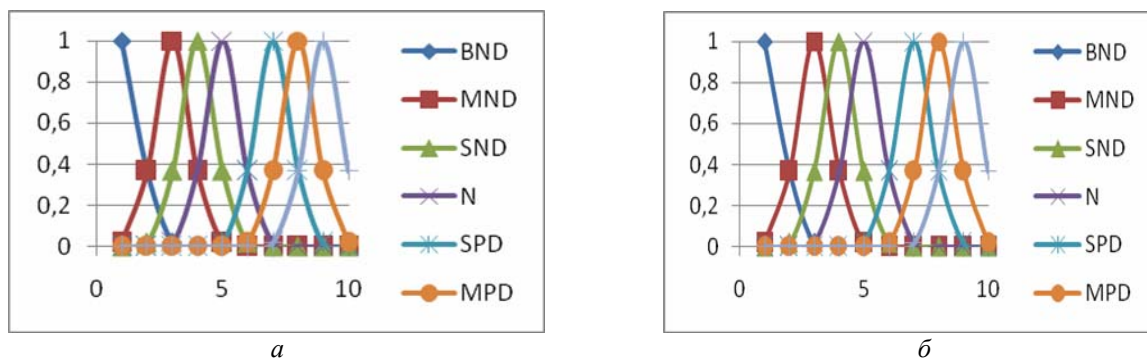
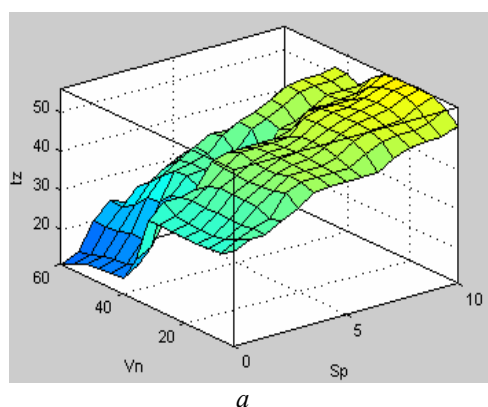


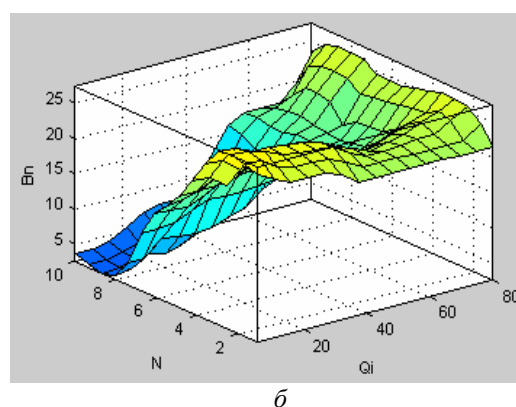
Рис. 2. Примеры терм-множеств ЛП математической модели I_2 :
а – ЛП «Время ожидания транспорта»; б – ЛП «Количество единиц транспорта»

Составим продукционные правила для описания каждого элементарного участка семантической структуры, изображенной на рис. 1. Разработано 21 правило для определения «Время ожидания транспорта» t_0 , «Время перемещения до заданной точки» t_z , «Наличие

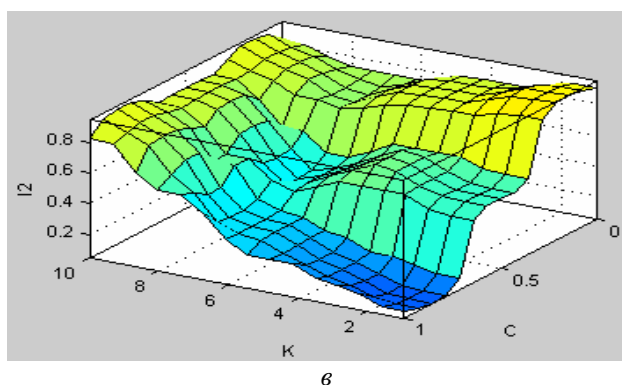
свободных мест» B_N ; 27 правил для определения «Тариф» T и «Комфортность поездки» K ; 3 правила для определения «Стоимость поездки» C . В результате было составлено 21 правило для определения «Индекс удовлетворенности» I_2 .



а



б



в

Рис. 3. Поверхность отклика для лингвистических переменных:
а – время перемещения до заданной точки; б – наличие свободных мест; в – индекс удовлетворенности потребителя

Учитывая вид функций принадлежности, порядок модели и количество правил, а также вычислительную сложность и возможность программной реализации указанных алгоритмов, используем в качестве базового алгоритм нечеткого вывода Мамдани [4].

На рис. 3, а–в представлены поверхности отклика, полученные для участков семанти-

ческой структуры, изображенной на рис. 1. Данные поверхности показывают зависимость выходной ЛП от набора входных переменных [5]. Для выявления чувствительности математической (интеллектуальной) модели расчета индекса удовлетворенности соберем схему в пакете Simulink (рис. 4). При этом значения входных ЛП модели (S_p , N , v_N ,

Q_i, q_E, q_Z, q_C) задаются либо вручную, либо с помощью генератора, последовательно изменяющего значения от минимального до

максимального. Структурная схема генератора значений входных переменных приведена на рис. 5.

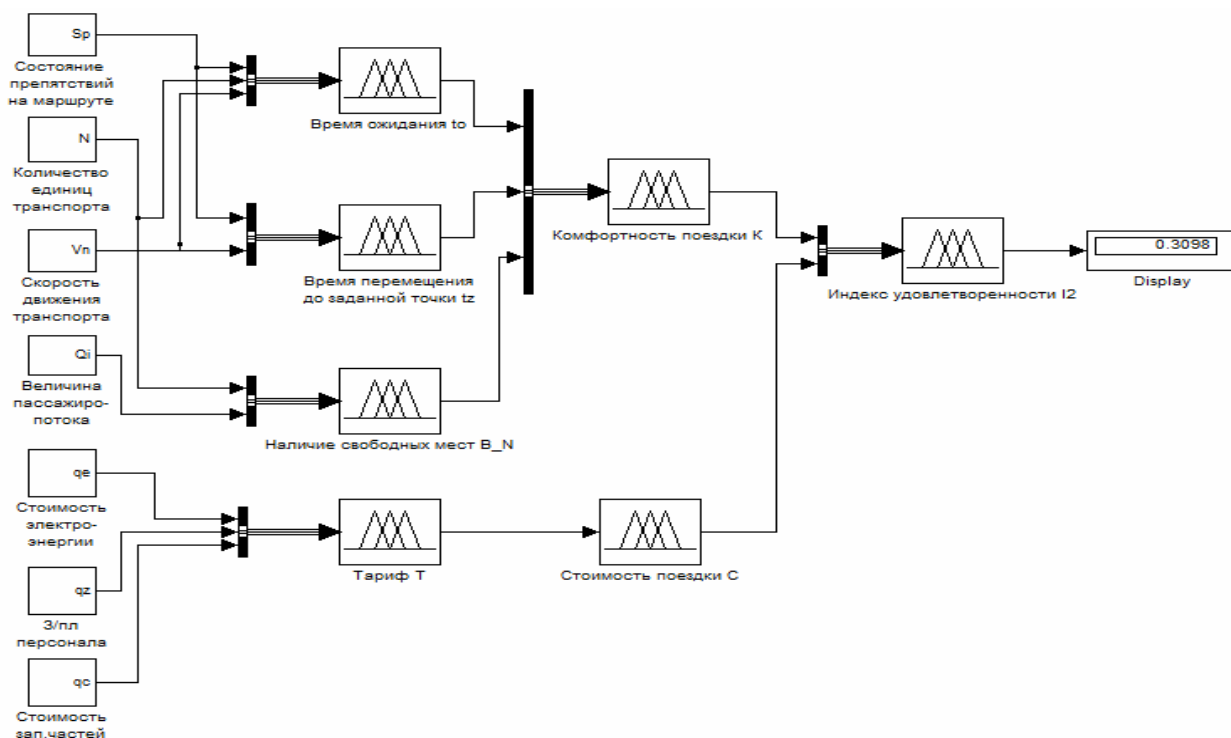


Рис. 4. Структурная схема интеллектуальной модели расчета индекса удовлетворенности

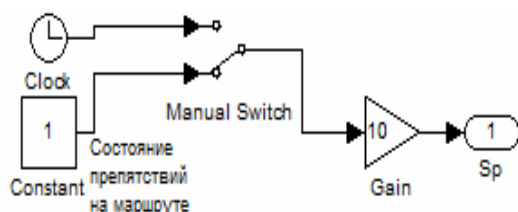


Рис. 5. Структурная схема генератора значений входных переменных на примере ЛП «Состояние препятствий на маршруте»

Таким образом, с помощью имеющийся модели можно оценить удовлетворенность потребителей услуг городского пассажирского электротранспорта, а также определить чувствительность модели к изменению значений входных переменных, типовых ситуаций [3], возникающих на маршруте при движении общественного транспорта, а также выявить влияние внешних факторов, таких как стои-

мость электроэнергии, на изменение индекса удовлетворенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А. Н. Аверкин [и др.] ; под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
2. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976.
3. Мелихов, А. Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин. – М.: Наука, 1990.
4. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // Int. J. Man Mach. Studies, 1975. – Vol. 7. – № 1.
5. Tong R.M. The Construction and Evaluation of Fuzzy Models // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications / Eds by M.M. Gupta, R.K. Ragade, R.R. Yager. Amsterdam: North-Holland, 1979.

УДК 681.3

© Б. Х. Санжапов*, Н. В. Буханцева**, И. А. Дудина**, А. Н. Буханцев**

**ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ИНТЕРФЕЙС НА ОСНОВЕ «УМНЫХ АГЕНТОВ»
ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБУЧЕНИЕМ В ВУЗЕ**

* Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

** Волгоградский государственный университет

wild.@volsu.ru, dudina777@gmail.com, nina.buhantseva@volsu.ru

В статье рассматриваются преимущества электронного пользовательского интерфейса на основе «умных агентов» (УА) как альтернатива электронному образовательному portalу вуза для отбора и персонализации контента виртуальной обучающей системы. Авторы показывают, как интерфейс может использоваться для структурированной навигации и адаптации системы поиска учебных материалов к уровню подготовки и потенциалу обучаемости студентов.

Ключевые слова: электронный пользовательский интерфейс, «умные агенты», система управления обучением, виртуальная обучающая система, электронный образовательный портал.

B. Kh. Sanzhapov, N. V. Buhantseva**, I. A. Dudina**, A. N. Buhantsev*****INTELLEAGENT AGENT-BASED USER INTERFACE
FOR UNIVERSITIES' LEARNING MANAGEMENT SYSTEMS**

* Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

** Volgograd State University

The paper discusses the benefits of designing intelligent agent interface for university learning management systems as an alternative to the traditional e-portal. The interface is designed to retrieve, filter and personalize the content of the learning system. The authors demonstrate how the interface may structure and adapt users' search of learning materials to their relevant levels and learning potential.

Keywords: intelligent user interface, intelligent agents, learning management system, virtual tutoring system, electronic educational portal.

Введение

Электронные пользовательские интерфейсы на основе «умных агентов», которые в последние два десятилетия называют неотъемлемыми элементами репрезентации различных областей знания и информации, достаточно подробно изучены [15], однако данные об их практическом применении в системах управления обучением (learning management systems, LMS) стали появляться совсем недавно. Первоначально «умные агенты» электронных систем вузов предназначались для структурирования информации и защиты от «информационных взрывов», поддержки рабочего стола, создания информационных фильтров, корректировки работы пользователя с источниками информации [10, 11, 6, 13]. Сегодня требования к системам управления образовательным процессом возрастают: от них ожидают выполнения задач улучшения интерактивного обмена информацией; автономной деятельности от имени пользователя; контекстной помощи во время самостоятельной подготовки и организации совместной учебной деятельности студентов [3, 4]. В связи с этим общее электронное пространство вуза или виртуальное академическое сообщество [8] все чаще рассматривается с точки зрения эффективности организации всей системы компьютерно-опосредованной коммуникации в вузе и взаимодействия конкретной системы управления обучением с пользователем.

Для целей данной статьи понятие «умный агент» трактуется как абстрактная функциональная система: подобная, но не идентичная реальной компьютерной программе. Основной характеристикой и смыслом создания «умных агентов» является их автономное и рациональное поведение [14; 33], цель которого – выполнение заданий от лица пользователя. Данная трактовка понятия «умный агент» отличается от существующего термина в информатике, где агент, выполняющий задание по анализу данных, делает это независимо от того, рационально его поведение или нет.

Виртуальные академические сообщества имеют интересные наработки в области автоматизации рутинных задач, осуществляемых студентами-пользователями электронных порталов и систем управления обучением, что позволяет им концентрироваться на выполнении более важных заданий преподавателя [9]. Однако создание интерфейсов для поиска и адап-

таци

тации учебных материалов на основе умных агентов, способных наблюдать и фиксировать в течение определенного времени предпочтения пользователей с учетом уровня их подготовки и потенциала обучаемости, до сих пор представляется довольно сложной задачей.

Варианты виртуальных академических сообществ, существующие в виде традиционных образовательных порталов и электронных учебных комплексов, сегодня уже не соответствуют актуальным требованиям компетентного подхода по индивидуализации обучения и организации взаимодействия студентов и преподавателей. Так, региональный портал знаний, представлявший собой саморазвивающуюся научно-образовательную систему, предназначен только для информационно-методического обеспечения образовательного процесса. Его результативность ограничена решением задач организации структурированного доступа к максимальному количеству предметных разработок и создания технологии размещения авторских разработок самими авторами ресурсов [1; 2]. В Волгоградском государственном университете также создан электронный учебно-методический комплекс (УМК) для внесения, хранения и замены устаревших образовательных ресурсов ограниченного набора форматов по конкретным программам подготовки специалистов. Дополняя этот ресурс, в отдельных программах с 2010 года используется авторский сайт Google для организации интерактивной самостоятельной работы студентов в больших группах [4; 5; 27].

Выполняя поставленные перед системами задачи, данные виртуальные структуры имеют ряд недостатков. Недостаток портала заключается в его самоорганизации, из-за чего возникает избыточность связей (много-ко-многим), что повторяет проблемы поисковых систем глобальной сети. УМК университета, наоборот, ограничен конкретной организацией, конкретными программами подготовки, ограниченным доступом пользователя к информационным ресурсам других специальностей и направлений подготовки, а также небольшим количеством форматов файлов. Сайты Google являются открытым ресурсом со множеством мультимедийных интерактивных возможностей, но, в основном, для управления учебным процессом в рамках одной дисциплины [7].

Работа исследователей Университетского колледжа Дублина (University College Dublin)

по созданию системы электронных тьюторов ABITS на основе умных агентов позволила им внедрить систему пользовательского моделирования для поиска, отбора и персонификации обучающего контента [9]. Для системы высшего образования Ирландии, в которой существует институт тьюторов, данная разработка 2005 года была революционной с точки зрения совмещения консультативных возможностей реальных и виртуальных тьюторов, прежде всего, для расширения доступа к учебным и научным материалам, а также мониторинга и сравнительного анализа успеваемости студентов одного и нескольких вузов. Для российской высшей школы, где фактически не существует института академических консультантов, система виртуального тьюторства с удобным пользовательским интерфейсом представляется еще более актуальной.

Цель и методология создания электронного пользовательского интерфейса

Авторы данной статьи исходят из того, что целью создания современной электронной обучающей системы является не простое архивирование и даже регулярное обновление образовательного контента, но, прежде всего, интеракция пользователя с системой. Поняв потребности, интересы и уровень знаний и умений пользователя, «умные агенты» обучающей системы способны выводить необходимую ему информацию в нужное время и в самой подходящей для него форме. Известно, что интерфейсы, основанные на прямых манипуляциях, грешат перенасыщенностью неструктурированной и неадаптированной к нуждам пользователя информацией, которую те не в состоянии адекватно воспринимать и обрабатывать. Поэтому система навигации, которая используется в Интернете и в университетских платформах, несовершенна именно в части интеракции человека с компьютером во многих доменах. Использование фильтров поисковиков, например, фильтров Google, представляет, скорее, киберэтическую проблему, а не решение конкретных задач поиска для пользователя открытых ресурсов.

Идея применения «умных агентов» в системах управления обучением ориентирована на создание таких рамок компьютерно-опосредованной коммуникации, при которых взаимодействие человека и интерфейса поисковой системы приобретет новый смысл рациональ-

ной, адаптивной и персонифицированной поддержки пользователя. В основу реализации идеи пользовательского интерфейса на основе «умных агентов» положено сочетание кластерного подхода к моделированию типажа пользователей и логической аргументации, основанной на реальных ситуациях обучения. В этом случае ценность приобретенных студентом компетенций определяется не простым увеличением потока знаний и информации, а улучшением взаимодействия между обучающей системой и пользователем.

Для создания пользовательского интерфейса на основе умных агентов авторы использовали синергетический подход: технологии саморазвивающегося портала и УМК с их структурированными ресурсами по определенным признакам направлений подготовки интегрируются с технологией свободного выбора того или иного направления подготовки «под присмотром» «умного агента». Синергия обоснована положительным опытом использования имеющихся порталных технологий в виртуальных образовательных системах, относительной простотой создания интерфейса с помощью шаблона, эффективной самоорганизующейся навигацией, возможностью обработки большого объема информации, которую можно разместить на странице в разнообразных форматах, а также хорошим интерактивным потенциалом страниц.

Таким образом, целью создания электронного пользовательского интерфейса на основе «умных агентов» для технологий открытого доступа является развитие обучающего ресурса для удовлетворения индивидуальных уровней способностей и потребностей в знаниях и умениях; адаптивного развития компетенций студентов с различными стилями и возможностями обучения, а также для помощи преподавателям в персонализации контента, выборе способов презентации учебного материала, мониторинга и контроля приобретаемых студентами компетенций.

Данный ресурс может использоваться в учебном процессе в сочетании с индивидуальными методиками компетентностного и адаптивных подходов, различными видами аудиторной учебной деятельности, а также в организации самостоятельной работы студентов, доля которой в программах бакалавриата и магистратуры составляет не менее 50 % от аудиторной.

Модели адаптации электронного пользовательского интерфейса к потребностям пользователя

Электронный пользовательский интерфейс на основе «умных агентов» – это посредник между человеком и компьютером, который предназначен для оптимизации их взаимодействия путем представления, аргументации и воздействия на модели пользователя, домена, заданий и коммуникации с помощью разнообразных медийных средств. В связи с этим возникают этические проблемы контроля, предсказуемости, использования, конфиденциальности и доверия пользователей обучающей системы друг к другу. Такие проблемы могут решаться проактивно с помощью институциональных инструментов, регулирующих использование электронных интерфейсов и ограничивающих доступ к ним тех пользователей, которые не следуют правилам этического кодекса вуза.

В электронном пользовательском интерфейсе, основанном на «умных агентах», каждому пользователю придан «обучающий ассистент», который поможет ему выполнять задания обучающей системы. Агенты идеально подходят для таких заданий, как поиск, обмен и отбор информации, совместная работа в системе, консультационная работа. Обучающий ассистент взаимодействует с другими агентами в поиске учебного материала, организации собраний, мониторинге домашних страниц преподавателей и студентов, объявлений, новостей, заданий и сроков их выполнения.

Типичная система электронного пользовательского интерфейса на основе «умных агентов» состоит из следующего набора моделей адаптации к потребностям обучающихся:

- модель пользователя;
- модель домена;
- модель заданий для пользователя;
- модель коммуникации пользователя и системы.

Модель пользователя описывает, что система знает об определенном пользователе: привычки, данные профиля, цели и предпочтения в обучении, начальный уровень подготовки.

Модель домена определяет масштаб или рамки системы и содержит информацию об области ее применения.

Модель заданий содержит описание всех заданий, которые пользователь может выполнить в системе.

Модель интеракции между пользователем и системой использует информацию о взаимодействии пользователей с системой для того, чтобы изменять элементы интерфейса и модели пользователя.

Моделирование пользователя – центральное понятие обучающей системы на основе «умных агентов». Используя такую информацию о пользователе, как цели, предпочтения типа медийных файлов и контентов, модель пользователя оптимизирует эффективность и функциональность интерфейса. При этом она сама становится активным участником интеракции. Одной из первых систем такого типа была система GRUNDY, разработанная Rich [12]. В ней модель стереотипа пользователя строится путем синтеза информации, которую система получает, фиксируя повторяющиеся действия пользователя, т. е. выводит стереотипы, к которым принадлежат те или иные пользователи.

Мониторинг и запись взаимодействия пользователя с системой используются для пересмотра принадлежности пользователя к стереотипу и информации, содержащейся в самих стереотипах. Примеры создания стереотипа пользователя для электронного интерфейса с умными агентами достаточно изучены и применяются во многих системах управления обучением на основе технологий Blackboard и Moodle, а также в электронных порталах рос-

сийских вузов. Более сложным вопросом является адаптация электронного интерфейса к потребностям пользователя, которые могут меняться в реальном времени.

Для адаптации к потребностям пользователя система пользовательского интерфейса использует и рекомендации умных агентов, и модель пользователя. Однако она может повысить свою эффективность, если будет комбинировать возможности агента, который создает пользовательскую страницу, и возможности компоновщика страниц: первый выбирает шаблон страницы и просит второго сконструировать индивидуальные компоненты для пользователя на этой странице. Компоновщик делает это и возвращает страничному агенту готовый вариант, адаптированный к потребностям пользователя.

Существуют и другие возможности улучшения адаптивности системы пользовательского интерфейса. Например, адаптивная система гипертекста ведет пользователя к подходящему для него материалу. Адаптация связи базируется в этом случае на понимании требований к отношениям между системой и пользователем. Адаптация контента происходит с помощью дополнительной или альтернативной информации, подаваемой пользователю. Типы медийных файлов, обучающий контент и частота подачи его частей включены в процесс выбора для того,



Рис. 1. Рамка для адаптации системы на основе «умных агентов»

чтобы персонализировать материал для конкретного пользователя. На рис. 1 показана рамка для адаптации системы на основе «умных

агентов». Из рисунка видно, что агенты используются для выбора расположения материала на странице, типа контента и его формата.

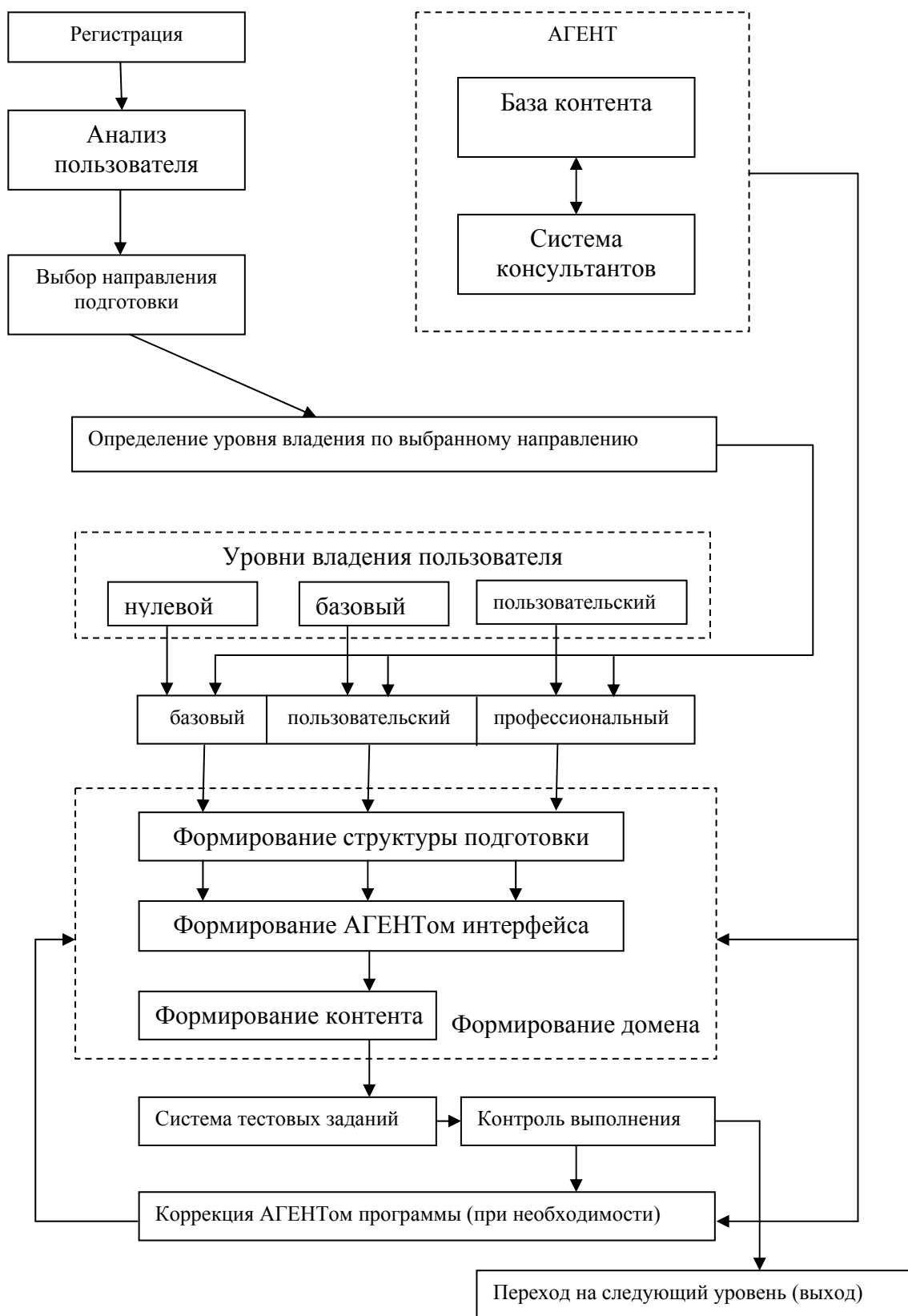


Рис. 2. Структура электронного интерфейса с использованием умных агентов

Контент выбирается на базе следующих критериев: предпочтений пользователя, которые включают выбор формата и расположение материала на странице; рекомендаций агентов преподавателя (предлагаемый учебный материал, выделенные проблемы), рекомендаций агентов данного курса (описание материала, который должен быть освоен по учебному плану). Адаптация достигается следующим образом: обучающий агент получает просьбу от веб-браузера и на основе модели пользователя и информации, полученной о его интеракции с системой, выбирает разделы информации для ответа на запрос. Обучающий агент затем передает информацию о материале составителю страниц, который выбирает из имеющегося набора дизайн страницы исходя из типа контента, который нужно показать пользователю (простой текст, текст с рисунками, мультимедиа и др). Выбрав дизайн страницы, составитель отправляет его компоновщику, который выбирает нужный набор компонентов для наполнения страницы, базируясь на предпочтениях пользователя и типа учебного материала, и возвращает составителю для наполнения страницы в выбранном оформлении.

Структура пользовательского интерфейса

Авторами разработана трехмодульная структура пользовательского интерфейса на основе «умных агентов», в которую инкорпорированы модели пользователя, домена, заданий и интеракции пользователя с системой (рис. 2).

Модуль агента. Структура модуля включает в себя два блока – базу данных с интерфейсом доступа к сегменту по признакам направления программы подготовки и блок консультантов-преподавателей, формирующих сегменты структуры базы контента. Преподаватель формирует базу данных согласно структуре программы направления подготовки. Таким образом, модулю агента придана система консультантов, своеобразных «обучающих агентов», которые информированы о знаниях и целях пользователя, представленных в его модели, и отвечают за постоянное обновление и пересмотр модели пользователя на основе обратной связи с ней.

Модуль определения уровня пользователя. Для определения уровня пользователя предлагается ряд тестовых заданий по выбранному направлению. В зависимости от результатов выполнения тестов предлагается уровень подготовки по дисциплинам.

Модуль формирования интерфейса домена. Интерфейс домена формируется агентом по определенным признакам (выбранному направлению подготовки, начальному уровню знаний в выбранной области, предпочтениям пользователя в организации контента, предполагаемому результату подготовки). По структуре интерфейса выбирается контент базы данных, структура и интерфейс страницы домена, а также модель взаимодействия пользователя с интерфейсом.

Все этапы взаимодействия системы с пользователем контролируются блоком тестовых заданий, как самим пользователем, так и агентом, корректирующим, при необходимости, структуру и последовательность изучения предлагаемого контента.

Применение «умных агентов» не ограничивается поддержкой рабочего стола пользователя, они организуют сотрудничество в уровне отбора информации, предлагают пользователю альтернативные действия по ее организации и представлению в разных форматах. Пользователь получает следующие преимущества от использования такого интерфейса:

- дружественное по отношению к пользователю поведение системы;
- автономное функционирование агентов от имени пользователя;
- контекстная помощь пользователю в процессе обучения;
- поощрение совместной работы пользователей.

Заключение

Рассмотренный вариант создания электронного пользовательского интерфейса на основе «умных агентов» позволяет решать такую важную проблему компьютерно-опосредованной коммуникации, как организация взаимодействия пользователя с системой управления обучением. В связи с введением государственных образовательных стандартов третьего поколения, определяющих компетентностный и проблемно-ориентированный подходы к подготовке бакалавров и магистров, функции электронных порталов вузов будут изменяться. Системы хранения, передачи информации и рутинного тестирования трансформируются в электронные системы управления аудиторной и самостоятельной работой студентов.

Наряду с использованием «умных агентов» для автоматизации процесса проверки выполняемых студентами обязательных заданий, не менее важны такие аспекты, как уровневое

формирование и структурирование обучающего контента и периодическая оценка самих «умных агентов» пользователем. Дальнейшее исследование возможностей электронных пользовательских интерфейсов должно быть посвящено проблеме выявления недостатков системы по сравнению с прямым поиском информации и улучшению автономного взаимодействия «умных агентов» с интерфейсом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буханцева, Н. В. Реализация деятельностного подхода при проектировании научно-образовательного портала Волгоградского государственного университета / Н. В. Буханцева, А. А. Воронин // Материалы научно-методической конференции «Современные информационные технологии в образовании: Южный федеральный округ». – Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2004. – С. 52–54.
2. Воронин, А. А. Модель оптимального управления структурными изменениями организационной системы / А. А. Воронин, С. П. Мишин // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 8. – С. 136–150.
3. Дудина, И. А. Управление применением информационно-коммуникационных технологий в образовательном процессе / И. А. Дудина // Образование, наука, бизнес. – Череповец: ИМИТ СП-б ГПУ, 2005. – С. 58–62.
4. Санжапов, Б. Х. Информационное пространство как форма существования и интеграции предметно-ориентированных информационных систем / Б. Х. Санжапов, Н. В. Буханцева, А. Н. Буханцев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2010. – № 6. – С. 44–49.
5. Санжапов, Б. Х. Портал знаний: модель развития информационного образовательного пространства региона / Б. Х. Санжапов, Н. В. Буханцева, А. Н. Буханцев // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления,

вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 7). – С. 112–115.

6. Chin D. Intelligent Interfaces as Agents. In J.W. Sullivan & S.W. Tyler (Eds), *Intelligent User Interfaces*. – New York: ACM Press, 1991. – Pp. 177–206.

7. Dudina I. Using the Google Sites Technology to Teach Undergraduate Courses. *Readings in Technology and Education. Proceedings of ICICTE 2011* / In Ken Ferstrom (Ed), *Proceedings of the International Conference on Information Communication Technologies in Education*. – Abbotsford: University of Fraser Valley Press, July 8–10, 2011. – Pp. 131–139.

8. Karageorgopoulos C., Karabinis V. A New Understanding of Educational Community in Virtual Terms as Implemented in Educational Institutions: The Potential of Vircom-LT / In Ken Ferstrom (Ed), *Proceedings of the 5th International Conference on Information Communication Technologies in Education*. – Athens: INEAG, 2005. – P. 157–164.

9. Kilbride J., Mangina E. Intelligent User Interfaces for Higher Education Tutoring Systems / In Ken Ferstrom (Ed) *Proceedings of the 5th International Conference on Information Communication Technologies in Education*. – Athens: INEAG, 2005. – P. 127–132.

10. Maes P. Agents that reduce work and Information Overload // *Communications of the Association for Computing Machinery*, 32(7). – 1994. – P. 31–40.

11. Murugesan S. Intelligent Agents on the Internet / In IEEE Industry Application Society (Eds) *IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control*, Vol.1. – New Delhi: IEEE Computer Society Press, 1998. – P. 97–102.

12. Rich E. User Modeling via Stereotypes // *Cognitive Science*, 3, 1979. – P. 329–354.

13. Roche B., Mangina E., 2003. Agent-based Framework for Intelligent Tutoring Systems within University College Dublin (UCD) / In Ken Ferstrom (Ed), *Proceedings of the 4th International Conference on Information Communication Technologies in Education*. – Athens: INEAG, 2003. – P. 219–224.

14. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (2nd ed.). – Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2003. Chpt. 2. – P. 33.

15. Salamon, T. (2011). *Design of Agent-Based Models*. – Repin: Bruckner Publishing. – P. 42–59.

УДК 502.5: 004.942

Б. Х. Санжапов, А. А. Мурадов

МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАЗВИТИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ*

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет
sbkh@mail.ru

Исследуется возможность применения методов нечеткой логики для исследования проблем экологической безопасности развития городских территорий. Рассмотренный подход проиллюстрирован на примере негативного воздействия автотранспорта на окружающую среду. Оценка эффективности решений основывается на использовании метода Мамдани.

Ключевые слова: нечеткая логика, лингвистическая переменная, принятие решений, экологическая безопасность, экспертная оценка.

B. Kh. Sanzhapov, A. A. Muradov

DECISION MAKING MODEL OF URBAN DEVELOPMENT AT ECOLOGICAL SAFETY MAINTENANCE

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

The Fuzzy Logic application for research of urban development problems at ecological safety maintenance is considered. The proposed approach is illustrated on an example of negative influence of motor transport on environment. The estimation efficiency of a solution is based on a Mamdani method.

Keywords: Fuzzy Logic, Linguistic Variable, Decision Making, Ecological Safety, Expert Estimation.

* Работа поддержана грантом РФФИ. № проекта 11-07-97010 p – поволжье_a

На современном этапе наиболее загрязненными участками являются городские и пригородные территории. В связи с этим необходимо использовать существующие и разрабатывать новые методы принятия проектных решений, с помощью которых можно прогнозировать развитие городской среды с учетом экологической безопасности.

В настоящее время принятая система проектирования развития урбанизированных территорий на основе оценки влияния на окружающую среду (ОВОС) в недостаточной мере использует экспертные оценки.

Это обусловлено, в частности, отсутствием научной базы, требованием прогноза только ограниченного количества показателей и другими причинами.

Экспертные оценки отражают субъективное мнение специалистов в данной предметной области – экспертов. Они задаются как в количественном, так и в качественном виде, поэтому возникают трудности с количественной интерпретацией полученных результатов для их использования в системах принятия решений. В связи с этим необходима разработка информационной поддержки принимаемых решений на основе использования методов обработки информации и компьютерных технологий.

Таким образом, решаемая проблема состоит в разработке и развитии моделей и методов обработки нечеткой информации в процессе проведения экологической экспертизы и меро-

приятий по оценке влияния на окружающую среду (ОВОС) объектов градостроительной деятельности [1].

Рассмотрим разработанный в статье подход на примере развития городских транспортных систем и эксплуатацию существующих с позиций ОВОС, основанный на работе [2]. Оценка воздействия автотранспорта на экологическое состояние городской территории в настоящее время осуществляется при рассмотрении, как и для многих проектов строительства, ограниченного числа показателей. Системное воздействие разнообразных показателей на экологическое состояние городской среды не исследуется, что затрудняет проведение оценки негативного воздействия экологического состояния городской среды на здоровье человека. Эта оценка должна осуществляться специалистами здравоохранения, зачастую эта оценка описывается лингвистически, то есть в этом случае должна быть учтена качественная информация при принятии решений по обеспечению экологической безопасности городской территории.

В качестве иллюстрации возможности применения методов нечеткой математики для моделирования развития городских территорий рассмотрим влияние автотранспорта на экологическую обстановку окружающей территории. Остановимся на следующих негативных факторах воздействия автотранспорта на человека: загазованность, запыленность, шум, уровень вибрации, которые отражены в таблице [3, 4].

Степень воздействия загрязняющих факторов на организм человека

Негативный фактор	Воздействует					
	на нервную систему	на сердечно-сосудистую систему	на дыхательные пути	на кровеносную систему	на желудочно-кишечный тракт	на органы слуха
Загазован-ность	■	■	■	■	■	—
Запылен-ность	—	▲	■	▲	▲	—
Шум	■	■	—	■	▲	■
Вибрация	■	■	—	■	▲	О

Условные обозначения: ■ – действие негативного фактора выражено явно; ▲ – действие негативного фактора выражено неявно; О – незначительное количество данных о влиянии

В настоящее время каждый интервал изменения значения фактора оценивается в баллах исходя из степени воздействия на окружающую среду. Например, значение фактора загазованности менее 0,8 предельной допустимой концентрации (ПДК) характеризует экологическую обстановку как благоприятную, количественная оценка в баллах – 0; если этот показатель нахо-

дится в интервале 0,8–1,2 ПДК, то экологическая обстановка относительно благоприятная, балльная оценка – 1 и т. д. [4].

Использовать балльные показатели по каждому критерию оценки экологической обстановки с целью построения агрегированного значения довольно затруднительно. Во-первых, в общем случае сложно определить соответст-

вие лингвистических значений количественным интервалам, во-вторых, возможны случайные воздействия при измерении показателей, например, обусловленные наличием ветра и другими факторами. Более того, степень воздействия негативных факторов на организм человека не может оцениваться как арифметическая сумма балльных оценок. Для построения и уточнения границ агрегированного показателя на организм человека необходимо использовать знание экспертов – специалистов из разных предметных областей: экологов, врачей-гигиенистов и др.

Все это обуславливает использование аппарата нечеткой математики [5] для представления знаний об объекте, а также применение мягких вычислений для принятия решений.

Будем рассматривать каждый фактор как лингвистическую переменную [5]. Например, «загазованность» является названием соответствующего фактора, терм-множество этой переменной есть Т (загазованность) = благоприятная экологическая обстановка + относительно благоприятная + неблагоприятная + опасная. Каждое значение лингвистической переменной является нечеткой переменной со значениями из универсального множества $U_i = [0, u_i^+]$, с базовой переменной u_i , u_i^+ – верхняя граница изменения значения показателя с номером i ($i = \overline{1, n}$); n – число входных переменных. На

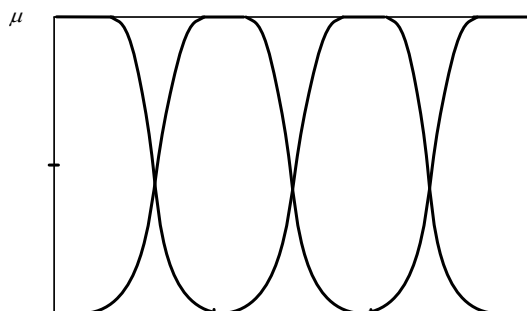


Рис. 1. Фактор загазованности. Нечеткие множества значений экологической обстановки:
(1) – благоприятная; (2) – относительно благоприятная;
(3) – неблагоприятная; (4) – опасная

рис. 1 приведены нечеткие множества, характеризующие смысл названий лингвистических значений переменной «загазованность». Остальные нечеткие переменные – запыленность, шум, вибрация – имеют такой же вид функций принадлежности.

Для оценки степени воздействия автотранспорта на окружающую среду, которая будет характеризовать ее состояние, введем лингвистическую переменную «Экологическое состояние окружающей автодорогу городской территории» (экологическое состояние). Ее терм-множество есть Т (экологическое состояние) = = удовлетворительное + критическое + недопустимое. Каждое значение терм-множества есть нечеткая переменная, определенная на универсальном множестве $U_y = [0, 1]$; здесь «0» интерпретируется как отсутствие воздействия на окружающую среду; «1» – значение показателя, которое характеризует экологическую обстановку конкретного участка городской территории как очень опасную для здоровья человека. На рис. 2 изображены эти нечеткие множества.

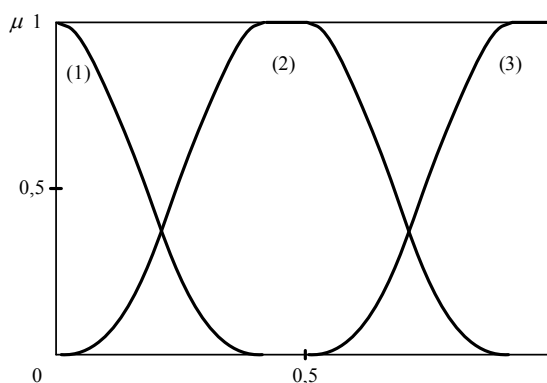


Рис. 2. Нечеткие множества значений экологического состояния:
(1) – удовлетворительное; (2) – критическое; (3) – недопустимое

Таким образом, знания о факторах воздействия автотранспорта на человека целесообразно, на наш взгляд, представить в виде следующих правил [6]:

ЕСЛИ $(x_1 = a_{1,j_1})$ И $(x_2 = a_{2,j_1})$ И...И $(x_n = a_{n,j_1})$ с весом w_{j_1} ,
ИЛИ $(x_1 = a_{1,j_2})$ И $(x_2 = a_{2,j_2})$ И...И $(x_n = a_{n,j_2})$ с весом w_{j_2} ,
...
ИЛИ $(x_1 = a_{1,k_j})$ И $(x_2 = a_{2,k_j})$ И...И $(x_n = a_{n,k_j})$ с весом w_{k_j} ,
ТО $y = d_j, j = \overline{1, m}$.

Здесь x_i – название лингвистических переменных; $i=\overline{1,n}$, $a_{i,jp}$ ($p=\overline{1,k_j}$) – значения переменной x_i в строке p для правила $j(j=\overline{1,m})$; $w(j,l)$ – вес предпосылки в правиле j , $l=\overline{1,k_j}$, принимающий значение из отрезка $[0, 1]$; k_j – количество предпосылок в правиле с номером j , m – количество термов-значений выходной переменной y – экологическое состояние, d_j – значения терм-множества «экологическое состояние».

Введем следующие обозначения: $\mu_{i,jp}(u_i)$ – функция принадлежности значения u_i нечеткому терму $a_{i,jp}$, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$, $p=\overline{1,k_j}$; тогда нечеткое множество запишется как

$$a_{i,jp} = \int_0^{u_i^*} \mu_{i,jp}(u_i)/u_i, u_i \in [0, u_i^*];$$

$\mu_{d_j}(u_y)$ – функция принадлежности значения u_y нечеткому терму d_j из множества T (экологическое состояние), тогда это нечеткое множество представим в виде:

$$d_j = \int_0^1 \mu_{d_j}(u_y)/u_y, u_y \in [0,1].$$

Степень принадлежности измеренного вектора значений $U^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$ лингвистическим значениям d_j вычисляется следующим образом:

$$\mu_{d_j}(U^*) = \bigvee_{p=\overline{1,k_j}} w_{jp} \cdot \bigwedge_{i=\overline{1,n}} [\mu_{i,jp}(u_i^*)], j = \overline{1,m},$$

$\bigvee$ и $\bigwedge$ являются операциями из s - и t -нормы, которые здесь используются как операции взятия максимума и минимума, соответственно.

В результате вычислений получим нечеткое множество

$$\check{Y} = \mu_{d_1}(U^*)/d_1 + \mu_{d_2}(U^*)/d_2 + \dots + \mu_{d_m}(U^*)/d_m.$$

Для перехода к нечеткому множеству на $[0, 1]$ необходимо провести вычисления [6]:

$$\check{Y} = \max_{j=\overline{1,m}} \left(\int_0^1 \min(\mu_{d_j}(U^*), \mu_{d_j}(u_y)) / u_y \right).$$

Для принятия решений по обеспечению экологической безопасности необходимо вычислить четкое значение y , которое соответствует состоянию (вектору входных параметров) U^* . Для этого будем вычислять дефазсификацию по методу центра тяжести:

$$y = \int_0^1 u_y \cdot \mu_{\check{Y}}(u_y) du_y / \int_0^1 \mu_{\check{Y}}(u_y) du_y.$$

В качестве иллюстративного примера рассмотрим правило из базы знаний: ЕСЛИ *загазованность* соответствует благоприятной экологической обстановке И *запыленность* соответствует относительно благоприятной экологической обстановке И *шум* соответствует неблагоприятной экологической обстановке И *вибрация* соответствует относительно благоприятной экологической обстановке, ТО *экологическое состояние* *удовлетворительное*, с весом 0,9.

Для определения весов предпосылок в правилах необходимо провести их экспертное оценивание. В работе использовался метод, позволяющий рассматривать преимущества одних объектов перед другими на основе нечеткого отношения с интенсивностью предпочтения, что характерно для информации при исследовании проблем по обеспечению экологической безопасности проектируемых объектов строительства [7].

Результаты статьи дают возможность оценить размер санитарно-защитной зоны. Однако в крупных городах со сложившейся транспортной системой и существующей жилой застройкой создание должной санитарно-защитной зоны не всегда представляется возможным. Поэтому в качестве проектных решений предлагаются различные градостроительные мероприятия: озеленение, экранирующие устройства и другие решения, а также управление движением автотранспорта: снижение скорости потока, снижение количества грузового транспорта и другие управляющие воздействия. Учитывая существующие зависимости между экологическим состоянием городской среды по каждому фактору и параметрами защитных мероприятий, предлагаемый подход даст возможность моделировать состояние окружающей среды при различных значениях этих параметров. Выбор наиболее эффективного способа экологической защиты городской территории определяется, обычно, при использовании экономического критерия.

Работа с такой базой знаний осуществляется в среде MatLab [8]. Результаты работы не противоречили экспертным оценкам модельных ситуаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санжапов, Б. Х. Согласование целей при эколого-экономическом обосновании градостроительного проекта с учетом ограничений на значения характеристик входящих в систему средств в условиях нечеткой информации / Б. Х. Санжапов, Н. П. Садовникова // Вестник ВолГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2011. – Вып. 20(40). – С. 151–159.
2. Санжапов, Б. Х. Применение методов мягких вычислений и когнитивного моделирования в задачах прогнозирования экологической безопасности строительства / Б. Х. Санжапов, Н. П. Садовникова // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – № 4. – С. 36–40.
3. Социально-гигиенические проблемы охраны окружающей среды // Проблемы больших городов : Обзорная информация. – 1995. – Вып. 8. – 23 с.
4. Сапожкова, Н. В. Комплексная оценка воздействия автотранспорта для регулирования экологической ситуа-

ции в городе / Н. В. Сапожкова // Вестник ВолГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. – 2010. – Вып. 20(39). – С. 175–179.

5. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.

6. Mamdani E.H., Assilian S. An Experiment in Linguistic Synthesis with Fuzzy Logic Controller // Int. J. Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7. №1. – P. 1–13.

7. Санжапов, Б. Х. Упорядочение объектов в иерархических системах при полимодальных экспертных оценках / Б. Х. Санжапов // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 6). – С. 105–109.

8. Штовба, С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику / С. Д. Штовба. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>.

УДК 621.313

В. П. Шевчук, Е. Н. Бельчанская, В. Н. Курьянов

АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
АТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА ЭНЕРГЕТИКА

Филиал Московского энергетического института в г. Волжский

shevchuk@vfmel.ru

Разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) энергетика, отличающееся от известных тем, что содержит шлюз перекачки информации из информационной подсистемы АСУТП в базу знаний АРМ. Это позволяет проводить диагностику качества функционирования АСУТП по текущим показаниям приборного парка и алгоритму диагностики, описанному в данной работе.

Ключевые слова: автоматизированное рабочее место, диагностика неисправностей, информационно-измерительная система, измерительное программное обеспечение, алгоритмы диагностики.

V. P. Shevchuk, E. N. Belchanskaya, V. N. Kuryanov

THE AUTOMATED WORKPLACE OF POWER ENGINEER
FOR DIAGNOSTICS ROTATING EQUIPMENT

The branch of Moscow Power Engineering institute in Volzhskiy

The automated workplace (automated workplace) for power engineer differing known themes that contains a sluice of swapping of the information from information subsystem ASUTP in the knowledge base of an automated workplace is developed. It allows to spend diagnostics of quality of functioning ASUTP under current indications of instrument park and the algorithm of diagnostics described in given work.

Keywords: The automated workplace, diagnostics of malfunctions, information-measuring system, the measuring software, algorithms of diagnostics.

Возможности современных программных средств позволяют вывести систему энергетического обеспечения на новый уровень эффективности, существенно повысив производительность, оперативность и качество работы службы главного энергетика. Существующие системы позволяют решать только часть задач отдела энергетика на предприятии. Как правило, решаются лишь задачи учета и документооборота,

сводя все введенные оператором данные в статическую базу данных и выводя отчеты и бланки, сгруппированные заданным способом.

На рис. 1 представлена структура программного обеспечения автоматизированного рабочего места энергетика, которая состоит из системы интеллектуального анализа данных, системы прогнозирования и принятия решений и подсистемы формирования отчетов.

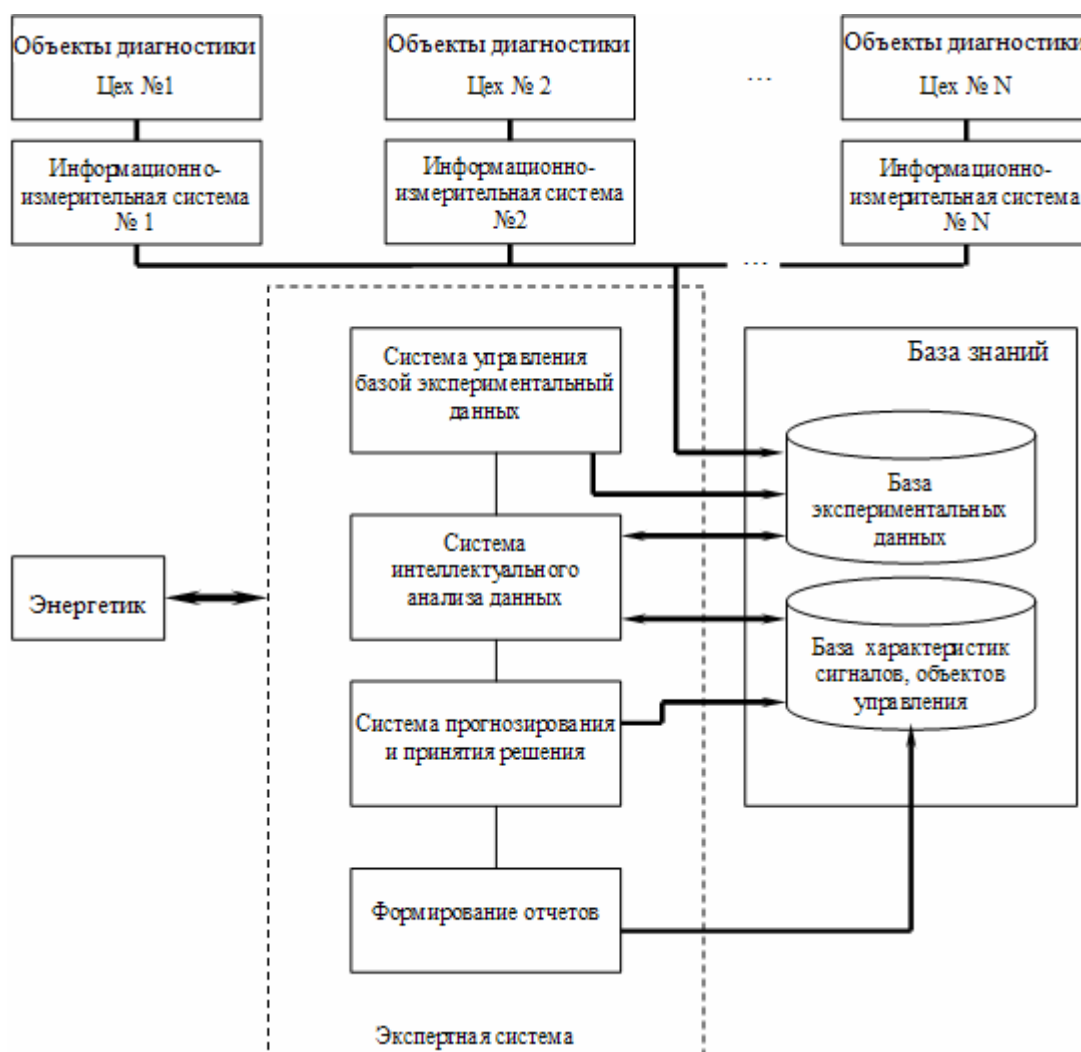


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного рабочего места энергетика

Таким образом, база знаний (рис. 1), с одной стороны, пополняется информацией, поступающей от информационно-измерительных систем, с другой – пользователем (энергетиком), который осуществляет контроль данных экспериментальной базы, анализирует и принимает решения о состоянии энергоэффективности оборудования, а также выполняет административные функции энергетика: составление графиков, отчетов, ведение паспортов и т. п.

Совокупность базы данных и правила Работы с ней представляют собой базу знаний (рис. 1), которая ориентирована на обеспечение работы алгоритмов диагностики неисправностей. По данным работы алгоритмов диагностики функционирует основной алгоритм работы экспертной системы – алгоритм энергоэффективности роторного оборудования (рис. 2). Для этих целей в АРМ предназначено меню «Мнемосхемы производства», которое состоит

из набора функциональных схем производства и шлюза перекачки информации из базы данных отечественной Skada-системы Trace Mode в базу знаний автоматизированного рабочего места энергетика. Шлюз-система управления базой экспериментальных данных, которая обеспечивает перемещение информации между мнемосхемами информационно-измерительных систем, разработанными в IDE SCADA-систем Trace Mode6 и базой экспериментальных данных формата Firebird. Полученные по информационно-измерительным каналам данные представляются энергетiku в форме графиков и таблиц данных. В качестве динамической составляющей мнемосхем было решено оставить самые необходимые – цифровое отображение измеряемой величины (сигналов от приборов) и отображение состояния оборудования. При этом отображаемые средства измерений должны быть представлены номером позиции, номером

паспорта, а также значением измеряемой величины и ее размерностью. Шлюз разработан с помощью DDE-технологии, согласно которой можно создать DDE-сервер – программу, которая бы вычитывала необходимые значения из базы данных и передавала их в Trace Mode6, являющимся DDE-клиентом. Мнемосхема Trace

Mode передает значение NDevices (номер прибора в базе, состояние которого необходимо отобразить) в переменную сервера; подсистема управления базой данных ищет в базе последнее состояние поверки прибора и записывает обратно в ту же переменную, из которой пришел номер. Мнемосхема считывает из перемен-

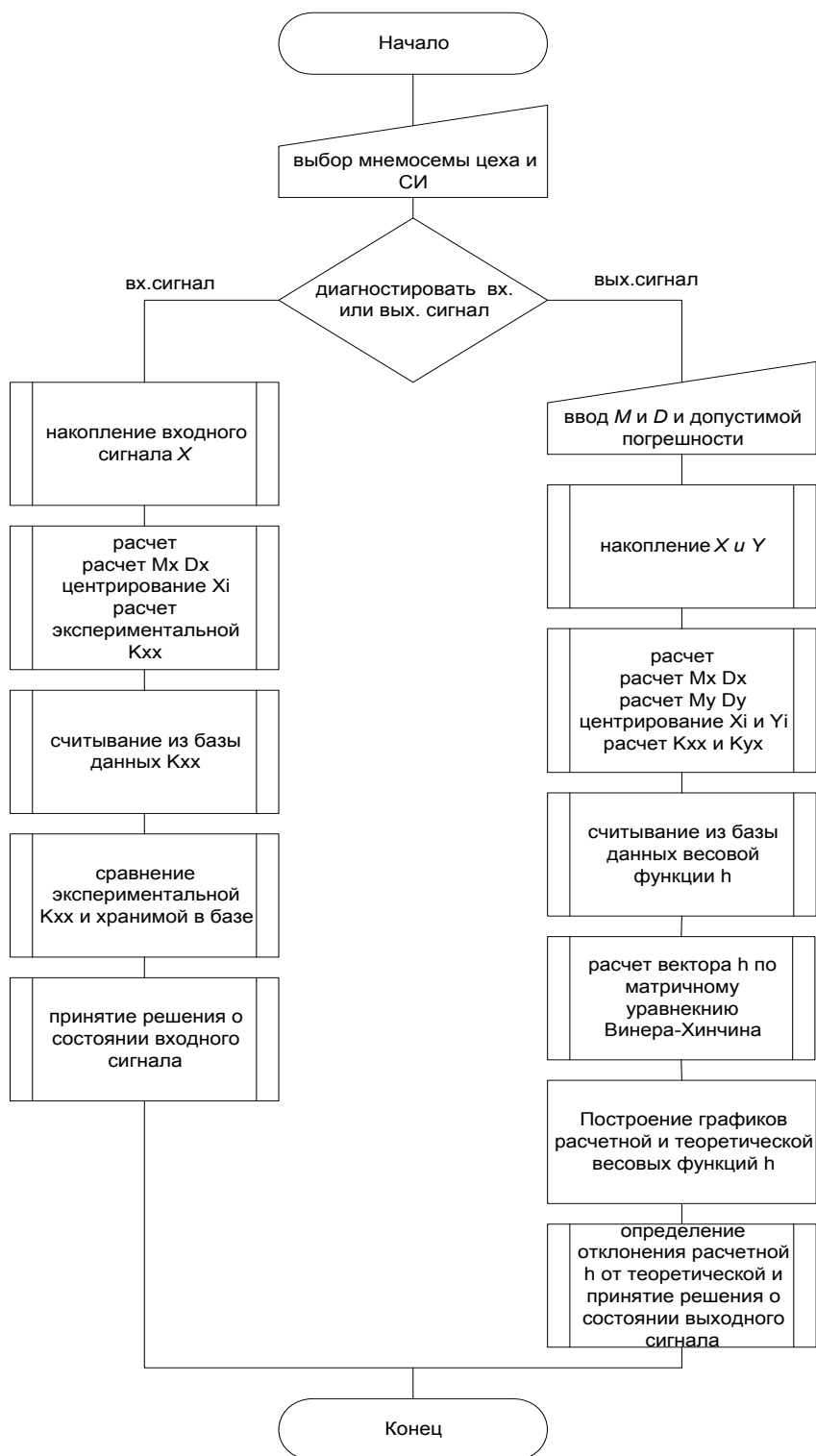


Рис. 2. Алгоритм диагностики технического состояния роторного оборудования

ной состояние прибора. В случае, если о приборе не найдено записей, программа отправляет в мнемосхему состояние «не годен». Основным назначением шлюза является текущее обновление и сбор экспериментальных данных (измерительной информации), на основе которых осуществляется диагностика состояния роторного оборудования в режиме реального времени. Диагностика производится по алгоритму, блок-схема которого представлена на рис. 2.

Работу алгоритма поддерживает «модуль математических моделей» базы знаний (см. рис. 1) автоматизированного рабочего места, который предназначен для хранения эталонных математических моделей сигналов и объектов управления. Математические модели объектов управления имеют вид [1]:

$$W(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1} \cdot e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где K – коэффициент передачи; T – постоянная времени; $e^{-p\tau}$ – звено запаздывания.

Математические модели измерительной информации (сигналов) имеют вид:

$$K_x(\tau) = \sigma_x^2 \cdot \exp(-\alpha|\tau|), \quad (2)$$

где σ_x^2 – дисперсия измерительной информации.

Алгоритм диагностики технического состояния роторного оборудования (см. рис. 2) состоит из блока выбора мнемосхемы и объекта диагностики, информационного блока, блоков накопления данных, блоков расчета статистических характеристик, блока идентификации динамических характеристик и блоков диагностики и принятия решения.

Алгоритм функционирует следующим образом. Пользователь автоматизированного рабочего места энергетика из главной формы выбирает меню «Мнемосхемы производства», конкретную функциональную схему и конкретную позицию роторного оборудования. В диалоговом режиме пользователь относит измеряемый сигнал к «входным» или «выходным». «Выходным» считается сигнал, который находится под воздействием объекта управления. Далее алгоритм разветвляется на два направления. Первое направление («вх. сигнал», см. рис. 2) предназначено для идентификации математической модели сигнала и сравнения его с эталоном. Для этого производится накопление информации о входном сигнале $X(i)$ и расчет:

а) оценки математического ожидания:

$$M_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(i); \quad (3)$$

б) центрирования массива экспериментальных данных:

$$\Delta X(i) = X(i) - M_x; \quad (4)$$

в) оценки дисперсии сигнала:

$$D_x = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta X^2(i), \quad (5)$$

г) оценки автокорреляционной функции:

$$K_x(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} \Delta x(i) \cdot \Delta x(i+j). \quad (6)$$

В соотношениях (3)–(6) N – объем накапливаемой информации. После расчета автокорреляционной функции программа производит сравнение ее с эталонной автокорреляционной функцией, хранимой в базе знаний АРМ, и принимается решение о работоспособности выбранного оборудования.

Второе направление алгоритма – это диагностика «выходных сигналов» (см. рис. 2). Здесь происходит накопление информации по двум параметрам: $Y(t)$ – тестируемый выходной сигнал объекта управления и $X(t)$ – соответствующее управляющее воздействие. Далее по обеим координатам производится расчет оценок математических ожиданий сигналов (3), центрирование сигналов (4), расчет среднеквадратических отклонений сигналов от математического ожидания (5), расчет автокорреляционной функции (6) и взаимокорреляционной функции [2]:

$$K_{xy}(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} \Delta x(i) \cdot \Delta y(i+j). \quad (7)$$

Общеизвестно, что автокорреляционная функция входного сигнала и взаимокорреляционная функция выходного и входного сигналов объекта управления связаны между собой, посредством весовой характеристики объекта управления, интегралом свертки:

$$K_{xy}(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cdot K_x(t-\tau) \cdot d\tau. \quad (8)$$

В программе заложено решение этого интегрального уравнения относительно весовой характеристики объекта управления, $h(t)$. Решение проводится в дискретном виде путем матричного представления вышеприведенного интеграла свертки:

$$\overline{h(j)} = \overline{K_{xy}(i)} \cdot K_x(i, j)^{-1}. \quad (9)$$

В выражении (9) $\overline{h(j)}$ – вектор-строка весовой функции объекта; $K_{xy}(i)$ – вектор-столбец оценки взаимокорреляционной функции;

$K_x(i, j)^{-1}$ – обратная матрица автокорреляционной функции входного сигнала. Полученное решение сравнивается с эталонной динамической математической моделью объекта диагностики и по характеру отклонений принимается решение о работоспособности и развитии дефектов выбранного роторного оборудования.

Таким образом, основным отличием предлагаемого алгоритма диагностики роторного оборудования является использование информации поставляемой в базу данных в реальном масштабе времени непосредственно из информационно-измерительных подсистем АСУТП. Для этих целей разработан шлюз перекачки данных из базы данных системы Trace Mode-6 в базу данных автоматизированного рабочего места энергетика, формата Firebird. Основной особенностью шлюза перекачки информация в базу знаний автоматизированного рабочего места энергетика является учет динамических

методических погрешностей цифровой обработки измерительной информации при распаковке ранее свернутой измерительной информации. Разработанная для этих целей система управления базами данных (СУБД) позволяет обращаться к мнемосхемам, выполненным в SCADA-системе Trace Mode-6; представлять информацию в удобной для пользователя форме и реализовать алгоритмы диагностики технического состояния роторного оборудования в масштабе реального времени, не снимая оборудование с позиции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевчук, В. П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем / В. П. Шевчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 320 с.
2. Капля, Е. В. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах / Е. В. Капля, В. С. Кузеванов, В. П. Шевчук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 512 с.

УДК 658.011.56

О. М. Шиккульская, А. А. Рахманина, А. А. Ходаева, Т. А. Ходаева

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет», г. Астрахань

shikul@mail.ru, 042404@aspu.ru

В работе рассмотрены вопросы качества медицинской помощи и реабилитации пациентов, определены методы сбора информации для оценки качества медицинской помощи. В качестве инструмента управления качеством реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата представлена адаптивная система управления качеством реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата, отобразены ее входные данные и структура.

Ключевые слова: качество, медицинская помощь, реабилитация, управление качеством, интеллектуальный анализ данных, пациент с нарушением опорно-двигательного аппарата, адаптивная система, входные данные.

O. M. Shikulskaya, A. A. Rakhmanina, A. A. Khodaeva, T. A. Khodaeva

RESEARCH OF THE PROBLEM OF QUALITY MANAGEMENT OF MEDICAL CARE ON THE BASIS OF THE INTELLECTUAL ANALYSIS OF DATA

FSBEI HPE «Astrakhan State University», Astrakhan

In work questions of quality of medical care and rehabilitation of patients are considered, methods of collection of information for an assessment of quality of medical care are defined. As the instrument of quality management of rehabilitation of patients with violations of the musculoskeletal device the adaptive control system of quality of rehabilitation of patients with violations of the musculoskeletal device is presented, its entrance data and structure are displayed.

Keywords: quality, medical aid, rehabilitation, quality management, data mining, patients with infringements of the oporno-impellent device, adaptive system, input data.

Важность вопросов обеспечения качества медицинской помощи для России объясняется, прежде всего, ухудшением в последние годы показателей здоровья россиян. Увеличивается

количество патологий новорожденных, растет смертность в группе трудоспособного населения, сокращается ожидаемая продолжительность жизни, ухудшается физическое развитие

подрастающего поколения. Весьма неблагоприятно состояние материнской смертности и ряда других показателей здоровья женщин. Устойчивая «естественная» убыль населения сложилась на 69 российских территориях, где проживает около 93 % всего населения России [1]. В связи с этим остро встает вопрос об управлении качеством оказания медицинской помощи населению.

Пути обеспечения качества возможно реализовать с помощью трех основных групп факторов, обеспечивающих высокий уровень качества медицинской помощи (КМП):

- 1) новые формы организации и управления;
- 2) методы контроля качества;
- 3) совершенствование материально-технической базы ЛПУ и, прежде всего, автоматизация технологических процессов.

Проблемы качества и эффективности деятельности системы здравоохранения напрямую связаны с затратами и достигнутыми результатами. Установить взаимоотношения между результатами и затратами весьма трудно, поскольку, в отличие от производственной сферы, в здравоохранении зачастую отсутствуют условия для измерения эффективности, тем более, что в здравоохранении чрезвычайно сложно выявить и измерить все достигнутые результаты. В связи с этим актуальной является проблема оценки качества медицинской помощи на основе многомерного шкалирования показателей. Решить эту проблему невозможно без использования современных информационных технологий.

Поскольку задача оценки и управления КМП в целом чрезвычайно многопланова и обширна, ее необходимо разбить на ряд более конкретных задач. Поэтому авторы остановились на более узкой, но чрезвычайно актуальной проблеме управления качеством реабилитации больных с нарушением опорно-двигательного аппарата.

В связи с тем что в настоящее время также остро стоит проблема реабилитации инвалидов во всех странах Запада, она является одной из ключевых в реализации всевозможных государственных и частным образом финансируемых социальных программ. Инвалидность, связанная с нарушением опорно-двигательного аппарата, составляет значительный удельный вес в структуре инвалидности в целом.

Медицинская и социально-экономическая эффективность хорошо налаженной системы

реабилитации лиц, пострадавших вследствие болезни или травмы, общепризнана. Однако существующая в настоящее время система реабилитации больных с заболеваниями опорно-двигательного аппарата является малоэффективной. Кроме организационных проблем имеются и методологические – в отечественной литературе вопросы реабилитологии не изложены систематично и последовательно, а практика зарубежных реабилитологов не всегда приемлема в условиях нашей страны.

Для успешной реабилитации необходим комплексный подход с привлечением специалистов различного профиля, использованием нескольких методов, направленных на преодоление дефекта, учетом индивидуальных особенностей больного, непрерывностью и преемственностью этапов реабилитации, привлечением больного к активному участию в лечении. Среди наиболее часто встречающихся ошибок – необоснованное разделение двух единых процессов – лечения и реабилитации, что приводит к различным осложнениям.

В настоящее время на рынке существует ряд медицинских информационных систем, однако они созданы для специфических областей медицины и не применимы для области реабилитации больных с нарушениями опорно-двигательного аппарата [2].

С целью совершенствования подходов к реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата и повышения ее эффективности необходима основанная на формальном аппарате система управления качеством реабилитации. Анализ уровня соответствия методов реабилитации должному уровню качества предопределяет необходимость научного обоснования критериев и формализованной базы для оценки качества.

Для разработки информационной системы, предназначенной для решения поставленной задачи, необходимо определить структуру, состав и источники входной информации. В любой управленческой ситуации важно рассматривать как первичные, так и вторичные данные; оба типа важны для ответа на ключевые вопросы, стоящие перед руководством больницы. Вторичные данные – это данные, существующие до того, как возникла необходимость в них. Первичные данные – это данные, специально собранные для определенных целей в момент возникновения необходимости в них. Сбор первичной информации обычно обходит-

ся дороже и занимает больше времени, чем поиски вторичной информации. Однако первичные данные точнее, гораздо яснее отвечают на поставленные вопросы и дают более основательную базу для принятия решений и планирования мероприятий по повышению КМП. Решение об использовании первичной или вторичной информации сводится к задаче оптимального выбора между высоким качеством информации и дешевизной, быстрее ее получением.

Оценка уровня качества медицинской помощи может в определенной мере зависеть от методов сбора и анализа информации. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе источников и вида информации для анализа КМП. Р. Брук еще в 1976 году классифицировал методы сбора информации для оценки КМП:

- отчетные данные;
- карты выбывшего из стационара;
- формы регистрации нуждаемости, заявки;
- формы регистрации обращаемости;
- формы, ориентированные на источники информации;
- проблемно-ориентированные формы регистрации;
- прямые наблюдения за работой врача;
- методы моделирования;

- экспертная оценка случаев госпитализации и обращений;
- стратегия слежения за развитием болезни;
- опрос населения;
- комбинация методов.

Наиболее перспективным методом сбора информации для оценки КМП является их комбинация.

В качестве входных будут использоваться систематизированные авторами данные, такие как:

- данные истории болезни пациента:
 - анкетные данные;
 - анамнез;
 - диагностика;
 - назначения;
 - показатели состояния;
- результаты обследования:
 - результаты анализов;
 - томограммы;
 - рентгеновские снимки;
- результаты опроса: данные дополнительного анкетирования;
- известный опыт:
 - научно-техническая и патентная литература;
 - накопленный опыт.

Разнородность входной информации и многоплановость задач определила структуру проектируемой информационной системы (см. рисунок).



Архитектура адаптивной системы управления качеством реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата

Адаптивная система управления качеством реабилитации пациентов с нарушениями опорно-двигательного аппарата будет включать в себя две подсистемы для транзакционной обработки данных на этапах лечения и реабилитации инвалидов; хранилище агрегированных данных; генератор запросов; подсистемы оперативной аналитической обработки данных и интеллектуального анализа данных. Подсистема для транзакционной обработки данных на этапе лечения разработана на основе созданной ранее автоматизированной системы ведения истории болезни [3–5]. В настоящее время ведется разработка второй подсистемы для транзакционной обработки данных на этапе реабилитации.

Вся разнородная информация от двух транзакционных подсистем и дополнительная неструктурированная информация будут накапливаться в хранилище агрегированных данных, которое позволит на основе технологии SQL-запросов создать информационную подсистему руководителя и генератор запросов, подсистемы оперативной аналитической обработки данных и интеллектуального анализа данных.

Поскольку статистика не может решить всех проблем по причине концепции усреднения по выборке, приводящей к операциям над фиктивными величинами (типа средней температуры пациентов по больнице), в качестве средств поддержки принятия решений будет применена технология Data Mining, включающая методы искусственного интеллекта.

В основу современной технологии интеллектуального анализа данных (Data Mining) положена концепция шаблонов (паттернов), отражающих фрагменты многоаспектных взаимоотношений в данных [6]. Эти шаблоны представляют собой закономерности, свойственные подвыборкам данных, которые могут быть компактно выражены в понятной человеку форме. Поиск шаблонов производится методами, не ограниченными рамками априорных предположений о структуре выборки и виде распределений значений анализируемых показателей [7].

Для реализации системы будут использованы алгоритмы распознавания образов (ситуаций), в качестве шаблонов – состояния здорового человека.

Использование данной адаптивной системы позволит повысить качество реабилитации больных с нарушениями опорно-двигательного аппарата, будет способствовать восстановлению их трудоспособности, возвращению их к полноценной жизни, обеспечит поддержку при-

нятия решений по выбору методов реабилитации, упростит работу врачей, сократит время на оформление документации.

Таким образом, проблема качества и эффективности медицинской помощи сегодня занимает приоритетное место в большом количестве проблем российского здравоохранения. Различия в группах больных часто имеют сложный характер и их можно достоверно выявить и описать, только учитывая взаимодействие между переменными, что не позволяют сделать одномерные статистические тесты.

Подходом, позволяющим провести достаточно полный анализ и достоверное сравнение групп больных по имеющемуся набору признаков, являются методы, основанные на поиске в многомерном пространстве признаков подобластей с существенным преобладанием объектов, принадлежащих какой-нибудь одной группе. С помощью логико-статистических методов распознавания образов, принадлежащих к большому классу алгоритмов Data Mining, можно с успехом решать многие задачи по оценке КМП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяченко, В. Г. Экспертиза качества медицинской помощи (вопросы теории и практики) / В. Г. Дьяченко. – Хабаровск, 1996. – 183 с.
2. Рахманина, А. А. Исследование проблемы оценки качества медицинской помощи на основе многомерного шкалирования показателей / А. А. Рахманина, О. М. Шиккульская // Надежность и качество-2010 : труды Международного симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – 1 т. – С. 187–188.
3. Ходаева, А. А. Автоматизированная система ведения истории болезни / А. А. Ходаева, Е. А. Ефимова, А. А. Ветрова // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2009612064 от 22.04.09 г.
4. Ходаева, А. А. Автоматизация процесса ведения медицинской документации / А. А. Ходаева // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ - 2009» : материалы Международной научной конференции (11–14 мая 2009 г.) / сост. И. Ю. Петрова. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2009. – С. 14–15.
5. Ходаева, А. А. Автоматизированная система ведения истории болезни больного / А. А. Ходаева, Е. А. Ефимова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет». – 2009. – № 1 (5). – С. 92–95.
6. Дюк, В. А. Обработка данных на ПК в примерах / В. А. Дюк. – СПб.: Питер, 1997.
7. Кандырин, Ю. В. Автоматизация многокритериального структурирования альтернатив на основе их последовательного упорядочивания / Ю. В. Кандырин, А. М. Кошелев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – 160 с. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 5). – С. 31–36.

УДК 504.064.36

*О. М. Шиккульская, М. А. Юречко***РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
НА СОСТОЯНИЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ В ВОДНОЙ СРЕДЕ****ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный университет»**

shikul@mail.ru, marinanamore@bk.ru

В работе рассмотрены и систематизированы факторы влияния тяжелых металлов на состояние ихтиофауны, классифицированы состояния водной экосистемы, созданы функциональная и информационно-логическая модели информационной системы для исследования влияния тяжелых металлов на живые организмы.

Ключевые слова: тяжелые металлы, буферная зона, моделирование, перцептрон, искусственный интеллект, идентификация, биогеохимические условия, экосистема.

*О. М. Shikylskaya, M. A. Yurechko***DEVELOPMENT OF MODEL OF INFLUENCE OF HEAVY METALS ON THE STATE
OF LIVING ORGANISMS IN WATER ENVIRONMENT****FGBOU VPO the «Astrakhan State University»**

In work factors of influence of heavy metals on a condition of ichthyofauna are analysed and systematized, conditions of a water ecosystem are classified, the mathematical model is developed for their identification on the basis of modified perceptron, functional and information and logical models of information system for research of influence of heavy metals on live organisms are created.

Keywords: heavy metal, a buffer zone, modeling, perceptron, artificial intelligence, identification, biogeochemical conditions, an ecosystem.

Введение

Одним из сильнейших по действию и наиболее распространенным химическим загрязнением является загрязнение тяжелыми металлами, к которому относятся свинец, цинк, кадмий, ртуть, молибден, хром, марганец, никель, олово, кобальт, титан, медь, ванадий [1].

Исследователями получены большие объемы экспериментальных данных. Однако сложность учета влияния всего многообразия факторов на ихтиофауну, необходимость проведения для этого дорогостоящих натурных экспериментов делают актуальной задачу математического и компьютерного моделирования влияния тяжелых металлов на живые организмы в биогеохимических условиях Нижней Волги [2, 3].

**Анализ влияния тяжелых металлов
на состояние водной экосистемы**

На образование высокотоксичных растворимых органических соединений тяжелых металлов влияют кислотность воды, наличие плесени. Существует еще множество других трудно учитываемых факторов, изменяющих границы буферной зоны. Все это говорит о сложности процессов, протекающих в поверхностных водах при попадании в них металлов-загрязнителей и целесообразности применения методов моделирования для исследования этих процессов [4].

Для построения модели авторами систематизированы и формализованы факторы влияния

тяжелых металлов на состояние водной экосистемы и само состояние ихтиофауны. На содержание тяжелых металлов в водной экосистеме влияют особенности климата и почвенного покрова, близость месторождений руд и наличие мест гидрогенной аккумуляции солей, деятельность человека. Факторы, влияющие на формы нахождения тяжелых металлов в водах и, соответственно, на степень адаптации водной экосистемы к тяжелым металлам, систематизированы и сведены в таблицу.

По степени влияния тяжелых металлов на водную экосистему авторы предложенной работы выделили четыре ее состояния (зоны), границы которых определяются концентрацией тяжелых металлов: дефицита микроэлементов, благоприятных условий, адаптации (буферная емкость) и интоксикации (острого и хронического воздействия). Нижняя граница зоны благоприятных условий определяется необходимой концентрацией содержания микроэлементов для обеспечения метаболизма рыб [7]. За верхнюю границу этой зоны в первом приближении можно принять предельно допустимую концентрацию (ПДК) тяжелого металла. В этом случае она будет зависеть от видового состава рыб. Верхняя граница буферной зоны (зоны адаптации) зависит от множества факторов и может сильно варьироваться в зависимости от состава вод, природно-климатических условий и вида рыб.

Факторы, влияющие на адаптацию водной экосистемы

Формы нахождения металла в водной экосистеме	Общая концентрация токсиканта в воде	Изменение токсичности	Факторы	
			непосредственно влияющие	опосредованно влияющие
Металл в растворенной форме (гидратированные ионы металлов)	Не меняется	Возрастает	Интенсификация выделения CO_2 в результате деятельности микроорганизмов	Кислотность воды, сильное зарастание водоемов
Сорбированный и аккумулированный фитопланктоном	Уменьшается	Уменьшается	Аккумулирующая способность гидробионтов	Сезон, процесс аккумуляции (биоаккумуляции)
Удерживаемый донными отложениями в результате седиментации взвешенных органических и минеральных частиц	Уменьшается	Уменьшается	Скорость седиментации взвесей	Размеры и заряд адсорбирующих ионы металла частиц
Адсорбированный на поверхности донных отложений непосредственно из водной среды в растворимой форме	Уменьшается	Уменьшается	Кинетика поглощения ионов металлов	
Находящийся в адсорбированной форме на частицах взвеси	Уменьшается	Уменьшается	Кинетика поглощения ионов металлов	
Связывание ионов металлов в водной среде растворенными органическими веществами	Не меняется	Уменьшается	Растворимые в воде органические вещества – комплексообразующие реагенты:	– Климатические условия природной зоны. – Кислотность водной среды. – Наличие комплексообразующих реагентов
Металлорганические соединения	Не меняется	Возрастает	Биологическое метилирование происходит под действием микроорганизмов (плесени)	Кислотность среды и ее окислительный потенциал

Поэтому задача моделирования степени влияния тяжелых металлов на водную экосистему заключается в идентификации ее состояния в зависимости от входных параметров, т. е. относится к классу задач на распознавание образов. В условиях неполной и/или неопределенной информации при отсутствии четких алгоритмов наиболее эффективными признаны нейронные сети. Наиболее простой вариант нейронной сети – перцептрон. Его преимущества – возможность классификации и аппроксимации границ классов, простая реализация и быстрый алгоритм. Поэтому авторами было принято решение о создании модели на основе перцептрона с модификацией его для учета особенностей рассматриваемой предметной области [8].

Построение модели состояния водной экосистемы

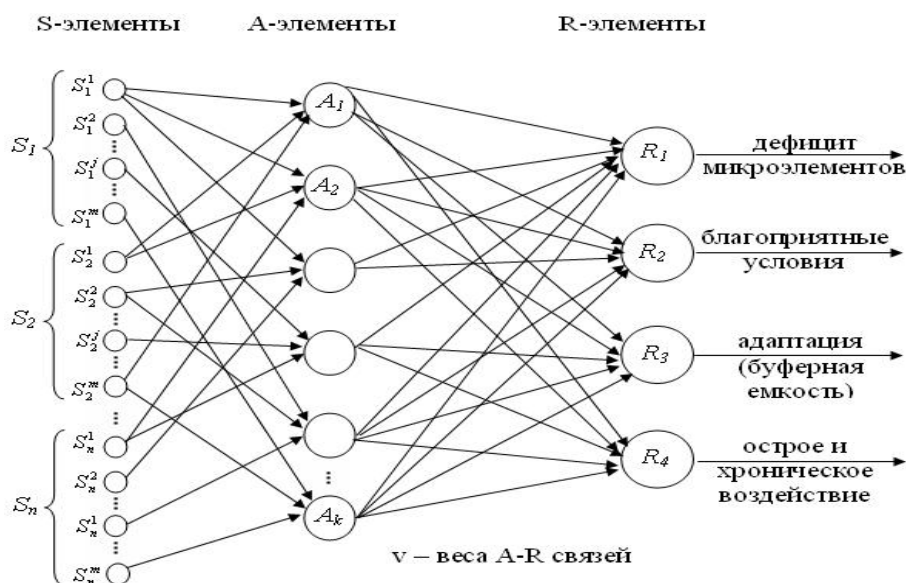
Классический перцептрон состоит из совокупности чувствительных (сенсорных) элементов (S-элементов), на которые поступают вход-

ные сигналы (см. рисунок). S-элементы связаны с совокупностью ассоциативных элементов (A-элементов), выход которых отличается от нуля только тогда, когда возбуждено достаточно большое число S-элементов, воздействующих на один A-элемент. A-элементы соединены с реагирующими элементами (R-элементами) связями, коэффициенты усиления (ν) которых переменны и изменяются в процессе обучения. Взвешенные комбинации выходов R-элементов составляют реакцию системы, которая указывает на принадлежность распознаваемого объекта определенному образу (состоянию). Для каждого состояния устанавливают свой R-элемент, а выход каждого такого элемента представляет линейную комбинацию выходов A-элементов.

Все входные параметры подразделяются на количественные и качественные критерии. К количественным критериям относятся температура и кислотность воды, концентрация тяжелого металла (и т. п.), к качественным – структура и состав водной среды. Качествен-

ные критерии определяются экспертами. Каждому значению качественного критерия ставится в соответствие число. Для соизмеримости входных параметров авторами предложено сенсорные элементы S представить в виде триггеров, принимающих логическое значение: 0 или 1. С этой целью непрерывная шкала числовых критериев разбивается на диапазоны при предварительной настройке перцептрона. S -элементы разбиваются на группы: $S_1, S_2, \dots, S_n$. Каждая группа S -элементов соответствует

одному критерию. Каждому диапазону значений входной величины ставится в соответствие сенсорный элемент, который в процессе работы получает значение 1 в случае попадания входной величины в его диапазон и 0 – в противном случае. Таким образом, непрерывная величина преобразуется в дискретную. Для каждого значения качественного критерия, приведенного к количественному показателю, также определяется свой сенсорный элемент, который работает аналогично.



Модель идентификации состояния водной экосистемы

В отличие от общепринятой модели перцептрона S -элементы соединяются с A -элементами не произвольно. С каждым A -элементом соединяется по одному произвольному сенсорному элементу из каждой группы элементов, т. е. с A -элементом соединяется произвольный набор значений всех критериев. Наборы значений критериев не повторяются.

Для сокращения избыточных (реально не существующих) связей между S - и A -элементами в процессе обучения и работы производится анализ их возбуждения, на основе которого неработающие связи уничтожаются.

Каждому R -элементу соответствует одно из четырех состояний водной экосистемы. Коэффициенты усиления v связей между A - и R -элементами вычисляются после обработки каждого эксперимента как количество случаев правильного срабатывания связей за весь период использования перцептрона. В каждом R -элементе суммируются значения v подключенных к нему связей. R -элемент, получивший через

связи с A -элементами максимальное значение, является идентификатором состояния водной экосистемы. Математическая модель идентификации состояния водной экосистемы IDM может быть представлена в виде следующей совокупности: $IDM = \langle O, W_{BX}, W_{BSX}, P \rangle$, где O – объект моделирования (процесс идентификации состояния водной экосистемы); W_{BX} – совокупность входных параметров; W_{BSX} – совокупность выходных параметров; P – правило перевода. Вектор входных параметров представляет собой совокупность количественных и качественных оценок водной среды: $W_{BX} := \langle \tau; \omega \rangle$, где τ – количественные оценки (показания приборов); ω – качественные показатели (экспертные оценки). Все входные параметры должны быть переведены в булевы. Для качественных показателей этот перевод осуществляется в два этапа, для количественных – в один. Правило перевода $P := \langle \sigma; \lambda \rangle$,

где σ – правило перевода качественных показателей в количественные (шкалирование качественных показателей) $\omega \xrightarrow{\sigma(\omega)} \tau \in N$; λ – правило перевода всех количественных оценок в булевы. Значение S-элемента определяется по

формуле: $S_i^j = \begin{cases} 1, & \text{если } \tau \in [a; b] \vee \bar{\tau} \in [a; b] \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$.

Значение k -го A-элемента определяется по формуле: $A_k = \Theta_k + \sum_{i=1}^n S_i^j$, где Θ_k – порог чувствительности A-элемента, S_i^j может быть 0 или 1;

n – количество критериев (групп сенсорных элементов). Значение R-элемента может быть получено по следующей формуле: $R_p = \Theta_p + \sum_{k=1}^m v_{kp} A_k$,

где Θ_p – порог чувствительности R-элемента;

A_k – значение A-элемента; m – количество A-элементов; v_{kp} – вес связи от элемента A_k к элементу R_p (определяется на основании опыта обучения и автоматически подстраивается в процессе адаптации).

На основе модели идентификации водной экосистемы авторами разработаны функциональная и информационно-логическая модели информационной системы для исследования влияния тяжелых металлов на живые организмы; разрабатывается программное обеспечение.

Заключение

На основе анализа предметной области авторами систематизированы факторы, влияющие на состояние ихтиофауны, классифицированы состояния водной экосистемы, разработана математическая модель для их идентификации на основе модифицированного перцептрона, определены качественные и количественные входные параметры системы, разработаны функциональная и информационно-логическая модели информационной системы для исследования влияния тяжелых металлов на живые организмы с целью создания проблемно-ориентированного программного обеспечения. Адекватность модели будет определена в процессе опытной эксплуатации информационной системы.

Практическое применение разрабатываемого авторами программного обеспечения на основе предложенной модели перцептрона позволит решить следующие задачи: значительное сокращение количество натурных экспериментов для идентификации состояния водной экосистемы; прогноз состояния водной экосистемы; анализ границ буферной зоны по известному состоянию экосистемы (обратную задачу); выбор наиболее эффективных средств и методов для улучшения экологического состояния среды; определение вида рыбы для разведения в том или ином водоеме; определение оптимального водоема для разведения определенного вида рыбы; создание условий в искусственных водоемах, близких к естественному месту обитания рыб; определение оптимального количества микроэлементов, применяемых в рыбоводстве с учетом содержания их в среде обитания рыб и в их организмах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костров, Б. П. Загрязнение металлами вод и рыб среднего Каспия / Б. П. Костров, А. Н. Панарин // Первый конгресс ихтиологов России. Астрахань. – М.: ВНИРО, 1997а. – С. 431.
2. Воробьев, В. И. Эколого-биологические основы применения микроэлементов в рыбоводстве : автореф. д-ра биол. наук. – М.: МГУ, 1982. – С. 21–23.
3. Шелухин, Г. К. Некоторые результаты эколого-биохимического мониторинга осетровых в каспийском море / Г. К. Шелухин, А. Р. Шигапова // Экологическая физиология и биохимия рыб : тез. докл. – Ярославль, 2000. – С. 199–200.
4. Эйхенберг, Э. Взаимосвязь между необходимостью и токсичностью металлов в водных экосистемах / Э. Эйхенберг // Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. – М.: Мир, 1993. – С. 62–87.
5. Воробьев, Д. В. Влияние температуры на физиологический механизм обмена цинка при его различном поступлении в организм белого амура / Д. В. Воробьев // Естественные науки. – 2008. – № 1 (22). – С. 18–21.
6. Воробьев, Д. В. Динамика тяжелых металлов в основных компонентах экосистем дельты р. Волги / Д. В. Воробьев // «Естественные науки». – 2007. – № 3 (20). – С. 11–16.
7. Крушель, Е. Г. Алгоритм оценки пространственного распределения приземных концентраций вредных веществ по результатам точечных измерений / Е. Г. Крушель, И. В. Степаненко, О. В. Степаненко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 10). – 132 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 004.415.2

Д. В. Бутенко, А. С. Ананьев, К. В. Попов

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ. ПРОГРАММНАЯ СРЕДА ПСИХОСЕМАНТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗВУКА

Волгоградский государственный технический университет

gindenburg@mail.ru, ananievandrr@yandex.ru, popov_konstantin@lenta.ru

В статье описаны этапы проектирования новых информационных систем, позволяющие создавать не-тривиальные проекты. В качестве примера описывается концептуальное проектирование автоматизированной системы, осуществляющей психолингвистическую экспертизу аудиопродукции.

Ключевые слова: концептуальное проектирование, информационно-психологическая безопасность, психология.

Dm. V. Butenko, A. S. Ananyev, K. V. Popov

THE CONCEPTUAL DESIGN OF INFORMATION SYSTEMS. THE SOFTWARE OF PSYCHO SEMANTIC IDENTIFICATION OF SOUND

Volgograd State Technical University

This article describes the design stages of new information systems which allow you to create non-trivial projects. As an example, describes the conceptual design of an automated system, carries out psycho semantic examination of audio products.

Keywords: conceptual design, information systems, information and psychological security, psychology.

Процессы генерации новых знаний становятся доминирующими в различных сферах деятельности человека, а умение конвертировать их в открытия, изобретения, новые технологии и продукты, информационные системы, интеллектуальную собственность – базовым квалификационным требованием к специалистам. Проблема новизны технических решений в сфере создания новых информационных продуктов и технологий приобретает особую остроту в условиях конкуренции, обеспечения интеллектуального превосходства в процессе перехода общества в сферу инновационного развития.

Начальные этапы любого проекта, относящиеся к поиску решений трудных, нестандартных практических задач, называются *концептуальным проектированием систем*. Для концептуальных стадий характерна низкая структурированность предметных областей, многоаспектность протекающих процессов, отсутствие достаточной количественной информации об их динамике, нечеткость, изменчивость процессов во времени, что обуславливает большую неопределенность в принятии решений. Результатом

стадии концептуального проектирования является формулировка требований для постановки задачи на проектирование новой технической (в нашем случае – новой информационной системы), программного продукта.

Целью данной работы является определение перечня базовых процедур концептуального проектирования для создания проектов информационных систем, специфики проведения этих процедур, формирования инструментария для осуществления стадии концептуального проектирования применительно к сфере информационных систем.

Под *информационно-психологической безопасностью* понимается состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от воздействия вредной информации. Информационно-психологическая безопасность является составной частью информационной безопасности и должна занимать особое место в государственной политике по ее обеспечению. Потенциальными источниками угроз информационно-психологической безопасности могут быть специальные техни-

ческие и программные средства для неосознаваемого деструктивного воздействия на психику человека, в том числе генераторы физических полей и излучений, программы для ЭВМ, источники информирования [1].

Ответственность за осознание этих угроз и предотвращение последствий от их реализации возлагается на государство. На текущий момент контроль за распространением информации отсутствует или осуществляется на основе результатов статистических исследований при помощи экспертов, мнение которых нельзя считать объективным. Для обеспечения такого контроля и предотвращения распространения вредной информации был разработан и принят федеральный закон «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию», который в сентябре 2012 года вступает в действие.

Для решения проблемы объективной экспертизы аудиопродукции, как наиболее широко распространенного вида информации, в настоящее время проектируется и разрабатывается автоматизированная программная система, объединяющая в себе новейшие достижения психологии, когнитивных технологий и современные информационные технологии. Базой проекта являются теоретические разработки д-ра психол. наук И. В. Смирнова и А. А. Бухтоярова, необходимые для анализа архетипов сознания и сопоставления им той или иной частотной характеристикой звука вместе с цветовой детерминантой [2]. Под *архетипами сознания* понимаются семантические конструкции, изначально находящиеся в сознании человека, отражающие врожденные, инстинктивные реакции на определенные ситуации.

Реализация такой программной системы строится с использованием технологий концептуального проектирования систем, которые дают возможность создавать нетривиальные проекты новых систем. В общем виде эти технологии на основе имеющейся потребности позволяют сформулировать требования к функциональной структуре будущей системы, определить ее принципы действия и представить варианты технического и параметрического решения. На примере концептуального проектирования системы, осуществляющей экспертизу аудиопродукции, представим общую методику создания проекта информационной системы. Этапы проектирования в общем виде содержат апробированную последовательность [3]:

1) *сбор информации о предметной области и формулировка цели проектирования*. В соответствии с федеральным законом № 436 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию», направленным на защиту детей от разрушительного, травмирующего их психику информационного воздействия общедоступных источников массовой информации, необходимо оградить ребенка от информации, способной развить в нем психические расстройства, сформировать у ребенка искаженную картину мира и неправильные жизненные установки, для обеспечения информационно-психологической безопасности у ребенка в целом. Целью создания автоматизированной системы является разработка инструмента для проведения качественной объективной экспертизы аудиопродукции в соответствии с ФЗ № 436 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию». В качестве объекта исследования будет выступать аудиопродукция. Под *деструктивной информацией* будем понимать аудиоданные, имеющие отклонения в ритме мелодии, или скрытые аудиоучастки, вставки, которые могут быть причиной психических расстройств;

2) *моделирование объектов и процессов проектируемой системы*. Базой проекта являются теоретические разработки д-ра псих. наук И. В. Смирнова и А. А. Бухтоярова [2], необходимые для анализа архетипов сознания и сопоставления им той или иной частотной характеристикой звука вместе с цветовой детерминантой. В современной психологии выделяют 24 фазы сознания человека. Каждая фаза соответствует определенной стадии развития сознания человека. Описаны фазы перинатального развития, обыденного сознания, духовной реальности и фазы совершенства сознания. Сознание здесь понимается как способ организации и управления развитием сущности человека. Наличие описания 24-позиционного реально-виртуального звукоряда, соответствующего фазам сознания человека, позволяет анализировать музыку так, что в ней можно обнаружить скрытый смысл, то есть смысловой контекст, который заложен в музыкальную композицию авторами;

3) *обзор существующих аналогов и прототипов системы с целью выявления основных функциональных характеристик и обобщенной функциональной структуры будущего проекта*.

Для проектирования функциональной структуры был произведен обзор существующих аналогов и прототипов программного продукта. Анализ показал отсутствие прямых аналогов системы экспертизы аудиопродукции на предмет выявления деструктивной информации в аудиопотоке. Тогда в качестве основных прототипов разрабатываемой программной системы были взяты программные средства, направленные на воспроизведение музыкальных файлов и распознавание музыкальных нот, такие как Windows Media Player, Winamp, Aimp, Notation Player, Digital Music Mentor. Анализ приведенных программ позволил выявить их основные функции, которыми являются воспроизведение, визуализация и представление аудиокomпозиции в виде последовательности музыкальных нот, а также особенности функциональных структур и функционирования этих программных продуктов. Все представленные программы имеют схожую функциональную структуру, основанную на модели воспроизведения звука в ОС Windows. Данная модель включает в себя следующие компоненты: инициализация режимов воспроизведения, предобработка аудиоданных, отправка аудиоданных на устройство вывода, управление воспроизведением. На основе данной модели планируется создание функциональной структуры проектируемой программной системы, которая помимо основных компонент будет включать в себя компоненту психосемантической идентификации звука и компоненту формирования отчетов по экспертизе аудиопродукции;

4) *формулировка задачи на проектирование новой системы.* На основании выводов по обзору аналогов и прототипов была произведена формулировка задачи на проектирование новой системы. Новая система должна воспроизводить, интерактивно распознавать в симультанном (смешанном) аудиопотоке реальные (слышимые) и виртуальные (неслышимые) дискретные звуки; проводить экспертизу сочетаний выявленных дискретов звука на предмет деструктивного воздействия на сознание человека в соответствии с теорией психосемантического анализа звука А. А. Бухтоярова; обнаруживать наличие или отсутствие скрытых вставок в аудио потоке; составлять отчет по экспертизе аудио продукции, включающий текст психосемантического анализа аудиоданных, когнитивную карту воздействия звука на архетипы сознания человека и вывод о наличии или отсут-

ствии скрытых вставок; визуализировать музыкальные композиции как совокупность непрерывно меняющихся цветовых образов различной формы по выбору пользователя;

5) *разработка концептуальной схемы будущей системы.* Концептуальная схема представляет собой обобщенные компоненты проекта и принципы их взаимодействия между собой, с пользователем и внешней средой. По результатам вышеописанной работы была спроектирована концептуальная схема новой системы психосемантического анализа звука (рис. 1), на которой изображены две концептуальные части – компонента обработки аудиоданных, поступивших в систему, и компонента анализа идентифицированных психологических характеристик [4]. Качество идентификации данных повышается за счет использования компоненты математической обработки аудиоданных, принцип действия которой основан на алгоритме прямого быстрого преобразования Фурье и оконной функции Хэмминга, повышающей точность распознавания характеристик аудиосигнала.



Рис. 1. Концептуальная схема разрабатываемой программной системы

На этом этапе проектирования делаются предварительные выводы о компонентном составе проектируемой программной системы, которая будет состоять из трех компонент:

- 1) компонента предобработки аудиоданных и воспроизведения мелодий;
- 2) компонента психосемантического анализа, являющаяся уникальной авторской разработкой и включающая в себя компоненту визуализации результатов анализа;
- 3) компонента формирования отчетов и экспертизы анализируемой аудио продукции;
- 6) *построение обобщенной функциональной структуры и определение требований к функциям проектируемой системы.* В связи с отсутствием прямых аналогов и применением инно-

вационных психологических методик данный проект представляет собой инновационную разработку с высокой степенью неопределенности в части функциональной структуры и перечня функций. Однако декомпозиция целей проектирования, выводы по анализу прототипов и характеристики концептуальной схемы позволяют выявить набор основных функций проектируемой системы:

воспроизведение мелодий и управление аудиопотоком;

представление аудиопотока в виде последовательности музыкальных нот;

интерактивное распознавание в аудиопотоке реальных (слышимых) и виртуальных (неслышимых) дискретов звука;

проведение экспертизы звукового ряда по характеру влияния на сознание человека – конструктивному или деструктивному;

обнаружение скрытых вставок в аудиопотоке; формирование отчетов по экспертизе аудиопродукции;

визуализация музыкальных композиций в виде совокупности непрерывно меняющихся цветовых образов различной формы по выбору пользователя;

селекция аудиопродукции по распознанным психологическим характеристикам;

формирование списков воспроизведения аудиопродукции для целенаправленной активации архетипов сознания человека.

На основании приведенных функций, которые должна выполнять проектируемая система, была построена обобщенная функциональная структура, позволяющая определить состав входящих в нее подсистем и связь между ними: «Подсистема воспроизведения звука», «Подсистема графической визуализации», «Подсистема психосемантической идентификации звука», «Подсистема формирования отчетов», «Подсистема вывода данных».



Рис. 2. Функциональная схема проектируемой системы: 1, 2 – дискреты аудиосигнала; 3 – психологическая характеристика аудиокомпозиции; 4 – музыкальные ноты; 5 – графическая информация; 6 – когнитивная карта аудио композиции; 7 – текстовая и графическая информация

«Подсистема формирования отчетов», «Подсистема вывода данных» (рис. 2);

7) *определение требований к входной и выходной информации.* Входной информацией для системы служат аудиофайлы форматов mp3, wma и wav. Возможна загрузка как одного аудиофайла, так и массива файлов. Для удобства пользователя реализована поддержка файла списка воспроизведения формата m3u, который наиболее часто используется для хранения списка прослушиваемых данных и поддерживается практически всеми современными музыкальными проигрывателями.

Выходной информацией системы является отчет об экспертизе аудиопродукции, включающий в себя: текст психосемантического анализа аудиоданных; когнитивную карту воздействия звука на архетипы сознания человека. Также в отчет включается вывод о наличии или отсутствии скрытых вставок. В качестве визуального результата пользователю программы предоставляется цветовой портрет аудиокомпозиции;

8) *проектирование дизайна внешнего вида и пользовательского интерфейса программной системы.* Данный этап не регламентирован и предоставляет большие возможности для творчества. Для генерации эффективных решений здесь могут быть использованы различные методики научно-технического творчества. Как и инновационная компонента проигрывателя, заключающая в себе функцию визуализации звука, а также формы отчетов, для отображения результатов экспертизы аудиопотока был применен метод фокальных объектов, который относится к ассоциативным методам поиска решений. В нашем примере, для оформления внешнего вида программной системы оформления дизайна и, особенно, когнитивных карт анализа звукового потока, был взят образ цветка, который символизировал круг, разбитый на дискреты, в соответствии с аллюзией о целостном сознании человека с 24 фазами. Сравнение различных когнитивных карт в таком виде дает представление о разнообразии результатов экспертизы.

Таким образом, в статье представлены этапы проектирования новых информационных систем, позволяющие создавать нетривиальные проекты. Показано, что на основе имеющейся потребности эти технологии дают возможность сформулировать требования к функциональной структуре будущей системы, определить принципы ее действия и представить варианты технического и параметрического решений.

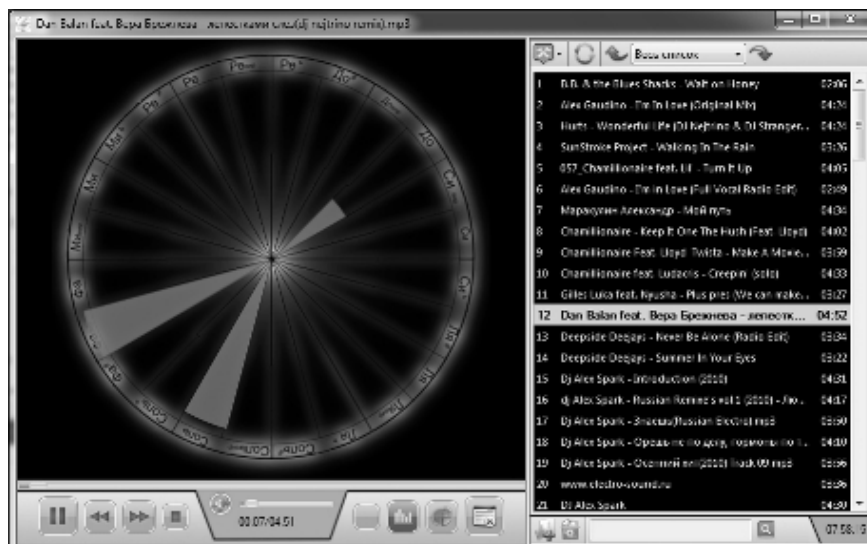


Рис. 3. Пример представления когнитивной карты проигрываемой мелодии

На основании изложенной технологии концептуального проектирования создается программный продукт, в качестве инструмента для решения задачи проведения объективной психосемантической экспертизы аудиопродукции. Полученный концептуальный проект информационной системы универсален и может быть использован в онлайн-сервисах мобильных устройств, например, в портативных медиаплеерах, смартфонах и прочих подобных устройствах для психосемантического анализа прошедшего разговора или проигранной мелодии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бачило, И. Л. Информационное право / И. Л. Бачило, В. Н. Лопатин, М. А. Федотов. – СПб.: Юридический центр Пресс, 2001. – 789 с.
2. Бухтояров, А. А. Третий Эон / А. А. Бухтояров, А. М. Степанов. – Уфа: Информреклама, 2006. – 348 с.
3. Концептуальное проектирование. Развитие и совершенствование методов: монография [коллективная] / В. А. Камаев, Л. Н. Бутенко, А. М. Дворянkin, С. А. Фоменков, Д. В. Бутенко, Д. А. Давыдов, А. В. Заболевая, Зотова, И. Г. Жукова, А. В. Кизим, С. Г. Колесников, В. В. Костерин, А. В. Петрухин, М. В. Набока. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 360 с.
4. Ананьев, А. С. Автоматизация способа психосемантической идентификации звука / А. С. Ананьев, К. В. Попов // «Новые информационные технологии». Тезисы докладов XIX Международной студенческой конференции-школы-семинара. – М.: МИЭМ, 2011. – 316 с.

УДК 631.152:658.012.011.56

Ю. А. Волошин

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МАШИН ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Волгоградский государственный технический университет

voloshin-y@yandex.ru

Рассматривается задача автоматизированного формирования системы машин для производства сельскохозяйственных культур. Обосновывается использование метода прямого перебора для решения этой задачи. Предложен алгоритм решения задачи, учитывающий ее особенности. Приведена блок-схема алгоритма.

Ключевые слова: автоматизация, система машин, производство сельскохозяйственных культур.

Y. A. Voloshin

ALGORITHM FOR AUTOMATED FORMATION OF MACHINE SYSTEMS FOR CROP PRODUCTION

Volgograd State Technical University

The problem of automated forming of machine systems for crop production is considered. The use of brute force method for solving this problem is demonstrated. An algorithm for solving the problem, taking into account its features, is offered. A block diagram of the algorithm is shown.

Keywords: automation, machine system, crop production.

Задача формирования системы машин для производства сельскохозяйственных культур в настоящее время решается экспертным путем. Эта задача является рутинной, так как эксперт на основе критериев сравнения всегда может выбрать из двух конкретных систем машин лучшую, и в то же время сложной ввиду большого числа представленных на рынке моделей техники и разнообразия условий производства культур. Это обуславливает потребность в автоматизации решения данной задачи.

Для выбора (или разработки) алгоритма автоматизированной оптимизации для какой-либо предметной области необходимо знать ее специфику. Оценим количество возможных вариантов системы машин для выполнения технологий возделывания сельскохозяйственных культур (далее – система машин).

В настоящее время на рынке представлено около 22 000 моделей сельскохозяйственной техники (тракторы, комбайны, различные типы орудий и специальных машин); при этом техника различается не только в зависимости от выполняемой технологической операции, но и от возделываемой культуры [1].

Тракторы и сельскохозяйственные орудия подразделяются на тяговые классы. В каждом тяговом классе представлена техника определенного диапазона мощности (для энергосредств) или требуемой мощности энергосредства (для орудий). Для иностранной техники, которая не подразделяется на тяговые классы, аналогичные рекомендации можно дать исходя непосредственно из мощности у энергосредств или требуемой мощности энергосредств у орудий. Для различных технологических операций и различных площадей полей существуют рекомендации по использованию сельскохозяйственной техники определенных тяговых классов [2].

Общее число моделей сельхозтехники, большое разнообразие типов техники и то, что для конкретных условий модели орудия и трактора будут выбираться из определенного тягового класса (или мощностного диапазона), позволяет предположить, что для каждой технологической операции количество моделей техники для выбора не будет превышать нескольких сотен. Для оценки вычислительной сложности задачи примем это количество равным 500.

Относительно использования техники все технологические операции при производстве сельскохозяйственных культур можно разде-

лить на две группы: операции, выполняемые самостоятельными машинами и операции, выполняемые машинно-тракторными агрегатами (МТА), состоящими из энергосредств (в большинстве операций – тракторов) и орудий [3]. Небольшое количество моделей техники позволяет выбрать самостоятельные машины прямым перебором.

Для операций с применением МТА количество вариантов МТА не превышает 250 тыс. В технологиях возделывания сельскохозяйственных культур для Волгоградской области количество различных технологических операций с применением МТА не превышает 12 [4]. Если МТА для каждой операции могут быть подобраны независимо от других операций, то общее количество необходимых вычислений получается из сложения количеств вычислений для всех операций. Таким образом, для подбора системы машин для одной технологии необходимо оценить не более 4 млн. вариантов МТА (реальное их число будет намного меньше). При достаточно простых функциях оценки МТА (несколько алгебраических операций) время вычисления такого количества оценок на современных ПК составляет несколько секунд, что позволяет использовать метод прямого перебора для решения задачи автоматизированного формирования систем машин.

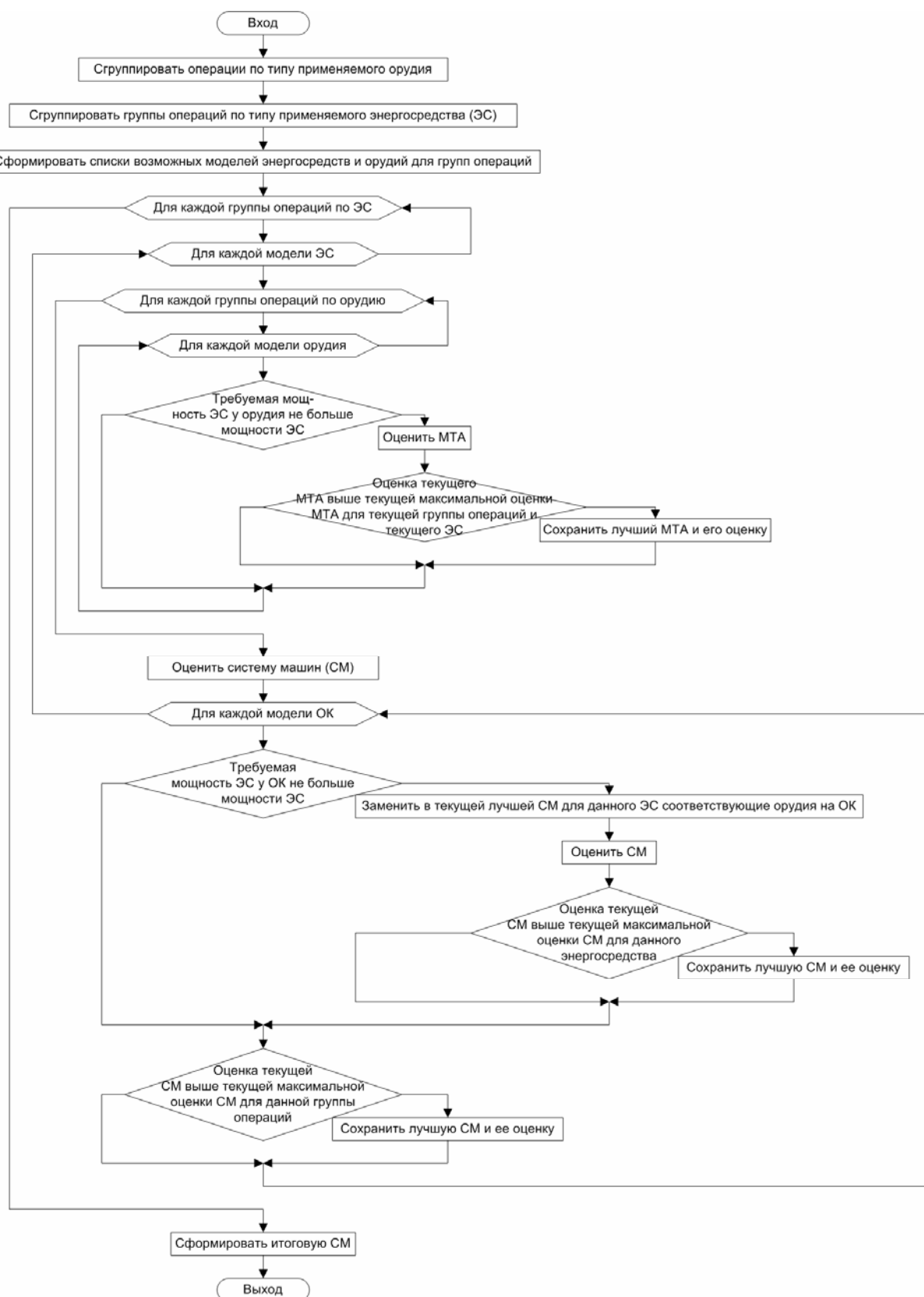
При прямом переборе качество найденного решения напрямую зависит от качества функции оценки решения. Для различных пользователей наиболее важными будут следующие показатели системы машин – стоимость приобретения, рентабельность, надежность, производительность, удобство обслуживания. Следовательно, нужно предусмотреть возможность выбора пользователем оценочной функции из нескольких вариантов. Оценочная функция должна соответствовать рекомендациям, приведенным в работе [5].

Кроме того, формирование системы машин имеет свои особенности, которые должны быть отражены в алгоритме.

Выше было обозначено требование независимости подбора МТА для каждой операции. В действительности операции с применением МТА можно разделить на две большие группы по требованию к энергосредству – высокоэнергозатратные и низкоэнергозатратные. Для операций одной группы используются одни и те же энергосредства [2]. Исходя из вышесказанного, в алгоритме операции группируются по типу

энергосредства; перебор техники для каждой группы операций осуществляется при помощи

вложенных циклов. Во внешнем цикле перебираются энергосредства, в среднем – операции



Блок-схема алгоритма автоматизированного формирования системы машин для производства сельскохозяйственных культур

внутри группы, во внутреннем – орудия. В результате для каждой группы операций получаем лучшую систему машин.

Еще одной особенностью является наличие орудий-комплексов (далее ОК), сочетающих в себе несколько типов орудий и, соответственно, предназначенных для выполнения нескольких операций. Рассмотрение ОК одновременно с простыми орудиями усложнило бы алгоритм. Однако свойства ОК, наравне с обычными орудиями, влияют на выбор энергосредства. Нами предложено организовать их перебор внутри цикла перебора энергосредств (внешний цикл) после формирования лучшей системы машин на основе обычных орудий. При переборе ОК каждое ОК заменяет собой обычные орудия на соответствующих операциях, и производится оценка полученной системы машин.

ОК могут выполнять операции из разных групп – в частности, производить сев (высокоэнергосредстватная операция) одновременно с внесением удобрений (низкоэнергосредстватная операция). Однако такое объединение операций должно быть задано заранее в технологии возделывания. Поэтому ситуации, когда использование ОК вносит изменения в требования к энергосредствам обеих групп операций, не возникает.

Блок-схема описанного алгоритма изображена на приведенном рисунке.

Таким образом, при автоматизированном формировании системы машин для производства сельскохозяйственных культур целесообразно использовать метод полного перебора – он прост в реализации, абсолютно точен и позволяет получить результат достаточно быстро.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агробизнесконсалтинг. Статистика баз данных АСС «Сельхозтехника» и АСС «Хлебопек» [Электронный ресурс]. – [2011]. – Режим доступа : <http://www.agrobase.ru/Site/Stat/Default.aspx>.
2. *Ивасюк, В. В.* Выбор эффективного набора сельскохозяйственных машин в зернопроизводстве / В. В. Ивасюк // Вестник АПК Верхневолжья. – 2010. – № 1. – С. 97–100.
3. *Колпакова, В. А.* Информационная аналитическая система автоматизации подбора сельскохозяйственной техники в растениеводстве / Л. А. Колпакова, Т. Н. Боброва, А. А. Вальков // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2008. – № 9. – С. 91–95.
4. Программирование урожайности сельскохозяйственных культур при возделывании их с применением инновационных технологий: монография / А. С. Овчинников, И. Б. Борисенко, Ю. Н. Плещачёв. – Волгоград : ВГСХА, 2011. – 124 с.
5. *Санжапов, Б. Х.* Модель принятия решений на основе многокритериальной оценки объектов в виде нечетких распределений / Б. Х. Санжапов, И. С. Калина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 7). – С. 78–82.

УДК 004.838.5

М. А. Дыков

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОИСКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОВАРОВ В ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНАХ

Волгоградский государственный технический университет

dmawork@mail.ru

В данной статье предложен метод автоматического поиска альтернативных товаров в интернет-магазинах на основании абдуктивных рассуждений. Предложена методика, основанная на индуктивных рассуждениях и автоматическом извлечении знаний из сети Интернет, предназначенная для формирования базы знаний, необходимой для выдвижения абдуктивных гипотез.

Ключевые слова: абдукция, индукция, автоматическое извлечение знаний, интернет-магазин.

М. А. Dykov

AUTOMATIZATION OF SEARCHING FOR PRODUCTS' ALTERNATIVES IN INTERNET-SHOP

Volgograd State Technical University

In this article we proposed a new method of automatic search for alternatives products in Internet-Shop with using of abduction reasoning. We proposed technique of creation Knowledge Base necessary for abductive hypothesis making, based on inductive reasoning and automatic knowledge extraction from the Internet.

Keywords: abduction, induction, automatic knowledge extraction, Internet-shop.

В настоящее время рынок интернет-торговли является бурно развивающимся. По данным на 2011 год продажи через Интернет составили

8 % от всех продаж [1]. Однако в сфере интернет-торговли, в силу ее специфики, существует ряд проблем, которые уменьшают количество

потенциальных продаж. Одна из них – возникновение случаев, когда желаемый пользователем товар отсутствует в ассортименте. Большинство интернет-магазинов на данном этапе теряют потенциального покупателя. Однако некоторые, например TowerRecords, хранят в базе данных даже те товары, которые отсутствуют в их ассортименте. Тем самым, они пытаются сохранить потенциальных покупателей, сообщая им информацию вида: «Приносим извинения. В данный момент товар отсутствует в продаже, но скоро мы добавим его в ассортимент». Однако такой подход в большинстве случаев все равно не решает проблему, так как покупатель, скорее всего, не будет ждать, а пойдет искать продукт с требуемым ему функционалом в другом месте [2].

В розничной торговле данный вопрос решается путем компоновки ассортимента магазина определенным образом. Способ компоновки товаров рассчитывается экспертами таким образом, чтобы товары со схожим функционалом и могущие заменить друг друга находились в одном месте. Таким образом, покупатель, не найдя в магазине нужный ему конкретный товар, может посмотреть по сторонам и подобрать себе товар со схожим функционалом. Еще одним способом определения схожести между товарами является социологический опрос, в котором каждому опрашиваемому предлагается определить схожесть между парой предлагаемых товаров [3].

Однако данные подходы не приемлемы в крупных интернет-магазинах по ряду причин: во-первых, наличие большого и быстро меняющегося ассортимента товаров, из-за чего потребуется большое количество человеческих ресурсов, чтобы поддерживать информацию о схожести между товарами в актуальном состоянии; во-вторых, из-за используемых методов, поисковые системы интернет-магазинов не выявляют категорию и свойства запрашиваемого товара и, следовательно, при его отсутствии не обладают информацией для поиска альтернативы.

Вторая проблема может быть решена посредством использования метода семантического поиска в интернет-магазинах [4].

Следовательно, необходимо разработать механизм, позволяющий максимально автоматизированно определять схожесть и взаимозаменяемость между товарами.

Схожесть между товарами определяется схожестью между их функционалом. При этом товар может обладать несколькими функциями, но можно выделить ряд основных, которые и определяют категорию товара. Каждая из основных функций товара может быть осуществлена благодаря одной или нескольким характеристикам, которыми обладает товар. При этом для выполнения ряда функций подойдут любые значения характеристик, а для ряда – только определенные. Пример выявления основной функции товаров и сопоставление с ее характеристиками приведен в таблице.

Пример основных функций и характеристик товаров

Категория	Основная функция	Характеристика, отражающая основную функцию	Значение характеристики
Телевизоры	Смотреть телепередачи	Экран	10–60 дюймов
		TV-тюнер	Любой
Монитор	Смотреть видео	Экран	10–30 дюймов

Таким образом, товары одной категории обладают одинаковыми основными функциями и одинаковыми характеристиками, которые их реализуют – поэтому они взаимно заменяемы. Необходимо разработать метод, позволяющий определять сходство между товарами из различных категорий.

Абдукция – одна из форм рассуждений, при которой из посылки, являющейся условным высказыванием, и заключения вытекает другая посылка. Абдукция является методом генерации гипотез на основании наблюдений [5, 6].

В качестве первой посылки возьмем следующее высказывание: «все товары категории 1 обладают характеристиками 1». В качестве наблюдения возьмем: «некоторые товары категории 2 обладают характеристиками 1». На основании посылки и наблюдения применив абдуктивный вывод можно получить следующую гипотезу: «некоторые товары категории 2 могут быть использованы вместо товаров категории 1». Действительно, если в качестве «характеристики 1» брать основные характеристики товаров «категории 1», то это означает, что группа то-

варов из «категории 2», обладающая данными характеристиками, сможет выполнять весь основной функционал товаров «категории 1». Например, из таблицы на основании предпосылки: «Все мониторы обладают экраном 10–30 дюймов» и наблюдения: «Ряд телевизоров обладает экраном 10–30 дюймов» можно предположить, что «Ряд телевизоров может быть использован вместо мониторов».

Таким образом, для автоматического определения возможности использования одних групп товаров вместо других необходимо создать базу знаний, в которой для каждой категории товаров будет составлено описание вида (категория; основные функции; основные характеристики; ограничения на значения основных характеристик; другие характеристики).

Помимо вышеописанных гипотез, с помощью абдуктивных рассуждений на базе знаний можно делать гипотезы следующих видов: «товар 1 и товар 2 при совместном использовании могут заменить товар 3» или «товар 1 может заменить товар 2 и товар 3».

Таким образом, вместо товара, отсутствующего в ассортименте, покупателю в ответ на его запрос можно выдавать следующие предложения:

- приобрести другой товар с таким же функционалом;
- приобрести другой товар, обладающий требуемым функционалом, а также дополнительным;
- приобрести несколько товаров вместо желаемого, способных осуществить требуемый функционал.

При этом предлагаются те возможные альтернативные товары, свойства которых отвечают поисковому запросу, а цена соответствует цене желаемого товара.

Возникает вопрос: каким образом возможно формировать базу знаний, необходимую для абдуктивных рассуждений? Предлагается два подхода.

Первый подход – экспертный. В данном подходе эксперт вручную для каждой категории товаров выделяет основные функции, характеристики товаров, реализующие их, и ограничения, накладываемые на характеристики. К достоинствам данного подхода можно отнести высокое качество получаемой базы знаний. К недостаткам: большие затраты человеческих ресурсов, необходимость постоянного расширения и модификации базы знаний при появлении новых товаров и категорий.

Второй подход основан на автоматическом извлечении необходимых знаний из сети Интернет. При этом необходимо определить, какие функции может выполнить конкретный товар, а также характеристики и ограничения, необходимые для выполнения данных функций. В качестве источников знаний предлагается использовать:

1) базы знаний:

- Wolfram|alpha [7] – крупнейшая англоязычная база знаний из всех областей с развитым математическим аппаратом;

- каталоги товаров интернет-магазинов;

2) базы документов:

- Wikipedia и другие wiki-ресурсы;

- результаты работы систем семантического поиска и извлечения документов в сети Интернет, например, работа Е. Леонова [8];

3) интернет-версии словарей;

4) результаты поисковой выдачи таких поисковых систем, как Google, Yandex и др.;

5) результаты поисковой выдачи систем семантического поиска и извлечения документов в сети Интернет.

Предлагается следующая методика:

1) выявление функций, которые может выполнить рассматриваемый товар. На этом этапе предлагается использовать базы знаний и словари. Выделение функций можно осуществить с помощью существующих семантических анализаторов, например, анализатора, разработанного группой ученых с факультета лингвистики РГГУ [9]. Эти анализаторы способны для заданного документа строить семантическую сеть, с последующим выделением областей сети с необходимыми видами связей;

2) поиск предметов, которые уже использовались для выполнения найденных функций. На данном этапе для извлечения знаний предлагается использовать следующие поисковые системы:

а) поиск и извлечение документов, в которых фигурирует решение поставленной задачи (функции). На данном этапе поставленная задача подается в качестве входных параметров в поисковые системы и в системы семантического поиска документов;

б) извлечение из найденных документов предметов, используемых для решения поставленной задачи. Извлечение возможно двумя способами и их комбинацией: с помощью существующих семантических анализаторов или при помощи частотного анализа предметов, входящих в найденные документы: предметы,

входящие в большинство найденных документов, вероятно, будут являться предметами, способными решить поставленную задачу;

3) поиск характеристик найденных предметов. В качестве источников знаний предлагается использовать базы знаний;

4) выделение с использованием индуктивных рассуждений ряда общих характеристик и ограничений, которыми обладают различные предметы, выполняющие одну и ту же функцию.

Достоинством второго подхода является возможность автоматического формирования и модификации требуемой базы знаний товаров; недостатком – более низкое качество знаний.

Комбинация этих двух подходов позволит значительно сократить время, затрачиваемое экспертами и получить базу знаний требуемого качества.

Таким образом, в данной статье:

- предложена структура базы знаний товаров, необходимой для автоматического поиска альтернативных товаров в интернет-магазине;
- предложен метод поиска альтернативных товаров на основании абдуктивного вывода;
- рассмотрены подходы к формированию базы знаний товаров требуемой структуры;
- предложена методика формирования базы знаний товаров с использованием механизмов автоматического поиска и извлечения знаний из сети Интернет, а также индуктивных рассуждений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Understanding Online Shopper Behaviors [Электронный ресурс]. – [2011]. – Режим доступа : <http://www.forrester.com/Understanding+Online+Shopper+Behaviors+US+2011/fulltext/-/E-RES59237?docid=59237>
2. Nielsen J. Search [Электронный ресурс] / J. Nielsen. – [2000]. – Режим доступа : http://original.jamesthompson.com/files/search_122200.pdf
3. Perceptual Modelling of Product Similarities Using Sorting Data / D. Bimler, J. Kirkland; под ред D. Bimler. – Baton Rouge: Marketing Bulletin, 1998. – 11 с.
4. Дыков, М. А. Анализ семантики поискового запроса в интернет-магазине / М. А. Дыков, П. Н. Воробкалов // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 3). – С. 56–60.
5. Камаев, В. А. Абдукция – инструмент концептуального проектирования новых технических систем / В. А. Камаев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2. – С. 32–36.
6. Камаев, В. А. Абдукция и метод Сократа / В. А. Камаев // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'11» (Дивноморское, 2–9 сент. 2011 г.). В 4 т. Т. 1 : докл. секций междунар. науч.-техн. конференций «AIS'11» и «CAD-2011» / «Южный федеральный ун-т» [и др.]. – М., 2011. – С. 277–281.
7. Wolframalpha [Электронный ресурс]. – [2011]. – Режим доступа : <http://www.wolframalpha.com>
8. Леонов, Е. А. Формализация процесса мониторинга информации в сети Интернет при создании предметно-ориентированных хранилищ данных: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2011.
9. Автоматическая обработка текста [Электронный ресурс]. – [2011]. – Режим доступа : <http://aot.ru>

УДК 004.9:324

Н. В. Крапивина, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРВОИСТОЧНИКОВ ПО ПРИЗНАКУ ЗНАНИЙ О НАНОТЕХНОЛОГИЯХ И ВЫЯВЛЕНИЕ ОПИСАНИЙ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Волгоградский государственный технический университет

kravivina.nv@gmail.com, korobkin@volgograd-trv.ru, saf@vstu.ru

В данной статье рассматривается метод автоматизированной обработки электронных документов и извлечения из них информации по признаку принадлежности к тематике «Нанотехнологии». Также рассмотрены модели представления знаний и разработанная онтология предметной области.

Ключевые слова: нанотехнологии, представление знаний, онтологии, извлечение знаний, автоматизированная обработка электронных документов.

N. V. Krapivina, D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov

AUTOMATED FILTERING OF ELECTRONIC PRIMARY SOURCES ON THE BASIS OF KNOWLEDGE ABOUT NANOTECHNOLOGY AND IDENTIFYING DESCRIPTIONS OF NANOTECHNOLOGY

Volgograd State Technical University

This article describes method of automated processing of electronic documents and extracting information from them on grounds belonging to the subject of «Nanotechnology». It is also considered a model of knowledge representation and subject area ontology.

Keywords: Nanotechnology, knowledge presentation, ontologies, knowledge extraction, automated processing of electronic documents.

1. Системы извлечения знаний

Самая распространенная форма представления знаний – естественно-языковые тексты. Текстовая форма является наиболее естественной; таким образом, знания легко воспринимаются, порождаются, тиражируются и модифицируются. Однако интенсивный рост текстовых массивов служит причиной трудной доступности целевых знаний, когда в них возникает потребность. Дополнительной проблемой является сложность фильтрации текстовых массивов. Информационно поисковые системы не рассчитаны на решение данной задачи, поскольку оперируют словами текста, а не знаниями, содержащимися в нем.

В связи с этим приобретают актуальность системы извлечения знаний из текстов. В результате извлечения знания приобретают явный вид и становятся пригодными для автоматизированной обработки.

Проблеме извлечения посвящено множество работ, объединяемых в единый класс задач извлечения информации из текстов. Извлекаемая информация представлена структурами данных, поля которых заполняются текстовыми фрагментами.

Недостатком большинства систем извлечения знаний является неприменимость к анализу текстов на русском языке ввиду отсутствия доступных семантических анализаторов и особенностями русской грамматики. Также использование подобных систем в специфичных областях (таких как нанотехнологии) сильно затруднено из-за сложности формализации последних. Кроме того, для эффективного извлечения, знания должны быть представлены в определенной, пригодной для анализа форме.

2. Проблема представления знаний. Онтологии

Для формализации и представления знаний разрабатываются специальные модели представления знаний и языки для описания знаний.

Модели представления знаний относятся к прагматическому направлению (основано на предположении о том, что мыслительная деятельность человека – «черный ящик») в исследованиях по искусственному интеллекту. При этом в системах, основанных на знаниях, информационные структуры представляются в форме декларативных (описательных) знаний,

а алгоритмы и эвристики – в форме процедурных знаний.

Общая проблема представления знаний включает ряд частных проблем:

представление декларативных знаний как данных, наделенных семантикой (фактов);

представление процедурных знаний как отношений между элементами модели, в том числе в виде процедур и функций;

представление метазнаний – правил обработки фактов, способов организации логического вывода, методов решения задач пользователем, порождения новых знаний и т. д.

Наиболее острой является первая из вышеперечисленных проблем, так как на сегодняшний день большинство электронных ресурсов и документов связаны синтаксически. Это означает, что ЭВМ используются для представления и хранения информации, а люди – для ее интерпретации. Таким образом, сложная часть процесса извлечения знаний остается неавтоматизированной.

Попытка всеобщей формализации предметных областей привела к появлению онтологий [1,2] – спецификации концептов предметной области. Причем спецификация должна иметь формат, который мог бы быть легко распознан и обработан ЭВМ; общий язык и общее понимание.

Языки представления онтологий:

1. Структурные объекты семантической сети.
2. Логика предикатов первого порядка
3. RDFS
4. Дескрипционные логики
5. OWL (Ontology Web Language)

3. Построение онтологии предметной области по тематике «Нанотехнологии»

Для разработки онтологии предметной области «Нанотехнологии» в качестве языка описания онтологии была выбрана одна из семейства дескрипционных логик – ALC-логика [1, 2].

Выбор был обоснован выразительностью рассматриваемой логики по отношению к аналогам, описанным в п. 2; разрешимостью; наличием средств логического анализа. Любые сложные понятия могут быть представлены в виде совокупности простых.

Документ, содержащий знания по нанотехнологиям, представляется в виде совокупности терминологий и данных базы знаний.

Фрагмент базы знаний (терминологическая часть):

Нанотехнологии $\equiv$ Технологии $\cap \forall$ Оперировать.Нанообъект.

Нанообъект $\subseteq$ физический_объект $\cap \forall$ Иметь_размер_более.1нм $\cap$

$\forall$ Иметь_размер_менее.100нм.

Наночастицы $\subseteq$ Нанообъекты.

Частицы $\subseteq$ Наночастицы.

Растворитель $\subseteq$ вещество $\cap \forall$ Растворять.вещество.

Раствор $\subseteq$ смесь $\cap \forall$ Состоять_из.(Частицы $\cap$ Растворитель).

Взвесь $\subseteq$ смесь $\cap \forall$ Состоять_из.(Частицы $\cap \forall$ Содержаться_в (жидкость $\cup$ газ)).

Коллоидная_система $\subseteq \neg$ Раствор $\cap \neg$ Взвесь.

Коллоидные_частицы $\subseteq$ Наночастицы $\cap \forall$ Иметь_размер_более.0.001мкм $\cap$

$\forall$ Иметь_размер_менее.0.1мкм $\cap \forall$ Входить_в_состав.Коллоидная_система.

Коллоидные_частицы $\subseteq$ Мицеллы.

Наноматериалы $\subseteq$ Материалы $\cap \forall$ Состоять_из.Наночастицы.

Как видно из фрагмента, иерархия концептов, задаваемая терминологией, может использоваться для определения понятий:

Нанообъекты $\subseteq$ Наночастицы $\subseteq$ Коллоидные_частицы $\subseteq$ Мицеллы.

Следовательно, Мицеллы можно отнести к наночастицам, которые входят в класс нанообъектов.

Фуллерен $\subseteq \forall$ Аллотропная_форма.Углерод $\cap \forall$ Иметь_размер_более.1нм $\cap$

$\forall$ Иметь_размер_менее.100нм.

Букибол $\equiv$ Фуллерен.

Бакибол $\equiv$ Фуллерен.

Нанотрубки $\subseteq \forall$ Состоять_из.Букибола $\cap \forall$ Иметь_форму.Трубка.

Следовательно:

Нанотехнологии $\subseteq$ Нанообъекты $\subseteq$ Нанотрубки.

4. Методика автоматизированного извлечения знаний из электронных документов по тематике «Нанотехнологии»

Выявление описаний нанотехнологий из массива электронных документов представляет собой задачу определения поглощения или терминологий документа терминологией предметной области (теорией).

Методика преобразования массива документов в тематические знания представлена на рис. 1.

Ввиду того, что для выявления описаний предметная область должна быть формализована, оперирование синтаксическими конструкциями языка не является подходящим методом, поэтому имеет смысл использование семантического анализатора русского языка [3]. Для реализации методики был применен семантический анализатор интернет-ресурса АОТ (автоматизированная обработка текстов).

Выход семантического анализатора имеет структуру графа, ребра которого показывают отношения, а вершины – семантические узлы.

Семантический узел в данном контексте – элемент текстовой семантики, в котором все синтаксические валентности заполнены.

Семантическая структура (рис. 2) представляется следующим образом:

Отношение 1(СемУз2,СемУз1);

Отношение 2(СемУз3,СемУз1);

Фрагменты семантической структуры могут быть преобразованы в концепты логики ALC, они формируют терминологию электронного документа. Предполагается, что до этого процесса была сформирована онтология предметной области, содержащая обобщенную терминологию.

После преобразования семантической структуры фрагмента осуществляется проверка на поглощение терминологией онтологии терминологии фрагмента документа, т. е. должно выполняться условие:

$$T \subseteq T_{\phi},$$

где T – терминология онтологии предметной области (формальная теория); T_{ϕ} – терминология фрагмента документа.



Рис. 1. Блок-схема извлечения информации о нанотехнологиях

Для оптимизации процесса извлечения информации, предложено ограничить множество анализируемых документов тематикой «Нанотехнологии». Для этого применяется тематический фильтр [4, 5], в основе которого лежит многоступенчатый алгоритм кластеризации,

реализованный с помощью самоорганизующихся карт Кохонена, алгоритма поиска «Формального элемента» и алгоритма, определяющего степень близости документа к указанной тематике. Схема работы тематического фильтра представлена на рис. 3.

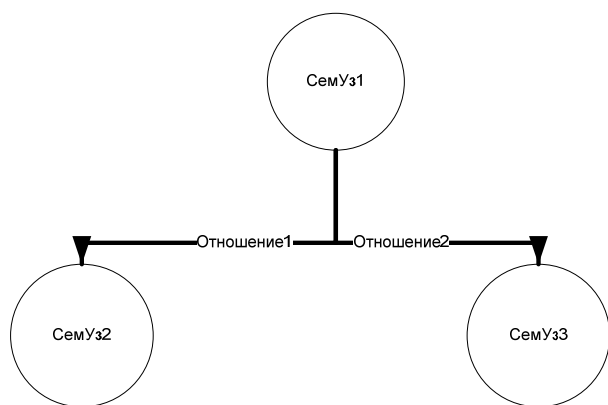


Рис. 2. Элемент семантической структуры

Выводы

Нанотехнологии и наноинженерия на сегодняшний день являются наиболее перспективным направлением в развитии российской и зарубежной науки. Электронными источниками накоплены большие массивы информации о данной предметной области, однако электронные ресурсы являются слабоструктурированными.

Описанная методика позволяет обнаружить в массиве электронных документов знания о нанотехнологиях, используя тематический фильтр, разработанную онтологию предметной области, а также механизм формальных теорий.

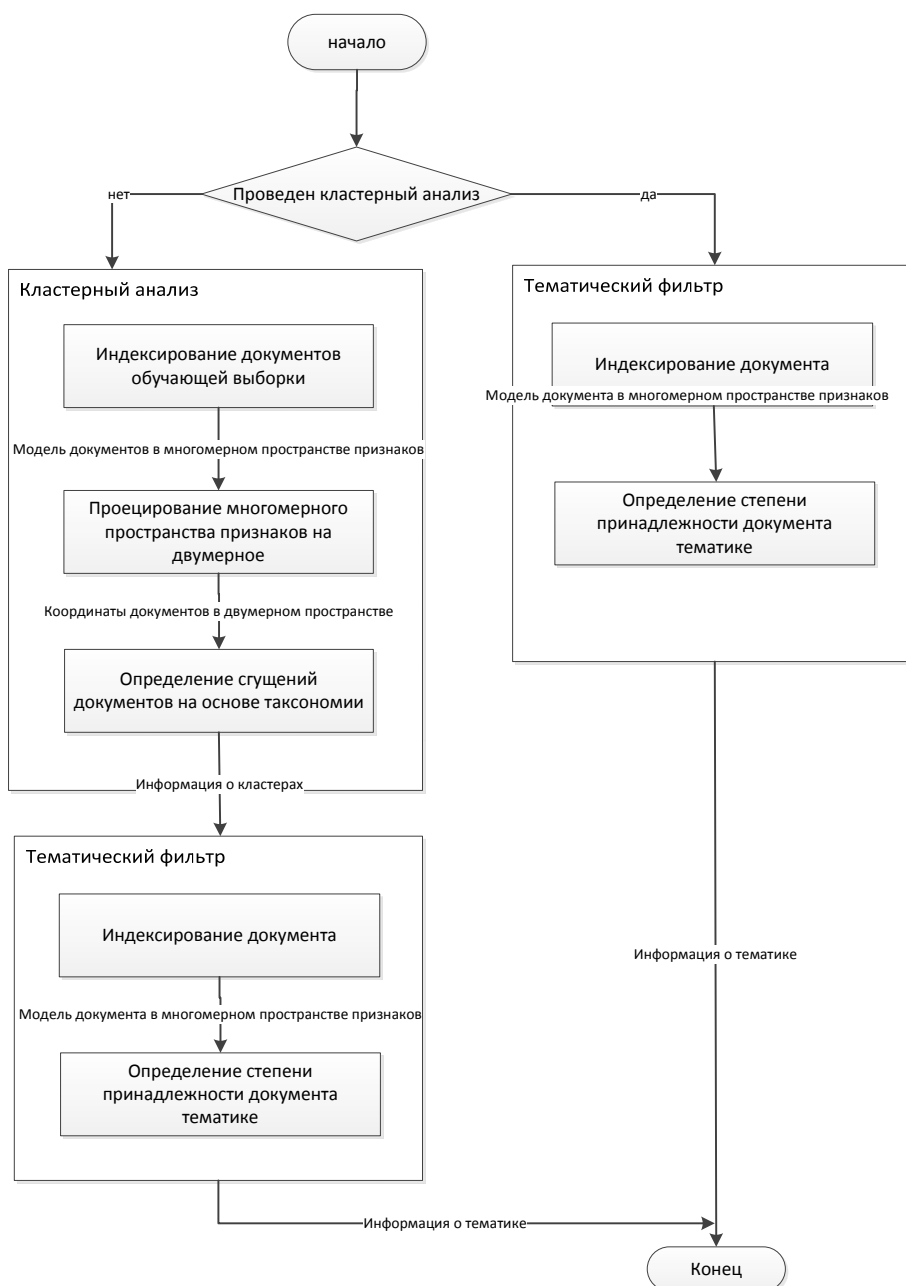


Рис. 3. Тематическая фильтрация

Апробация разработанной методики произведена в рамках работы по государственному контракту № 16.647.11.2025 от 12 сентября 2011 года «Создание базы физико-технических знаний и прогнозирование на ее основе появления новых нанотехнических систем».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломов, П. А. Интеграция онтологий с использованием тезауруса для осуществления семантического поиска / П. А. Ломов, М. Г. Шишаев // Труды Института системного анализа РАН. – 2009. – № 4. – С. 30–38.
2. Олейник, А. Г. Проблемы разработки онтологий региональных информационно-аналитических ресурсов / А. Г. Олейник // VI Всероссийская школа-семинар : Труды Института системного анализа РАН. «Прикладные проблемы управления макросистемами» / под ред. Ю. С. Попкова, В. А. Путилова. Т. 28. – М.: КомКнига, 2006. – С. 299–306.
3. Коробкин, Д. М. Модель представления структурированной предметной информации в виде физических эффектов в тексте на естественном русском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – СПб.: СПбГПУ, 2009. – № 7. – С. 17–21.
4. Коробкин, Д. М. Методика автоматизированного поиска и выделения описаний новых физических эффектов / Д. М. Коробкин, М. Ю. Попов, С. А. Фоменков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(17) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – (Серия «Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии»; вып. 2). – С. 104–108.
5. Коробкин, Д. М. Автоматизированная методика извлечения структурированных физических знаний в виде физических эффектов из текстов на естественном английском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 10). – С. 116–120.

УДК 681.3

С. А. Фоменков, С. Г. Колесников, Д. М. Коробкин

МЕТОДИКА МОДИФИКАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Волгоградский государственный технический университет

saf@vstu.ru, sk@vstu.ru, dkorobkin80@mail.ru

В статье представлено описание методики модификации информационного обеспечения базы данных физических эффектов. Описаны обобщенные процедуры методики и рекомендации по их выполнению. Проиллюстрировано использование методики на конкретном примере.

Ключевые слова: методика, база данных физических эффектов, программный комплекс, нанотехнические системы.

S. A. Fomenkov, S. G. Kolesnikov, D. M. Korobkin

METHODS OF UPDATING DATAWAVE OF PHYSICAL EFFECTS DATABASE

Volgograd State Technical University

The methods of updating datawave of physical effects presented database are in the article. The generalized procedures of the methods and the recommendation about their performance are described. Methods' appication is presented.

Keywords: methods, database of physical effects, softwave complex, with specific examples nanotechnical systems.

На кафедре САПР и ПК ВолгГТУ создан программно-информационный комплекс по представлению и использованию структурированных физических знаний в форме физических эффектов (ФЭ) [1]. Данный комплекс проектировался и развивался как инструмент поддержки учебной, научной и производственной деятельности определенной группы пользователей или индивидуального пользователя. Для этого предусмотрены разнообразные возможности для адаптации к реальной задаче, решаемой пользователем, его информационным потребностям. Одной из главных таких возможностей является открытость информационного

обеспечения. Комплекс имеет все средства для того, чтобы пользователь (без специальной подготовки) мог самостоятельно проводить модификацию фондов ФЭ. Процесс модификации заключается в корректировке существующих фондов ФЭ и в создании (при необходимости) новых специализированных фондов ФЭ (например, для информационной поддержки преподавания и изучения какой-либо учебной дисциплины, задач поискового конструирования конкретного класса технических систем, изобретательских задач в определенной области техники и т. д.). В настоящей работе излагается методика создания объектно-ориентированных

фондов ФЭ, обобщающая наш опыт формирования информационного обеспечения автоматизированных систем, оперирующих с ФЭ [1–3]. Использование методики проиллюстрировано на примере создания фонда ФЭ в области наносистем, позволяющего производить прогнозирование появления новых наносистем.

Методика состоит из ряда обобщенных процедур, состав которых и краткие рекомендации по их выполнению приведены ниже.

Анализ имеющегося массива физических эффектов

Необходимо провести поиск в имеющемся массиве ФЭ и отобрать все эффекты, подходящие для включения в формируемый фонд, в соответствии с его специализацией. Поиск может проводиться любым из способов, подробно описанных в [1, 4, 5]: по атрибутам компонент входа, объекта, выхода; атрибутам компонент действия, объект действия, особые условия и ограничения поискового признака «практическое применение ФЭ»; ключевым словам в случае использования полнотекстового поиска. Для полноты поиска рекомендуется комбинированное использование различных способов.

Подбор «первичной» информации

Данная процедура является центральной в рассматриваемой методике, поскольку от качества «исходной (первичной)» информации зависит, в итоге, и качество «конечной» информации – описаний ФЭ. В процедуре подбора «первичной» информации очень важен вопрос полноты поиска (не пропустить ценную релевантную информацию). Для реализации процедуры рекомендуется обратить внимание на следующие источники информации:

1) предметные каталоги научных библиотек города и крупнейших библиотек страны;

2) информационные издания по физике. Основным изданием такого рода является реферативный журнал ВИНТИ «Физика». Другими информационными изданиями служат систематизированный библиографический указатель в виде бюллетеней сигнальной информации СИ «Физика», кумулятивный систематизированный библиографический указатель (СБУ – К) и база данных (БД) типа «библиография + рубрикационные шифры». При удачном выборе рубрик и внимательной работе с РЖ «Физика» обеспечивается высокая степень полноты поиска «первичных» источников, со-

держащих вполне современную информацию. Для повышения степени полноты поиска рекомендуется увеличивать количество просматриваемых рубрик (расширение поиска за счет смежных областей физики). В ряде случаев, если это соответствует специализации формируемого фонда, целесообразно привлечение других реферативных журналов, например, РЖ «Химия», РЖ «Металлургия», РЖ «Механика» и т. д.;

3) патентный массив изобретений. Необходимо внимательно изучить иерархический рубрикатор Международной патентной классификации и выбрать из него рубрики, соответствующие специализации формируемого фонда;

4) научные журналы физического профиля. Необходимо периодически изучать содержание центральных научных физических журналов, поступающих в наиболее крупные научно-технические библиотеки страны. При этом особое внимание следует обратить на журнал «Успехи физических наук» (УФН). Помимо УФН рекомендуются к просмотру также «Журнал технической физики», «Физика твердого тела», «Физика и техника полупроводников», «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Инженерно-физический журнал». Можно привлекать и более узкие специализированные журналы, в том числе и по родственным с физикой научным направлениям, если они соответствуют специализации формируемого фонда ФЭ. К достоинству научных журналов следует отнести то, что они содержат новейшую информацию, еще не нашедшую отражения в монографиях, учебной и справочной литературе, а также в различных реферативных изданиях (типа реферативного журнала, экспресс-информации, сигнальной информации и т. п.);

5) непубликуемые источники (так называемая «серая литература»). Необходимо изучить за последние годы бюллетени ВНИИ (Всероссийский научно-технический информационный центр) по кандидатским и докторским диссертациям, а также сборники рефератов ВНИИ открытых научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских разработок. В данных источниках информации, на которые обычно не обращают внимания (в силу труднодоступности), может в сконцентрированном виде содержаться ценная информация фактографического характера.

Рассматриваемая процедура должна заканчиваться непосредственным сбором всей вы-

бранной различными способами информации. Для этого используются как традиционные формы и виды информационного обслуживания, так и электронные средства коммуникации и доступ к отечественным и зарубежным базам данных. В первую очередь необходимо обратить внимание на возможности глобальной сети Internet.

Анализ «первичной» информации

Сутью данной процедуры является анализ всей собранной информации и ее сортировка. Прежде всего, необходимо произвести разделение информации на две большие группы. Первая группа содержит сведения для составления описаний новых ФЭ, вторая – для модернизации существующих описаний ФЭ. Информация первой группы классифицируется по отдельным ФЭ (выделение различных ФЭ), информация второй группы – по рубрикам описаний существующих ФЭ.

Данная операция трудно формализуема и неоднозначна. В силу этих причин для ее выполнения могут быть даны только рекомендации общего характера. Описание этих рекомендаций приведено в [1, 2].

Составление описаний физических эффектов

На основе отсортированной в результате предшествующей процедуры информации составляются описания выходной и входной карт новых ФЭ в соответствии с выбранной моделью представления ФЭ, а также производится модернизация (уточнение, дополнение, расширение) уже существующих описаний ФЭ. Подробные методические указания к составлению описаний ФЭ с использованием различных моделей представления ФЭ приведены в [1].

Отметим, что при конкретных реализациях представленной методики отдельные процедуры могут проводиться в сокращенном виде или даже опускаться.

Наиболее трудоемкие процедуры методики модификации автоматизированы [6, 7] и поддерживаются подсистемой пополнения базы данных ФЭ из электронных первичных источников информации.

Кратко проиллюстрируем использование методики на конкретном примере.

В ВолгГТУ в рамках работы по государственному контракту № 16.647.11.2025 от 12 сентября 2011 года «Создание базы физикотехнических знаний и прогнозирование на ее основе появления новых нанотехнических систем» разработан программный комплекс по представлению и использованию структурированных физических знаний в форме ФЭ.

Программный комплекс включает следующие компоненты:

- а) база данных по физическим эффектам (БД ФЭ);
- б) подсистема поиска ФЭ по запросам различного типа;
- в) подсистема синтеза физических принципов действия;
- г) подсистема пополнения БД ФЭ из электронных первичных источников информации.

База данных ФЭ в качестве основного ядра содержит эффекты из так называемой глобальной базы, подробно описанной в [1, 8]. Для проверки возможности решения задач прогнозирования новых нанотехнических систем нами сформирован дополнительный (ограниченный) массив описаний ФЭ в области наносистем и разработаны соответствующие методические материалы по применению БД ФЭ в этих целях.

Формирование вышеуказанного массива ФЭ производилось с использованием вышеописанной методики модификации базы данных ФЭ.

В результате анализа имеющегося информационного массива ФЭ найден 21 ФЭ, относящийся к описанию свойств и методов получения наносистем (фрагмент перечня данных ФЭ приведен в табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент перечня ФЭ, относящихся к наносистемам

Номер п/п	Название ФЭ
1	Особенности нанокристаллического состояния компактных металлов, сплавов, керамики.
2	Температурная зависимость удельного электрического сопротивления нанокристаллических материалов.
3	Температурная зависимость теплоемкости нанокристаллических металлов.
4	Увеличение прочности аморфных алюминиевых сплавов при переходе в нанокристаллическое состояние.
5	Увеличение твердости нанокристаллических материалов при горячем прессовании.

Окончание табл. 1

Номер п/п	Название ФЭ
6	Метод получения компактных нанокристаллических материалов (компактирование нанопорошков).
7	Метод получения нанокристаллических компактных материалов (осаждение на подложку).
8	Метод получения компактных нанокристаллических материалов (кристаллизация аморфных сплавов).
9	Зависимость размера наночастиц от температуры плавления металла

В качестве первичных источников информации в результате поиска отобраны ряд книжных изданий, статей из научных журналов и

патентов. Фрагмент перечня книг и журнальных статей приведен в табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент перечня книг и статей из журналов

№ п/п	Библиографические данные книги	Библиографические данные статьи
1	Елисеев А. А., Лукашин А. В. Функциональные наноматериалы / под. ред. Ю. Д. Третьякова. – М.: Физматлит, 2010. – 456 с.	Елецкий А. В. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // УФН, 2010. – Т. 180. – № 9. – С. 897–930.
2	Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: Ком Книга, 2006. – 592 с.	Погребняк А. Д., Шпак А. К., Азаренков Н. А., Береснев В. М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // УФН, 2009. – Т. 179. – № 1. – С. 35–64.
3	Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.	Елецкий А. В. Сорбционные свойства углеродных наноструктур // УФН, 2004. – Т. 174. – № 11. – С. 1191–1231.
4	Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.	Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // УФН, 2007. – Т. 177. – № 3. – С. 233–274.
5	Карагусов В. И. Нанотехнологии в низкотемпературных, компрессорных и климатических системах. – Омск : ОмГТУ, 2011. – 228с.	Дмитриев А. В., Звягин И. П. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов // УФН, 2010. – Т. 180. – № 8. – С. 821–838.

На основании отобранных материалов составлены 19 новых описаний ФЭ в области наносистем и нанотехнологий. Фрагмент списка ФЭ приведен в табл. 3.

Таблица 3

Фрагмент списка новых ФЭ в области наносистем

№ п/п	Название ФЭ
1	Автоэлектронная (полевая) эмиссия углеродных нанотрубок
2	Прочностные свойства углеродных нанотрубок
3	Упрочнение полимерных и композиционных материалов
4	Сверхтвердые нанокompозитные покрытия
5	Зависимость вязкости ферромагнитной жидкости от магнитного поля
6	Заполнение углеродных нанотрубок конденсированными веществами
7	Термоэлектрический эффект в наноматериалах
8	Сорбционные сенсоры на основе углеродных нанотрубок
9	Гигантское магнетосопротивление наноматериалов

Пример описания одного из ФЭ (так называемая выходная карта [1]) из табл. 3 приведен ниже.

Выходная карта ФЭ №1049

Название ФЭ

Автоэлектронная (полевая) эмиссия углеродных нанотрубок

Вход

Электрическое поле. Переменное (импульсное). Напряжение (В). Порядка 1 кВ. Увеличение.

Выход.

Поток микрочастиц. Электроны. Плотность потока частиц ($\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$). Увеличение.

Объект

Индивидуальные углеродные нанотрубки (УНТ) или массив вертикально ориентированных УНТ на подложке (кремний, медь, нержавеющая сталь и др.). Углеродные нанотрубки представляют собой протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких микрометров, которые состоят из одного или нескольких гексагональных графитовых слоев, свернутых в трубку. Обычно нанотрубка заканчивается полусферическим наконечником, который может рассматриваться как половина молекулы фуллерена.

Сущность

Автоэлектронная эмиссия (холодная полевая) – испускание электронов проводящими телами под действием

внешнего электрического поля. Явление холодной полевой эмиссии основано на эффекте квантового туннелирования электронов, находящихся внутри проводника, через барьер, формируемый ионной решеткой проводника и внешним электрическим полем. Результаты многочисленных экспериментов показывают, что эмиссионные свойства индивидуальных УНТ достаточно хорошо описываются формулой Фаулера – Нордтейма (ФН):

$$J = C_1 \cdot E^2 \cdot \exp(-C_2/E),$$

где J – плотность тока эмиссии; E – напряженность электрического поля; C_1 и C_2 – параметры, выражающиеся через работу выхода электронов рассматриваемого проводника и мировые постоянные (заряд и масса электрона, постоянная Планка).

На эмиссионные характеристики влияют дефекты, нарушающие структуру УНТ, а также адсорбаты (сорбированные на поверхности нанотрубки молекулы и радикалы). Максимально достижимый ток эмиссии индивидуальной УНТ ограничен тепловыми эффектами и составляет порядка 1 мкА. Превышение этого порога вызывает неограниченный нагрев эмиттера, сопровождаемый его термическим разрушением. Наиболее важной особенностью УНТ с точки зрения эмиссионных свойств является их высокое аспектное отношение (отношение длины (высоты) к диаметру). Благодаря этой особенности величина напряженности электрического поля вблизи наконечника индивидуальной УНТ во много раз превышает среднее значение напряженности, определяемое как отношение приложенного напряжения к расстоянию между наконечником нанотрубки и анодом. Способность эмиттера к усилению электрического поля характеризуется коэффициентом полевого усиления. Поскольку аспектное отношение для УНТ может достигать значений порядка 10^3 и выше, полевая эмиссия нанотрубок наблюдается при гораздо более низких приложенных напряжениях, чем в случае традиционных холодных полевых эмиттеров.

Эмиссионные характеристики массива УНТ сочетают в себе вольтамперные характеристики индивидуальных УНТ, однако могут существенно отличаться от зависимости ФН. Помимо этого, электрическое поле в окрестности индивидуальной УНТ, входящей в состав массива, может существенно искажаться из-за экранирующего воздействия окружающих соседей. В результате такого воздействия коэффициент усиления нанотрубки должен зависеть не только от ее аспектного отношения и межэлектродного расстояния, но также от геометрии и плотности УНТ в массиве. Максимальная плотность тока эмиссии (порядка нескольких А/см²) достигается при среднем расстоянии между нанотрубками порядка высоты индивидуальных УНТ, составляющих массив.

Применение

Углеродные нанотрубки являются перспективным материалом для создания автоэлектронных эмиттеров в холодных катодах. Катоды на основе УНТ позволяют существенно улучшить рабочие характеристики таких приборов, как плоские мониторы, катодolumинесцентные источники света, рентгеновские трубки и т. п. Электронные приборы с катодами на основе УНТ отличаются высокой степенью временной стабильности, пониженными габаритами и весом, а также пониженным уровнем потребления энергии.

Список литературы

1. Елецкий, А. В. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок / А. В. Елецкий // УФН. – 2010. – Т. 180. – № 9. – С. 897–930.

2. Суздалев, И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздалев. – М.: Ком. Книга, 2006. – 592 с.

3. Пул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.

Помимо ФЭ в области наносистем и нанотехнологий в режиме тестирования программного комплекса было найдено и описано еще 39 новых ФЭ из других областей физики, а также расширены описания 34 существующих эффектов в БД ФЭ.

Использование структурированных физических знаний для прогнозирования новых нанотехнических систем подробно изложено в [9].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фоменков, С. А. Моделирование и автоматизированное использование структурированных физических знаний / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев ; ВолгГТУ. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 297 с.

2. Фоменков, С. А. Методика модификации фонда физических эффектов / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Техника машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 65–69.

3. Фоменков, С. А. Методика корректировки базы данных по физическим эффектам при включении в них новых объектно-ориентированных фондов / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников, Д. А. Давыдов // Машиностроитель. – 2004. – № 5. – С. 35–36.

4. Фоменков, С. А. Автоматизированный информационный поиск физических эффектов / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 7. – С. 30–34.

5. Герасимов, А. М. Автоматизированная система поиска физических эффектов «Полезный эффект» / А. М. Герасимов, П. А. Колчин, С. А. Фоменков // Программные продукты и системы : прил. к междунар. журн. «Проблемы теории и практики управления». – 2007. – № 4. – С. 38–39.

6. Коробкин, Д. М. Автоматизация процесса формирования информационного обеспечения базы данных физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 3. – С. 22–25.

7. Фоменков, С. А. Автоматизация процедур формирования информационного обеспечения для систем концептуального проектирования, использующих структурированные физические знания в форме физических эффектов / С. А. Фоменков, А. В. Петрухин, С. Г. Колесников // Качество и ИПИ (CALS) – технологии. – 2005. – № 1. – С. 26–29.

8. Фоменков, С. А. Информационное наполнение баз данных по физическим эффектам / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 6. – С. 60–62.

9. Фоменков, С. А. Использование структурированных физических знаний для прогнозирования новых нанотехнических систем / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников, А. М. Дворянkin // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 13). – С. 80–82.

УДК 658.512.2

*А. А. Яковлев, А. В. Чибисов, П. Е. Позднякова, С. В. Чурсина***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ СИНТЕЗА ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА
ДЕЙСТВИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ****Волгоградский государственный технический университет**

app@vstu.ru, sagittario@list.ru

В статье описывается подход для разработки программного модуля системы синтеза физического принципа действия преобразователей энергии, который базируется на онтологии. Проведены рассуждения по использованию данной модели в качестве инструмента для создания автоматизированной системы поддержки принятия решений, позволяющей расширить область применения системы и использовать эвристики.

Ключевые слова: модель онтологий, физический принцип действия, преобразователи энергии, ориентированный граф.

*A. A. Jakovlev, A. V. Chibisov, P. E. Pozdnjakova, S. V. Chursina***USE OF ONTOLOGY MODEL FOR DEVELOPMENT THE SOFTWARE MODULE
FOR SYNTHESIS OF ENERGY CONVERTERS PHYSICAL PRINCIPLE OF ACTION****Volgograd State Technical University**

This paper describes a new approach for the development the software sytem module for synthesis of physical principle of action. It is based on ontology. Carried out the reasoning for using this model as a creation tool of automated decision support system, that allows to extend the scope of the system and to use of heuristics.

Keywords: ontology model, physical principle of action, energy converters, directed graph.

При проектировании различных технических систем наиболее ответственные задачи решаются на самых ранних стадиях. К ним относятся постановка задачи, структурный синтез нового объекта, а также поиск концептуальных технических решений в рамках заданной структуры. Существует много общих подходов к постановке таких задач, однако практическая реализация их для отдельных классов технических систем и в том числе, таких как преобразователи энергии, неочевидна.

Для создания систем поддержки принятия решений на творческих стадиях проектирования изделий (например, для создания новых концептуальных технических решений газоразрядных лазеров) [1, 2] была предложена новая модель физического принципа действия (ФПД), которая представляет собой ориентированный граф. Вершинами графа обозначаются места, в которых осуществляются взаимодействия рабочего тела с объектами окружения. Дугами обозначаются перемещения рабочего тела внутри устройства и, собственно, взаимодействия рабочего тела с объектами окружения, для которых введена специальная классификация [3, 4]. Данная модель позволяет отражать такие особенности физических процессов, которые не могут быть представлены статическими цепочками физических эффектов, например, процессов преобразования энергии, осуществляемых на основе цикловых методов.

Одной из актуальных задач в рамках создания системы поддержки принятия решений является разработка эффективной модели представления знаний в базе знаний. В настоящее время эта задача рассматривается в контексте создания хранилищ данных, обеспечивающих хранение, тематическую рубрикацию и поиск информации по ключевым словам. Однако этих возможностей оказывается недостаточно для эффективной поддержки научно-производственной деятельности. Это связано с тем, что в существующих информационных системах (ИС) данные представляются в виде текстовых документов (корпоративные ИС) или информационных ресурсов (интернет-каталоги и порталы), тогда как для человека наиболее естественной формой подачи информации является представление ее в виде сети взаимосвязанных фактов. Для решения этой задачи необходим переход на качественно новый уровень представления и обработки информации – семантический уровень, – что позволит учитывать смысл (содержание) данных, извлекая из них важные для пользователя факты [5].

Средства представления и интерпретации информации в виде фактов могла бы обеспечивать информационная система, использующая как общие знания о мире, так и знания о предметной области, которую она обслуживает. В настоящее время такие знания представляются в виде онтологий [6], которые все больше

используются не только для описания семантики данных и информационных ресурсов, но и при построении широкого класса. В системе синтеза ФПД онтология выполняет следующие функции:

- 1) настройка на предметную область (область знаний) информационной системы;
- 2) описание структуры информационного наполнения (контента) ИС. Характерные точки, объекты окружения, потоки экстенсоров, потоки рабочего тела, как и другие объекты, которые необходимо представить в ИС, могут быть описаны с помощью онтологии;
- 3) описание содержания (контента) элементов графа модели ФПД. На основе онтологии строится содержательная аннотация элементов графа, включающая извлеченные из его текста объекты и связи, соответствующие понятиям и отношениям онтологии;
- 4) интеллектуальная интеграция информации. На основе онтологии в информационное пространство системы может интегрироваться информация из различных информационных источников благодаря тому, что их содержание единообразно отображается в понятия и отношения общей для них онтологии;
- 5) обеспечение содержательного доступа к знаниям и данным, интегрированным в информационное пространство системы. Пользователь может использовать онтологию в качестве

«проводника» для навигации по информационному пространству системы, а также формулировать поисковые запросы, основными элементами которого являются понятия и отношения онтологии. С помощью онтологии также задается удобный для пользователя способ визуализации (представления) информации.

Для спецификации онтологии предложен формализм, являющийся, фактически, онтологией представления.

Формальное описание онтологии представления имеет вид:

$$O_R = \langle C, R, T, D, A, F, A_x \rangle,$$

где $C = \{C_1, \dots, C_n\}$ – конечное непустое множество классов, описывающих понятия некоторой предметной или проблемной области; $R = \{R_1, \dots, R_m\}$, $R_i \subseteq C \times C$, $R = R_T \cup R_p \cup R_A$ – конечное множество бинарных отношений, заданных на классах (понятиях); T – множество стандартных типов; $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ – множество доменов; $A = \{a_1, \dots, a_w\}$ – конечное множество атрибутов, описывающих свойства понятий C и отношений; F – множество ограничений на значения атрибутов понятий и отношений; A_x – множество аксиом, определяющих дополнительную семантику классов и отношений онтологии.

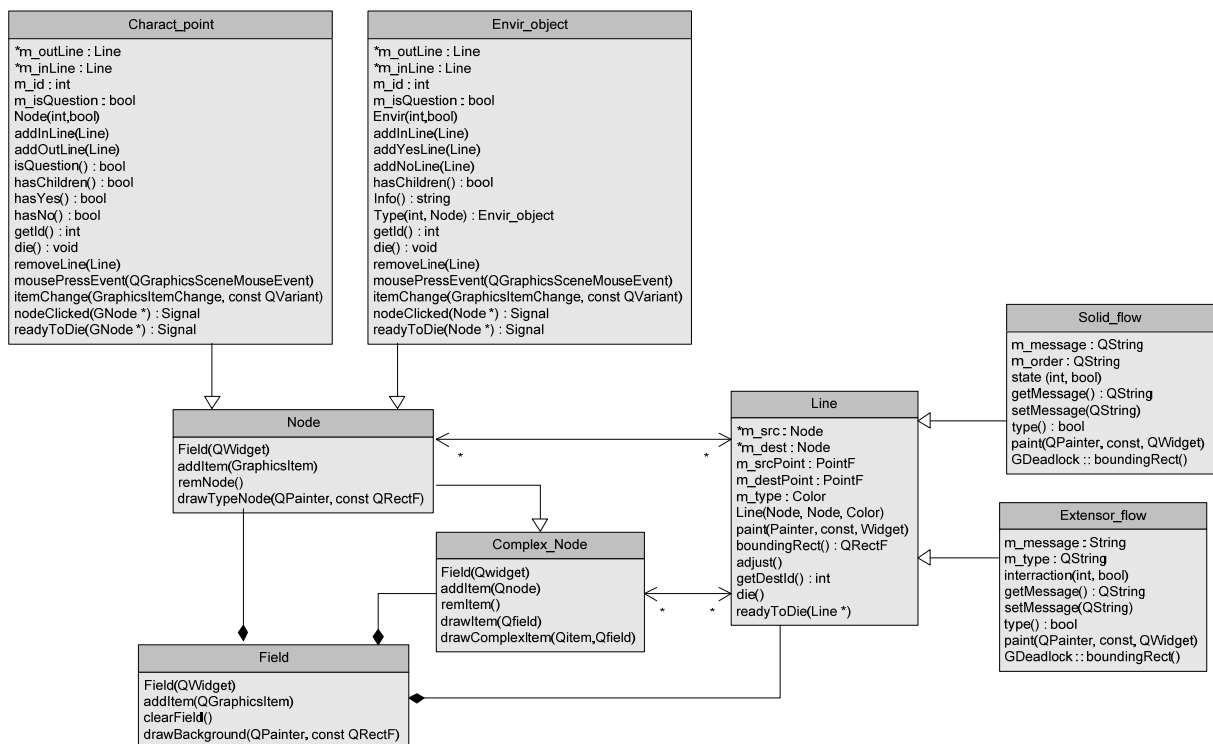


Диаграмма классов автоматизированной системы синтеза ФПД

Таким образом, предложенный формализм не только обеспечивает описание понятий проблемной области и области знаний ИС, но и разнообразных семантических связей между ними. Он позволяет выстраивать понятия в иерархию «общее-частное» и поддерживает наследование свойств по этой иерархии; предоставляет возможность задавать множество аксиом, определяющих семантику классов и отношений онтологии, а также накладывать ограничения на значения возможных свойств объектов – экземпляров понятий онтологии.

Онтология конкретной ИС строится на основе введенного выше формализма согласно предложенной в [5] методологии, главным принципом которой является построение онтологии ИС на основе базовых онтологий путем их достройки и развития, что значительно упрощает создание онтологии ИС и ее дальнейшее сопровождение.

С учетом вышеизложенного представим статическую структуру модели системы в терминологии классов объектно-ориентированного программирования. Диаграмма классов, приведенная на рисунке, отражает взаимосвязь между сущностями предметной области, используя иерархию «общее-частное» (наследование), а также описывает внутреннюю структуру классов (поля, методы) и типы отношений (наследование, реализация интерфейсов).

В рамках рассматриваемого подхода онтология ИС используется в качестве спецификации структуры контента ИС. В самом деле, онтология ИС, вводя формальные описания понятий в виде классов объектов и отношений между ними, задает структуры для представления реальных объектов и связей между ними. В соответствии с этим контент ИС представляются формулой:

$$Cn_{IS} = \langle I, R_I, V, A_I, R_{Cn}, R_{IR}, R_{IA}, R_{ITD} \rangle,$$

где $I = \{i_1, \dots, i_n\}$ – конечное множество экземпляров классов онтологии; $R_I = \{ri_1, \dots, ri_m\}$ – конечное множество экземпляров отношений $ri_i(i_j, i_k)$, где $\{i_j, i_k\} \in I$; $V = \{v_1, \dots, v_q\}$ – конечное множество конкретных значений обобщенного типа TD; $A_I = \{ai_1, \dots, ai_w\}$ – конечное множество конкретизированных атрибутов, т. е. бинарных отношений вида $ai_i(i_x, v_y)$ или $ai_i(ri_x, v_y)$ между экземпляром класса или отношения и конкретным значением; $R_{Cn} \subseteq I \times C$ –

бинарное отношение инцидентности между множеством экземпляров I и множеством классов C ; $R_{IR} \subseteq R_I \times R$ – бинарное отношение инцидентности между множеством экземпляров отношений R_I и множеством отношений R ; $R_{IA} \subseteq A_I \times A$ – бинарное отношение инцидентности между множеством конкретизированных атрибутов A_I и множеством A ; $R_{ITD} \subseteq V \times TD$ – бинарное отношение инцидентности между множеством значений V и обобщенным типом TD .

Таким образом, контент ИС представляется в виде множества связанных информационных объектов. Формально, каждый информационный объект соответствует некоторому понятию онтологии (является экземпляром какого-либо класса онтологии, т. е. элементом множества I) и имеет заданную им структуру. Между конкретными информационными объектами могут существовать связи (элементы класса RI), синтаксис и семантика которых определяется отношениями, заданными между соответствующими понятиями онтологии.

Таким образом, структурированность знаний в базе знаний в виде модели онтологии имеет преимущества формального представления знаний для любого проектируемого конструкторского элемента, описанного инженером базы знаний вербальным языком. База знаний будет легко расширяема для новых элементов, абстрагирована от конкретного языка программирования и формата базы данных. Для подобной модели представления знаний есть и недостатки, связанные в основном с проблемой наполнения контента ИС. Помимо высокой квалификации специалиста, заполняющего базу знаний ИС, подобная работа требует больших временных затрат. Даже после наполнения базы знаний ИС велика вероятность, что знания окажутся структурированы некорректно или с ошибками, допущенными специалистом. Решением подобной проблемы может стать создание экспертной системы, описание которой выходит за рамки данной статьи.

Выводы

Описан новый подход для разработки программного модуля системы синтеза физического принципа действия преобразователей энергии, который базируется на онтологии. Данная модель представления знаний является инструментом для создания автоматизированной системы поддержки принятия решений, позволяющей расширить область применения системы и использовать эвристики. Это ведет к по-

высвить ее эффективности в тех случаях, когда недостаток необходимых знаний или времени исключает возможность проведения подробного анализа. Обработка и хранение знаний с использованием онтологий позволит также повысить качество принимаемых решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, А. А. О системном подходе к формированию множеств технических решений преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 7. – С. 44–50.
2. Яковлев, А. А. Метод синтеза технических решений двигателей внутреннего сгорания на начальных стадиях проектирования / А. А. Яковлев // Двигателестроение. –

2005. – № 3(221). – С. 26–31.

3. Gruber, T. R. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing. International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 43, Issues 5–6, November 1995, pages 907–928.

4. Guarino, N. Formal Ontology in Information Systems. In N. Guarino (ed.) Formal Ontology in Information Systems. Proceedings of FOIS'98, Trento, Italy, June 6–8, 1998. IOS Press, Amsterdam, pages 3–15.

5. Камаев, В. А. Обучение концептуальному проектированию преобразователей энергии на базе системного подхода / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Открытое образование. – 2005. – № 5 (52). – С. 62–69.

6. Камаев, В. А. Моделирование физических принципов действия и формирование множеств технических решений преобразователей энергии / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Информационные технологии. – 2006. – № 1. – С. 2–8.

УДК 658.512.2

А. А. Яковлев, А. В. Чибисов, П. Е. Позднякова, С. В. Чурсина

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ МАТРИЦЫ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УСТРОЙСТВ С ГАЗООБРАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Волгоградский государственный технический университет

app@vstu.ru, yaa_777@mail.ru

Описана методика, позволяющая путем построения модели физического принципа действия разработать таблицу возможных технических решений устройств с газообразным рабочим телом и определить в ней наиболее перспективные варианты для конструктивной реализации.

Ключевые слова: физический принцип действия, техническое решение, устройство, рабочее тело.

A. A. Jakovlev, A. V. Chibisov, P. E. Pozdnjakova, S. V. Chursina

TECHNIQUE OF DEVELOPMENT OF THE MATRIX OF TECHNICAL DECISIONS FOR DEVICES WITH A GASEOUS WORKING BODY

Volgograd State Technical University

The technique allowing by creation of model of a physical principle of action to develop the table of possible technical decisions of devices with a gaseous working body is described and to define in it the most perspective options for constructive realization.

Keywords: physical principle of action, technical decision, device, working body.

Одним из путей улучшения качества проектов создаваемых технических систем является использование на стадии технического предложения новых технологий проектирования, позволяющих формировать большое множество вариантов технических решений и выбирать из них наиболее перспективные для последующей реализации в виде конструкции.

Традиционным решением является разработка морфологических таблиц, из которых затем формируются возможные технические решения. Однако определение атрибутов таблицы для большинства технических систем является непростой задачей и успех ее решения во многом зависит от опыта проектировщика. Другим недостатком такого подхода является неработоспособность части получаемых решений из-

за функциональной несовместимости включенных в таблицу элементов.

В работах [1, 2] описан метод, который позволяет разработать матрицу возможных технических решений преобразователей энергии и определить их конструктивную организацию. Такой подход может быть применен для большинства технических систем с газообразным и жидким рабочим телом. Он основан на построении модели физического принципа действия (ФПД), содержащей информацию о функциях конструктивных элементов, из которых должна состоять проектируемая техническая система.

Ранее были описаны методики построения таких моделей для различных случаев [3, 4]. В данной статье приведена методика построе-

ния таблицы технических решений, позволяющая автоматизировать процесс поиска перспективных технических решений на начальных этапах проектирования. Последовательность разработки таблицы состоит из выполнения следующих шагов.

Шаг 1. Выбор вещества рабочего тела. Выбираются варианты рабочего тела; его вещество должно допускать все взаимодействия, которые отражены в модели ФПД. Проводится проверка, чтобы исключить возможность недопустимых в нем взаимодействий. Дальнейшие шаги нужно осуществлять отдельно для каждого варианта рабочего тела.

Шаг 2. Определение функций для обеспечения требуемых взаимодействий. Для каждого взаимодействия и потока рабочего тела определяется необходимость наличия конструктивных элементов, обеспечивающих требуемые взаимодействия. Данные заносятся в табл. М1 со схемой

$$S_{M1} = \{ m_1^1, m_1^2, m_1^3, m_1^4 \}$$

где М1 – наименование таблицы; S_{M1} – структура таблицы, включающая атрибуты $m_1^1 - m_1^4$; m_1^1 – обозначение элемента модели ФПД (вершины и/или дуги); m_1^2 – обозначение элементарной функции; m_1^3 – описание функции; m_1^4 – порядковый номер функции.

Шаг 3. Определение функций для изоляции рабочего тела от нежелательных взаимодействий. Определяются недопустимые или нежелательные взаимодействия. Данные заносятся в табл. М2 со схемой

$$S_{M2} = \{ m_2^1, m_2^2, m_2^3, m_2^4, m_2^5 \}$$

где m_2^1 – обозначение элемента модели ФПД; m_2^2 – описание нежелательного взаимодействия; m_2^3 – обозначение функции; m_2^4 – описание функции для данного элемента модели; m_2^5 – порядковый номер функции.

Шаг 4. Определение функций конструктивных элементов для обеспечения внутренних степеней свободы дуг графа ФПД. Для каждой дуги определяется необходимость наличия конструктивных элементов, выполняющих эту функцию. Данные заносятся в формуляр табл. М1.

Шаг 5. Определение функций конструктивных элементов для внешней изоляции от нежелательных взаимодействий и рабочего тела. Для каждой дуги определяется необходимость наличия таких конструктивных элементов. Данные заносятся в табл. М2.

Шаг 6. Определение функций конструктивных элементов для объединения и разделения потоков. Определяется необходимость наличия конструктивных элементов, выполняющих объединение и разделение потоков. Данные заносятся в формуляр табл. М1.

Шаг 7. Определение множества функций элементов управления. Для каждой дуги модели определяется необходимость в наличии элементов, выполняющих функции управления. Данные заносятся в табл. М1.

Шаг 8. Определение источников информации на основе предварительного группирования элементарных функций. Осуществляется подбор конструктивных элементов для выполнения ими всех выявленных элементарных функций; выявляются наборы, выполняемых ими элементарных функций. Определяются источники информации описаний элементов. Данные заносятся в табл. М3 со схемой

$$S_{M3} = \{ m_3^1, m_3^2, m_3^3, m_3^4 \},$$

где m_3^1 – порядковый номер элемента; m_3^2 – наименование; m_3^3 – обозначения функций; m_3^4 – источники информации с описаниями элементов.

Шаг 9. Определение показателей качества. Составляется список показателей качества для сравнения вариантов технических решений.

Шаг 10. Поиск конструктивных элементов. Для каждого элемента уточняются наборы выполняемых им функций, описывается достигаемый результат. Заполняются атрибуты $m_4^1 - m_4^5$ табл. М4 со схемой

$$S_{M4} = \{ m_4^1, m_4^2, m_4^3, m_4^4, m_4^5, m_4^6 \},$$

где m_4^1 – обозначение элемента; m_4^2 – наименование; m_4^3 – ссылка на источник информации в таблице М3; m_4^4 – набор элементарных функций, выполняемых элементом; m_4^5 – описание результата при использовании данного элемента; m_4^6 – список показателей качества.

Шаг 11. Оценка конструктивных элементов. Экспертные оценки по каждому показателю качества заносятся в табл. М4 (атрибут m_4^6).

Шаг 12. Составление матрицы технических решений. Формируется матрица D соответствия списка конструктивных элементов A и списка элементарных функций F , причем $D_{ij} = 1$, если i -й элемент выполняет данную элементарную функцию; в противном случае $D_{ij} = 0$.

Шаг 13. *Синтез вариантов технических решений*. Техническое решение представляет собой список конструктивных элементов A_k , сформированный так, что входящие в него элементы выполняют все элементарные функции списка F . В списке A_k должны находиться только *функционально совместимые* элементы, т. е. выполняемые таким списком элементов элементарные функции не должны дублироваться.

Описанная методика позволяет сформировать матрицу технических решений устройств с газообразным и жидким рабочим телом на основе модели физического принципа действия. Главным ее преимуществом по сравнению с морфологическими таблицами является то, что получаемые из нее технические решения не содержат функционально несовместимых элементов.

Формализация ее построения позволяет автоматизировать этот процесс с помощью ЭВМ [5]. Для проверки эффективности методики разработано программное приложение, с помощью которого можно получать список возможных технических решений. Программа бы-

ла опробована для поиска перспективных устройств охлаждения зоны резания. Результаты анализа данного класса устройств позволили получить авторам три патента на изобретения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевчук, В. П. Метод синтеза концептуальных технических решений преобразователей энергии / В. П. Шевчук, А. А. Яковлев // Промышленная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 41–46.
2. Камаев, В. А. Обучение концептуальному проектированию преобразователей энергии на базе системного подхода / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Открытое образование. – 2005. – № 5 (52). – С. 62–69.
3. Яковлев, А. А. Методика проектирования преобразователей энергии на этапе разработки физического принципа действия / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 12. – С. 21–25.
4. Яковлев, А. А. Синтез моделей физического принципа действия преобразователей энергии с газообразным рабочим телом / А. А. Яковлев // Информационные технологии. – 2006. – № 3. – С. 23–28.
5. Яковлев, А. А. Методика проектирования преобразователей энергии на этапе разработки физического принципа действия / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 12. – С. 21–25.

ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.454

Р. И. Аминов

МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Астраханский государственный университет

rushpiel@mail.ru

В статье предлагается перспективный подход, основанный на объектно-ориентированном управлении устройствами. Предлагаемые классы-драйверы позволяют инкапсулировать логику управления устройствами и содержать механизмы контроля корректности настройки устройств. В статье произведен краткий анализ применения концепций объектно-ориентированного программирования применительно к созданию драйверов устройств.

Ключевые слова: методы проектирования встраиваемых систем, объектно-ориентированное программирование, системное программное обеспечение, драйверы, управление аппаратным обеспечением, быстрая разработка систем.

R. I. Aminov

METHODS OF IMPLEMENTATION OBJECT-ORIENTED DEVICE CONTROL FOR EMBEDDED SYSTEMS

Astrakhan State University

The article offers a promising approach based on object-oriented management devices. The proposed classes-drivers can encapsulate the logic of control devices, and provide mechanisms to control the correctness of device configuration. The article made a brief analysis of the concepts of object oriented programming in relation to the creation of device drivers.

Keywords: design of embedded systems, object-oriented programming, system software, drivers, software control of devices, rapid systems development.

Зачастую наиболее трудоемкой частью при создании системного программного обеспечения встраиваемых систем является разработка драйверов устройств, поскольку драйверы напрямую отражают конфигурацию аппаратуры системы. Конфигурация аппаратуры встраиваемых систем может различаться для каждой конечной системы, драйверы устройств также необходимо модифицировать или создавать с нуля [1].

Подобный подход представляется недостаточно эффективным, так как требует высоких трудозатрат и не позволяет быстро спроектировать программно-аппаратную систему и вывести продукт на рынок [2].

При создании программного обеспечения для встраиваемых систем необходимы средства, как эффективного решения прикладной за-

дачи, так и эффективного управления аппаратным обеспечением системы.

Предлагается новый подход для проектирования встраиваемых систем. Данный подход основан на концепции объектно-ориентированного управления устройствами. Драйвер для каждого устройства встраиваемой системы может быть представлен в виде программного объекта или компонента, подобно различным компонентам (например, компонентам пользовательского интерфейса) в средах быстрой разработки приложений для персональных компьютеров.

Подобные компоненты позволяют реализовать следующие возможности:

1) концепцию повторного использования кода – инкапсуляцию специфической логики управления устройством внутри объекта драй-

вера устройства; таким образом, этот объект может использоваться во множестве проектов. При этом объекты не несут специфичных для конкретной встраиваемой системы особенностей, а также особенностей операционных систем, поэтому являются универсальными и кросс-платформенными;

2) представление программисту-разработчику удобного высокоуровневого интерфейса для управления устройством: список поддерживаемых режимов, для каждого режима список доступных функций, параметров настройки. Программисту не требуется изучать документацию на низкоуровневый интерфейс устройства: имена регистров, номера битов и т. д. Используя предложенную функциональность, программист может легко реализовать нужный ему драйвер;

3) контроль корректности управления устройствами. Объекты могут содержать в себе механизмы проверки и контроля корректности управления устройством.

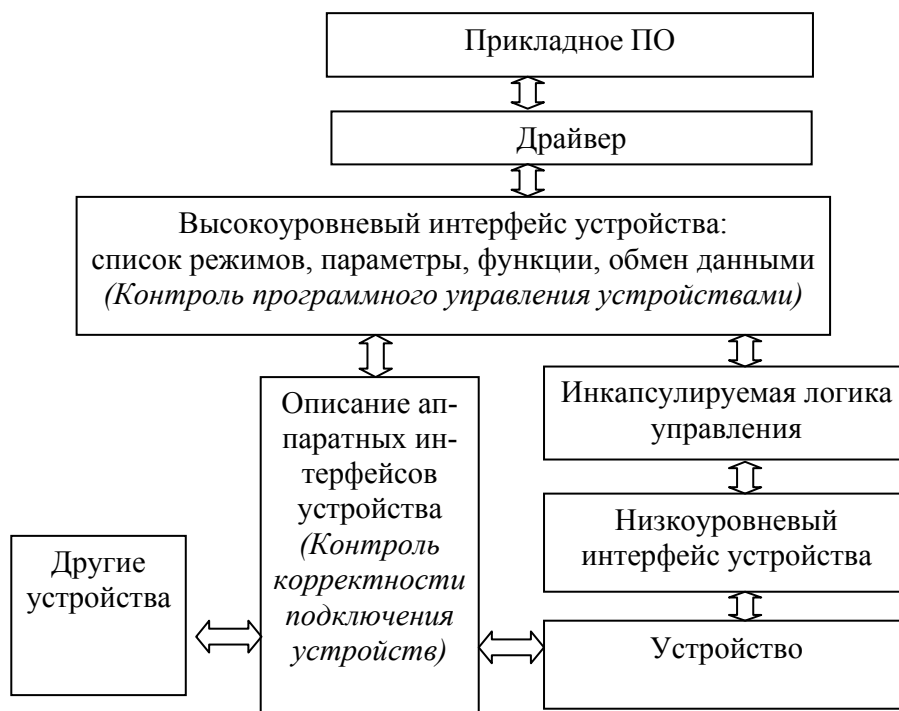
Отметим, что подобная концепция позволяет объединить код, управляющий устройством,

и само устройство без привязки к конкретной системе как совокупности взаимосвязанных устройств.

Можно сказать, что в современных встраиваемых системах базовыми блоками, на которых строится система, являются сверхбольшие микросхемы и программируемые устройства (микроконтроллеры, специализированные контроллеры интерфейсов, программируемые датчики, контроллеры двигателей и т. д.), написание программного кода для инициализации и управления которыми с ростом сложности микросхем является все более сложным процессом [2].

Именно выбор устройства (отдельной микросхемы или внутреннего устройства микроконтроллера) как базового элемента для объектного представления позволяет реализовать управление каждым устройством, без зависимости от конкретной конфигурации аппаратуры.

На рисунке, приведенном ниже, представлена предлагаемая схема программного управления устройствами встраиваемых систем.



Предлагаемая схема программного управления устройствами

В предлагаемой схеме драйвер в конкретной системе управляет устройством не напрямую, а через дополнительный интерфейс высокого уровня, представляемый программным объектом-драйвером.

Реализация объектно-ориентированного управления устройствами

Реализация предлагаемого подхода связана с несколькими трудностями.

Как правило, для управления устройствами

на низком уровне используется язык С. При этом с помощью языка С реализуются драйверы, которые представляют доступ к устройству. Такой подход применяется в большинстве встраиваемых систем.

Для создания предлагаемых объектов драйверов, напрямую взаимодействующих с устройством, можно использовать язык С++. Прогресс в развитии микроконтроллеров привел к широкому внедрению 32-разрядных микроконтроллеров и вытеснению ими 8-разрядных. Вычислительные возможности современных микроконтроллеров позволяют использовать для всего проекта, и в том числе для драйверов язык С++. Компиляторы для большинства современных микроконтроллеров поддерживают язык С++.

Другая проблема заключается в том, что каждое устройство одного типа имеет уникальный набор регистров управления, а зачастую и уникальную функциональность, поэтому невозможно описать универсальный класс для данного типа устройств и использовать объекты данного класса для управления всеми устройствами подобного типа в составе системы. Для решения этой проблемы можно использовать механизм наследования. При этом класс-предок будет реализовывать только одинаковые элементы для нескольких устройств, и не иметь реализации специфических методов, а классы-наследники для конкретных устройств будут содержать специфическую для каждого устройства функциональность.

Более простым путем является реализация специфических классов для каждого конкретного устройства, без использования наследования. Отметим, что в общем случае для каждого класса, описывающего устройство, имеет смысл создание только одного объекта для управления устройством. Вместо создания объектов можно реализовать классы как статические и использовать их напрямую.

Для управления внешними устройствами, как правило, нужно программно реализовать логику взаимодействия с устройством: какие интерфейсы микроконтроллера используются для подключения устройства и т. д.

Для решения этой проблемы можно использовать два механизма ООП. Класс, описывающий устройство, может иметь несколько абстрактных методов, которые нужно определить в классе-наследнике при использовании устройства в конкретном проекте. В этих методах не-

обходимо описать логику привязки устройства к конкретной системе. Более простым путем является описание нескольких функций без реализации, ответственных за логику привязки устройства к конкретной системе, которые будет необходимо реализовать разработчику при использовании класса драйвера в конечной системе.

Преимуществом предлагаемой концепции является возможность использования концепции событий и событийно-ориентированного программирования. При этом механизм событий может использоваться как дополнение к механизму прерываний микроконтроллеров и расширять его. Подобный подход позволяет реализовать всю прикладную логику управления в простых встраиваемых системах на основе событий, возникающих в устройствах и передачи сообщений между устройствами.

Рассмотрим основные концепции ООП применительно к реализации объектов драйверов устройств.

Абстракция – это способ выделить набор значимых характеристик объекта, исключая из рассмотрения незначимые [3]. Применительно к управлению устройствами для каждого устройства можно выделить значимые характеристики – режимы работы, функции, настройки, и скрыть внутренние, не относящиеся к интерфейсу устройства особенности.

Инкапсуляция – это свойство системы, позволяющее объединить данные и методы, работающие с ними, в классе и скрыть детали реализации от пользователя [3]. Применительно к устройствам в единую сущность объединяются особенности устройства (данные) – это его низкоуровневый интерфейс (регистры); настройки, характеристики и программный код, управляющий им (методы); логика программного управления устройством, а также программно-управляемые функции устройства (например, функция «выполнить преобразование» у АЦП).

Наследование – это свойство системы, позволяющее описать новый класс на основе уже существующего с частично или полностью заимствуемой функциональностью [3]. Для классов драйверов устройств можно наследовать какие-либо стандартные функции управления, одинаковые для всех устройств. При этом можно реализовать общие родительские классы некоторых стандартных устройств, и наследовать от них классы для описания конкретных устройств. Наследование может ис-

пользоваться как для описания в классах-потомках особенностей конкретных устройств, так и унаследованные классы могут реализовывать абстрактные методы, в которых будет реализована логика использования устройства в конкретной системе.

Полиморфизм – это свойство системы использовать объекты с одинаковым интерфейсом без информации о типе и внутренней структуре объекта [3]. Для управления устройствами полиморфизм может заключаться в том, что устройства, имеющие различную аппаратную реализацию, будут обладать одинаковым интерфейсом управления. Таким образом, вне зависимости от реализации, устройства одного типа, имеющие схожую функциональность, будут иметь одинаковые интерфейсы управления высокого уровня.

Это позволит создавать переносимый код; при переходе к другим конкретным устройствам схожей функциональности код, управляющий устройствами, будет сохранять работоспособность.

Рассмотрим предлагаемую концепцию управления устройствами.

Предполагается, что для каждого устройства микроконтроллера можно создать класс на языке C++, который будет содержать:

- 1) указатели на адреса регистров специальных функций этого устройства;
- 2) функции, скрывающие манипуляции с низкоуровневым интерфейсом устройства (регистрами и битами);
- 3) высокоуровневый программный интерфейс устройства (выбор режимов работы, управление функциями устройства).

Для каждого класса драйвера устройства предлагается создание только одного константного объекта для управления конкретным устройством.

В классе могут быть не реализованными некоторые функции, которые должны быть реализованы разработчиком при создании конкретной системы реализации взаимодействия устройств. При использовании механизма наследования подобные функции могут быть абстрактными. Заметим, что использование длинных иерархий наследования может отрицательно сказаться на производительности системы, поэтому механизм наследования нужно использовать ограниченно.

Подобный подход обладает следующими преимуществами:

- удобство использования объектов;
- сокрытие внутреннего интерфейса устройства;
- возможные встроенные механизмы проверки на корректность управления устройствами.

К сожалению, невозможно использовать все преимущества концепции ООП, такие как полноценное наследование, полиморфизм и инкапсуляция. Это связано с тем, что каждое устройство определенного типа имеет уникальный набор регистров управления, а зачастую и отличающуюся функциональность (например, из двух контроллеров последовательного интерфейса один может поддерживать все линии интерфейса RS-232, а другой – только линии приема и передачи данных).

Предлагаемая концепция не позволяет уйти от ручного программирования слоя взаимодействия с низкоуровневым интерфейсом устройства. Однако предполагается, что объекты-драйверы будут реализовываться самими производителями устройств. При этом разработчики конечных систем будут освобождены от низкоуровневого программирования и обеспечены универсальными объектами-драйверами, которые можно многократно использовать во многих проектах.

Таким образом, предлагается подход, в котором от производителей устройств до разработчиков готовых систем передается не только документация, но и готовые программные объекты-драйверы для программного управления устройствами. При этом объектно-ориентированная концепция позволяет реализовать действительно независимые переносимые компоненты, которые удобнее и проще использовать, чем имеющиеся библиотеки драйверов устройств. Перспективным является создание стандарта унифицированного описания высокоуровневых интерфейсов устройств.

В дальнейшем планируется реализовать некоторый тестовый набор классов драйверов для устройств конкретного микроконтроллера и нескольких внешних устройств и исследовать эффективность подобного подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, А. Е. Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений / А. Е. Васильев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 304 с.
2. Аппаратные и программные средства встраиваемых систем / А. О. Ключев [и др.]. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 287 с.
3. Грэхем, И. Объектно-ориентированные методы. Принципы и практика / И. Грэхем. – М.: Вильямс, 2004. – 880 с.

УДК 681.3

*А. М. Бершадский, Л. С. Курилов, А. Г. Финогеев***КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ МАРШРУТИЗАЦИИ
В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ****Пензенский государственный университет**

bam@pnzgu.ru, kleon@nextmail.ru, finogeev@sura.ru

В статье описывается специфика маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях и параметры узлов для расчета маршрутов. Приводятся требования к методам маршрутизации и дается классификационная схема методов на основе наиболее значимых признаков.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, распределенные системы, методы маршрутизации, классификация, терминология.

*A. M. Bershadsky, L. S. Kurilov, A. G. Finogeev***CLASSIFICATION OF METHODS FOR ROUTING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS****Penza State University**

The article describes some details of routing technique in wireless sensor networks and node's parameters using for route calculations. The requirements for routing methods are considered, the taxonomy of the routing methods is given.

Keywords: wireless sensor networks, distributed systems, methods, routing, classification, and terminology.

Современная беспроводная сенсорная сеть (БСС) представляет собой программно-технический комплекс, реализующий в полной мере концепцию распределенных систем (РС) и характеризующийся особенной архитектурой и сложным коммуникационным поведением узлов, и является, по сути, конгломератом различных технологий сбора, передачи и обработки данных, подобранных и разработанных для оптимального выполнения специфических задач. Соответственно, методы маршрутизации в подобных сетях также характеризуются определенной спецификой.

Как правило, сенсорные сети проектируются специально для конкретного приложения, поэтому нет единой универсальной схемы построения БСС, все зависит от области применения и архитектура БСС разрабатывается с учетом достижения конкретных целей и оптимизации необходимых параметров. Соответственно, отсутствует и универсальный, общеупотребительный метод маршрутизации, все методы в той или иной степени направлены на определенные задачи (цели) РС или архитектуру БСС, либо на оптимизацию заданных параметров при заданных условиях.

Из-за специфики БСС, которая заключается в основных особенностях ее построения и функционирования, а именно: преимущественная ограниченность энергоресурсов (вследствие автономности узлов), возможность динамического изменения конфигурации (вследствие мобильности узлов), большие накладные расходы на передачу и прием (вследствие ис-

пользования радиоэфира в качестве среды передачи), ресурсные ограничения в узлах по объему памяти, скорости обработки, времени реакции и т. п. (вследствие требований миниатюризации, низкой стоимости узлов), многозвенная топология и т. д., методы маршрутизации в БСС могут существенно отличаться от методов маршрутизации в обычных проводных сетях, а также беспроводных сетях с использованием стационарных маршрутизаторов типа WiFi.

Перечислим основные параметры узла, которыми могут оперировать алгоритмы маршрутизации при выборе того или иного пути ретрансляции сообщения: 1) текущий уровень энергозапасов узла; 2) пространственное расположение узла; 3) список соседних узлов (тех узлов, с которыми данный узел находится в непосредственной близости и имеет прямой доступ в зоне действия радиосигнала) и их параметров; 4) уровень радиосигнала до соседних узлов; 5) загруженность узла; 6) доступный объем памяти для хранения данных маршрутизации, истории, кэша, для буферизации очереди ретранслируемых сообщений и т. д. Некоторые из перечисленных параметров (а также их совокупность) можно использовать в качестве метрик или критериев для выполнения процедуры маршрутизации.

Необходимо привести также основные требования к алгоритмам маршрутизации в БСС. Следует отметить, что отдельные требования могут противоречить другим требованиям, и в общем случае может потребоваться компро-

мисс по удовлетворению целого ряда противоречивых требований, который обуславливается конечной целью или приложением БСС.

Список требований в общем случае включает:

1) учет энергозатрат (из-за автономности питания узлов);

2) минимизацию вычислительных затрат (так как имеется ограничение по вычислительной мощности процессоров узлов; данные затраты также влияют на задержки передачи и расход энергии узлов);

3) минимальный объем используемой памяти (из-за ресурсного ограничения узлов);

4) максимальную скорость доставки сообщений между двумя произвольными узлами (повышение производительности сети);

5) равномерную загруженность сети (предотвращение перегрузок и последующих блокировок на отдельных участках сети);

6) максимальную надежность работы сети (выбор альтернативных маршрутов при отказе/выключении узлов, смене топологии);

7) экономическую эффективность (должна быть обеспечена минимальная совокупная стоимость сети, стоимость ее разворачивания и поддержания в жизнеспособном состоянии);

8) минимизацию управляющего трафика в сети (или максимизацию полезной пропускной способности сети – соотношения объема информационной доли трафика к доле служебных управляющих сообщений);

9) адаптивность к динамическим изменениям конфигурации и топологии БСС;

10) обеспечение безопасности сети (подразумевает учет таких аспектов, как защита передаваемых данных, защита от несанкционированного подключения к сети, аутентификация и аудит и т. д.).

Прежде чем приступить к классификации методов маршрутизации, следует отметить одну характерную особенность, присущую большинству БСС. Учитывая низкие показатели узлов по производительности вычислений и объему памяти, а также тот факт, что количество узлов в БСС может достигать многих сотен и тысяч, и топология может постоянно динамически меняться, очевидно, что хранить и поддерживать в актуальном состоянии информацию о текущей конфигурации всей сети в каждом узле на практике не представляется возможным. То есть, в отличие от традиционных вычислительных сетей, в БСС зачастую нет

доступных ресурсов для хранения, обработки и циркуляции по сети большого массива управляющих данных маршрутизации в условиях обычно низкой пропускной способности самой сети. Отсюда следует вывод о преимущественном использовании в БСС децентрализованных локальных схем маршрутизации, в которых каждый узел в отдельности принимает решение о перенаправлении сообщений, опираясь на сведения о ближайших соседях (т. е. на основе локальных, а не глобальных данных).

Вследствие такой специфики БСС, узкой специализации и многообразия областей применения, таксономические схемы методов маршрутизации также характеризуются большим разнообразием классификационных признаков. Трудно выделить среди них группу наиболее приоритетных, все зависит от целей проектирования БСС. Проведем классификацию по ряду наиболее значимых признаков, с указанием англоязычной терминологии, принятой в зарубежной литературе [1–3].

1. По способу определения маршрутов:

– проактивные («proactive»), в которых первоначально заранее определяются возможные маршруты и составляются таблицы маршрутизации;

– реактивные («reactive»), в которых определение маршрутов происходит в реальном времени, т. е. динамически, по конкретному запросу на маршрутизацию («по требованию»);

– смешанные схемы, когда имеются предварительные расчеты возможных маршрутов, и далее, при необходимости, с каждым запросом маршруты могут корректироваться.

2. По учету и экономии энерго-ресурсов сети («energy-conservation»):

– без учета;

– направленные на повышение энергоэффективности отдельных узлов либо всей сети в целом (подразумевает равномерное распределение энергонагрузки в зависимости от энергозапасов в конкретном узле с целью максимизировать время жизни всей сети, а не отдельных узлов). В последнем случае для выравнивания загруженности сети необходим последовательный перебор различных маршрутов для одного и того же узла-приемника («multipath»), что наряду с оптимизацией общего энергопотребления БСС может привести к росту задержек при передаче.

3. По признаку структурной организации сети:

- плоские «flat», т. е. с одноранговыми («равноправными») узлами с одинаковой функциональностью;

- иерархические «hierarchical», т. е. с разделением между узлами коммуникационных функций; подразумевают построение иерархий нескольких уровней с различными обязанностями в плане маршрутизации. Классическим походом в организации управляющей иерархии для передачи данных в БСС является схема маршрутизации, основанная на кластеризации узлов. Узлы объединяются в группы (кластеры), в которые входят близко расположенные узлы. Участники группы общаются непосредственно только с выделенным центром группы, который отвечает за коммуникацию с другими центрами. Таким образом, для реализации данной схемы необходимо включение механизмов «голосования» по выбору кластерных центров и их динамической смены в случае изменения конфигурации или обеспечения равномерной энергозагрузки. Можно провести некоторую аналогию между подобными центрами и базовой станцией в сотовых сетях связи.

4. По признаку централизации сбора данных:

- с централизованным сбором («data-centric»), когда информация со всех узлов собирается в единый центр сбора, обработки и/или хранения данных.

- схема с множеством центров сбора, которые могут, в принципе, взаимодействовать друг с другом, осуществлять распределение задач сбора и обработки, синхронизацию и кооперацию;

- децентрализованная схема («peer-to-peer»), когда узлы могут общаться друг с другом произвольно и доставка в общем случае производится от любого произвольного узла к другому произвольному узлу (как, например, при голосовой коммуникации).

5. По признаку вариативности топологии сети:

- ориентированные на статическую топологию, когда структуру сети образуют неподвижные («fixed») узлы, имеющие долговременную жесткую позицию на местности. Для данного случая структура БСС проектируется изначально и в дальнейшем, как правило, существенно не изменяется;

- ориентированные на динамическую топологию, когда топология сети меняется с течением

времени за счет перемещения мобильных («mobile») узлов. В данном контексте следует отделять понятие «топология» от понятия «конфигурация». Топология задает взаимное расположение узлов и общую структуру связей сети, конфигурация означает возможность изменения топологии за счет периодического включения/выключения узлов, выхода их из строя, потери связи между ними. В случае статической топологии (т. е. узлы не перемещаются друг относительно друга) конфигурация сети также может быть динамической (допускается динамическое добавление и исключение узлов в структуру сети).

В ряде случаев мобильность может быть ограничена (так, например, в некоторых видах БСС допускается перемещение узлов только в пределах ограниченной зоны, контролируемой центральным узлом).

6. По учету специфики сетевого трафика и обеспечению качества услуг:

- без учета;

- с учетом и с дифференциацией схем маршрутизации для разных видов трафика (например, таких как потоковое видео, аудио, голосовые потоки, телеметрия, неотложные сообщения). Существуют различные приложения БСС, и для некоторых требуется обеспечить доставку данных в реальном времени; для других допустима отложенная доставка и задержки при передаче не имеют решающего значения; для третьих данные собираются в режиме «off-line» по запросу из центров сбора. Таким образом, методы ретрансляции разнородного трафика могут основываться на таких критериях, как минимум задержек, гарантия поддержания постоянной полосы пропускания, учет текущей загруженности маршрутов, а не только опираться на простые метрики типа количества промежуточных узлов в маршруте, пространственное расстояние между узлами и т. п. Безусловно, при обеспечении качества обслуживания могут пострадать другие аспекты маршрутизации. Например, для уменьшения задержек требуется выбирать кратчайшие маршруты, что может противоречить требованию обеспечения равномерного расхода энергии БСС, при котором маршруты выбираются исходя из необходимости равномерного распределения нагрузки.

7. По использованию дополнительной информации о местоположении узла («location»):

- без использования;
- с использованием информации о географическом расположении узла («geographic routing»). Как правило, дополнительные данные о положении узлов в пространстве повышают эффективность маршрутизации, однако требуют дополнительных затрат. К примеру, точное определение положения может осуществляться с помощью дополнительного оборудования в узле (такого, как GPS-приемник), а приблизительное определение относительного положения – с применением специальных методов расчета на основе данных об уровне радиосигнала от ближайших соседних узлов, находящихся в зоне радиодоступа исходного узла.

8. По способу взаимодействия узлов:

- поддержка связи «один к одному» («unicast»);
- поддержка связи «один ко многим» («multicast»), когда общение исходного узла происходит с множеством других узлов;
- широковещательное взаимодействие («broadcast»); имеет место в тех случаях, когда данные из одного узла распространяются во все остальные узлы сети (в БСС обычно посредством техники «flooding»).

9. По учету периодической активности узлов («sleeping time»):

- без учета;
- с учетом. В данном случае БСС состоит из узлов, не имеющих возможности постоянно прослушивать радиоэфир с постоянной готовностью к ретрансляции данных и обладающих ограниченным периодом активации, возобновляемой через определенные временные интервалы. Это обусловлено необходимостью сохранения энергии для увеличения времени жизни сети. Здесь требуется особый подход, обеспечивающий доставку в условиях возникновения временных «дыр» в топологии сети.

10. По использованию уникальной идентификации узла:

- с использованием идентификатора узла (сетевого адреса);
- без использования. Методы, в которых адресация на основе уникальных адресов оказывается излишней, применяются в БСС, состоящей из большого числа узлов, плотно распределенных по небольшой территории. Обычно, наряду с сенсорными данными от таких узлов для ряда приложений, достаточно передавать информацию о месте расположения узла (географическую метку).

11. По степени надежности доставки данных:

- ненадежные, работающие без подтверждения о доставке. Посланные сообщения по разным причинам могут теряться в процессе передачи от узла-источника к приемнику;

- надежные, с подтверждением доставки отправителю, т. е. обеспечивающие гарантию доставки. Проблема повышения надежности передачи влечет за собой множество накладных расходов, связанных с увеличением объема служебного трафика. Так, например, если получать подтверждение при каждом прыжке («multihop») между промежуточными узлами маршрута от очередного узла цепочки, то наблюдается значительный рост управляющих сообщений и снижение полезной нагрузки сети. Если же получать подтверждение только от приемника (конечного узла в цепочке маршрута), то из-за частых сбоев при передаче, характерных для беспроводных сетей, возможно значительное замедление процесса передачи (время на отслеживание тайм-аутов, на повторную пересылку, ожидание ответа и т. д.).

12. По учету методов сбора и передачи данных:

- без учета;
- с учетом.

Среди характерных методов интероперабельности, влияющих на выбор средств коммуникации и маршрутизации, можно выделить следующие:

- управляемые по таймеру («time-driven»); здесь передача данных с узлов осуществляется через определенные временные интервалы, например, с определенной частотой дискретизации;

- управляемые по событию («event-driven»), когда коммуникация происходит при возникновении некоторых событий. Например, узел может не передавать постоянно измеряемые параметры среды (объекта), а контролировать параметры локально и генерировать сообщения только в тех случаях, когда происходит изменение параметра в заданных пределах. Такая предварительная обработка не требует существенных вычислительных ресурсов, однако значительно снижает нагрузку на сеть;

- управляемые по запросу («query-driven»), когда передача сенсорных данных, генерируемых узлом, инициируется со стороны центра сбора данных (узлом-коллектором) специальным запросом.

Сюда также можно отнести другие методы, например, с использованием агрегации данных («data aggregation») по маршруту доставки, когда в процессе маршрутизации к данным исходного узла поочередно добавляются собственные данные всех промежуточных узлов.

В заключение необходимо отметить, что при решении задач маршрутизации в БСС, т. е. фактически при конкретной оптимальной реализации сетевого уровня взаимодействия, приходится принимать во внимание множество смежных проблем, влияющих непосредственно на качество процесса доставки сообщений – таких как адресация сетевых узлов, синхронизация узлов с соседями, устранение и минимизация коллизий, обеспечение промежуточной обработки данных и т. д. Грамотный и адекватный выбор метода маршрутизации с учетом

множества факторов и технических условий позволяет значительно увеличить производительность БСС, либо существенно сократить требования к аппаратным ресурсам узлов, что, в свою очередь, приводит к снижению стоимости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Acs G., Buttyan L. A Taxonomy of Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. Laboratory of Cryptography and Systems Security, Department of Telecommunications, Budapest University of Technology and Economics. Hiras-technika. Scientific Association for Infocommunications, H-1055 Budapest, Hungary. January 12, 2007.
2. Al-Karaki J. N., Kamal A. E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey // IEEE Wireless Communications, Vol. 11, 2004, pp. 6–28.
3. K. Akkaya, M. Younis. A Survey of Routing Protocols in Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks Journal, Vol. 3(3), 2005, pp. 325–349.

УДК 004.724.4

Д. В. Кутузов, В. А. Филин

СТРУКТУРА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОММУТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Астраханский государственный университет

d_kutuzov@aspu.ru, kachestvo@aspu.ru

В работе представлены результаты синтеза параллельных пространственных коммутационных систем, описан элемент коммутации этих систем. Представлена математическая модель функционирования параллельных пространственных систем коммутации.

Ключевые слова: коммутация, параллельная коммутация, пространственная коммутация, математическое моделирование, элементы коммутации, ячейки коммутации.

D. V. Kutuzov, V. A. Filin

THE STRUCTURE AND MATHEMATICAL MODEL OF PARALLEL SPATIAL SWITCHING SYSTEM

Astrakhan State University

The paper presents the results in the synthesis of parallel spatial switching systems, switching element described for these systems. The paper presents the mathematical model of the parallel spatial switching systems.

Keywords: switching, parallel switching, space switching, mathematic modeling, elements of switching, cells of switching.

При реализации различных режимов коммутации значительную роль играют механизмы настройки коммутационных схем. Настройка коммутационной системы – это процесс установления составляющих ее коммутационных элементов в определенные состояния, для того чтобы реализовать необходимые соединения. Чтобы установить необходимые соединения источников и приемников информации в системе пространственной коммутации или передать пакет в системе пакетной коммутации, не-

обходимо изменить состояния некоторых или всех элементов схемы.

Параллельные пространственные системы коммутации обычно реализуются как системы с самонастройкой. В подобных системах ячейки коммутации должны иметь собственное локальное управляющее устройство [1].

Наиболее простой коммутационной ячейкой является схема [2], представленная на рис. 1. Она состоит из элемента сложения по модулю два, RS-триггера и ключевого элемента И.

Описанная выше схмотехническая реализации ячейки коммутации применима только для режима разовой коммутации и может использоваться для организации связи между процессорами в многопроцессорных вычислительных системах, когда список устанавливаемых соединений известен заранее и исключены конфликты.

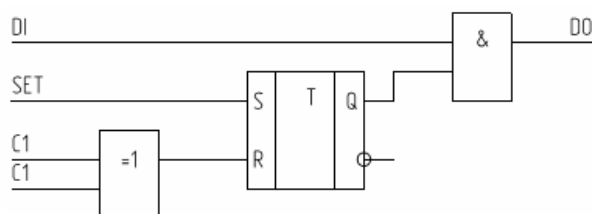


Рис. 1. Коммутационный элемент

При параллельной коммутации, если не предпринимать специальных мер, возможна ситуация, когда два входа в один и тот же момент времени пытаются установить соединение к одному выходу. Такая ситуация называется *коллизией* и приводит к конфликту. Очевидно, что такая конфликтная ситуация может быть разрешена двумя различными способами: либо необходимо отбросить все подобные пакеты, либо выбрать один, которому и предоставить соединение. В первом случае требуется лишь система, способная обнаружить конфликт и заблокировать соединение. Во втором случае необходима система приоритетов, которая не только обнаружит конфликтную ситуацию, но и решит, какому пакету предоставить соединение. Разрешение конфликтов может быть возложено на какое-либо устройство внешнего управления, но в этом случае такое управляющее устройство станет «узким» местом системы. Поэтому целесообразно возложить разрешение конфликтов на саму ячейку коммутации, снабдив ее собственным локальным устройством управления.

При достаточно большой длине пакета данных может сложиться ситуация, когда на момент выполнения очередной операции идентификации еще не закончено обслуживание предыдущего требования на установление соединения (то есть еще продолжается передача пакетов). В этом случае требуется предусмотреть систему блокирования задействованных ячеек матрицы коммутации, а также строк и столбцов матрицы, в которых находятся такие ячейки. Незаблокированные ячейки должны

быть потенциально доступны для установления следующих соединений.

Таким образом, матрица элементов коммутации является сложной системой и должна выполнять операцию идентификации пакета, производя в каждом своем элементе сравнение идентификатора, содержащегося в заголовке пакета с идентификатором выходного канала системы. Кроме того, матрица должна производить необходимые блокировки строк и столбцов, в случае, когда соединение установлено, и разблокировку по внешнему сигналу по окончании передачи пакета. Еще одной функцией матрицы коммутации является оценка приоритетов при попытке установить соединение к одному и тому же выходу и разрешение конфликта. Для выполнения всех этих функций необходимы элементы коммутации, содержащие локальные устройства управления. Причем элементы коммутации должны выполнять все эти функции совместно, действуя как единая подсистема параллельной пространственной коммутационной системы.

Коммутационный элемент [3, 4] является в данной системе наиболее сложным звеном. Однако он может быть представлен цифровым автоматом, состоящим из операционной и управляющей частей. В состав операционной части (рис. 2) входят такие узлы, как узел сравнения идентификаторов, узел приоритетов и узел коммутации. Узел сравнения идентификаторов служит для сравнения идентификатора, содержащегося в заголовке пакета, и идентификатора, поступающего из блока генерации имен. Узел приоритетов служит для разрешения конфликта, возникающего при попытке установить соединение от двух или более входов к одному выходу. Узел коммутации служит для установления и удержания соединения, в случае если идентификаторы совпали, и узел приоритетов не заблокировал соединение.

Коммутационный элемент имеет следующий алгоритм функционирования. Изначально коммутационный элемент находится в состоянии ожидания сигнала «начало идентификации».

Если сигнал «начало идентификации» подан, то проверяется, нет ли блокировок столбца, наличия сигнала «блокировка столбца», строки, а также собственной блокировки.

В случае отсутствия этих сигналов выдается сигнал разрешения сравнения идентификаторов в блоке сравнения. Проверка блокировок про-

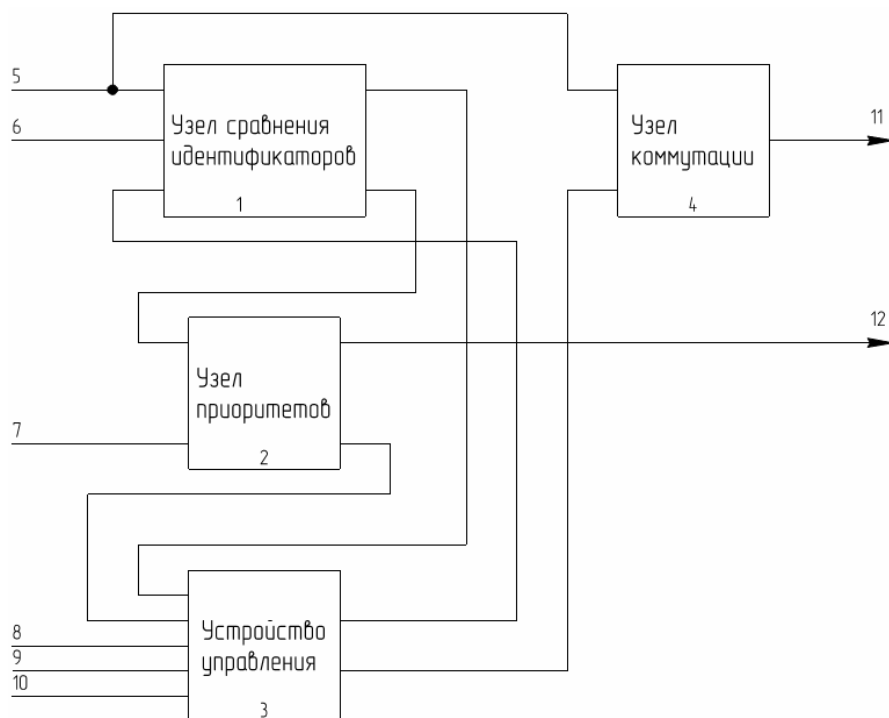


Рис. 2. Функциональная схема элемента коммутации параллельных пространственных коммутационных систем

изводится с целью исключения попытки установить соединение в заблокированном столбце. Если же один из сигналов присутствует, то коммутационный элемент переходит в состояние ожидания, то есть в начальное состояние.

Проверяется внешний сигнал «конец передачи идентификаторов». Если сигнал установлен, и устройство сравнения идентификаторов определило совпадение идентификаторов, то выдается сигнал на проверку возможных конфликтов. Иначе коммутационный элемент переходит в состояние ожидания.

Проверяется и разрешается конфликт: определяется приоритет коммутационного элемента, который устанавливает соединение. Устанавливаются сигналы блокировки строки, столбца и, собственно, соединение.

Ожидается сигнал «конец пакета», который переводит элемент коммутации в исходное состояние; снимаются сигналы блокировок.

Коммутационные элементы объединены в матрицу [5], где для установления соединений применяется разовый режим коммутации, который реализует следующий алгоритм. Первоначально система приводится в начальное состояние, которое характеризуется тем, что все существующие соединения разрушаются. Для установления соединений со стороны входов системы коммутации одновременно передаются идентификаторы выходных линий системы,

которым необходимо установить соединение. Одновременно со стороны выходов передаются собственные идентификаторы выходов системы. Если в узле коммутации происходит совпадение идентификаторов, то соединение устанавливается.

Работа такой системы описывается следующей математической моделью.

Пусть N – множество всех входных линий пространственной матричной системы коммутации; M – множество всех выходных линий, а K – множество выходных линий, к которым возможны запросы на установление соединений со стороны входных линий.

Декартово произведение $N \times M$ представляет множество точек (узлов) коммутации, $N \times K$ – все возможные комбинации запросов, поступающих с входных линий к выходным, а $K \times M$ – множество имен – идентификаторов выходных линий, которые поступают со стороны выходных линий. Необходимо различать множества выходных линий M и множество их имен (идентификаторов) K , так как данные множества могут быть неравными, и их мощности могут быть различными, но всегда выполняется $|K| \leq |M|$

Отношение $R = \{(n, k) | n \in N \text{ \& } k \in K\}$ есть множество запросов на установление соединений. Крайние варианты: $R = \emptyset$ – если установ-

ления соединений не требуется, и $R = N \times K$, если требуется установить все соединения. Если $V = K \times M$ – множество идентификаторов, передающихся со стороны входов, то операция коммутации может быть записана в виде композиции: $V \circ R$.

Необходимо отметить, что в разовом режиме коммутации всегда генерируются все пары $(k, m) \in V$, а не их часть.

Если при функционировании коммутационной системы время квантуется на такты [1], но в произвольные моменты времени возникает необходимость установить одно или несколько соединений, то есть заявки на установление соединений возникают асинхронно, то все возникшие заявки в промежутке времени между соседними тактами ожидают поступления очередного тактового импульса и начинают обрабатываться при его поступлении. Поэтому можно считать, что все эти заявки возникают одновременно. Таким образом, *пачкой заявок* называется множество заявок, возникших одновременно.

Если l – число новых соединений, которые необходимо установить; l' – число уже установленных к какому-либо моменту времени соединений; N – число входов/выходов системы, которые пронумерованы числами от 0 до $N-1$ (при этом $0 \leq l' \leq N$, $0 \leq l \leq N - l'$), то при $l=l'$ имеется одиночный режим установления соединений; при $l \leq l' \leq N-1$ – пачечный режим установления соединений; при $l'=0$, $l=N$ – разовый режим установления соединений.

Если $t \in T$, $t = 0, 1, 2, \dots, t$ дискретные моменты времени и $t \ll \tau$, где τ – время обработки запроса на обслуживание (транзакта), то отношение, определяемое как

$$R_t = \{(n, k) | n \in N \& k \in K \& t \in T\}. \quad (1)$$

Есть множество запросов, поступивших с N входных линий к M выходным линиям за время $t = t_i - t_{i-1}$.

Отношение R_t функционально (является функцией), так как $\forall n(n, a) \in R_t \& (n, b) \in R_t \Rightarrow a = b$. Свойство функциональности вытекает из того, что с одной входной линии за столь малое время t не может быть послан запрос на соединение одновременно к нескольким выходным линиям.

В функциональном отношении R_t может выполняться (2):

$$\exists a(a, k) \in R_t \& (b, k) \in R_t, a \neq b. \quad (2)$$

При функционировании системы коммутации это означает, что с двух или более входных линий был получен запрос на установление соединения к одной и той же выходной линии за время t . Коммутационная система не в состоянии обслужить два и более таких запроса. Из этого следует, что необходима операция, которая исключит возможность существования (2), преобразовав функциональное отношение $R_t : N \rightarrow K$ в инъекцию.

Назовем данную операцию *выделением приоритета* и определим как (3)

$$\Theta_t = R_t \setminus R_{t(ex)}, \quad (3)$$

где $R_{t(ex)} \subset N \times K$, $R_{t(ex)} = \{(b, k) | \forall (a, k) \in R_t, a < b\}$.

Это означает, что при поступлении запроса к одной выходной линии с различных входных за время t , соединение будет предоставлено запросу, пришедшему с линии с меньшим номером. В общем случае может использоваться какая-либо другая система приоритетов, важно лишь преобразование R_t в инъекцию.

Со стороны входных линий M поступают идентификаторы K . Декартово произведение $K \times M$ представляет все возможные комбинации выходных линий и их имен. Если множество V_t состоит из доступных на момент t комбинаций выходных линий и их имен, то операция коммутации может быть записана в виде (4):

$$V_t \circ \Theta_t. \quad (4)$$

Множество занятий Q_t составляют пары $(k, m) \in Q_t$ выходных линий и их имен, для которых на данном шаге было установлено соединение.

Множество высвобождений P_t составляют элементы $(k, m) \in P_t$, для которых на данном шаге было разрушено соединение.

Множество доступных на момент времени t выходных линий и их имен V_t зависит от множества высвобождений P_{t-1} , выходных линий и их имен, освободившихся на предыдущем шаге и от множества занятий Q_{t-1} выходных линий и их имен, для которых на предыдущем шаге было установлено соединение.

Исходя из этого для некоторого произвольного $t \in T$ можно записать (5):

$$V_t = (V_{t-1} \cup P_{t-1}) \setminus Q_{t-1}. \quad (5)$$

Функционирование системы коммутации с параллельной настройкой, работающей в па-

чечном режиме при динамически поступающих требованиях, обеспечивается выполнением следующих операций:

– генерации элементов множества R_t . На момент времени t все элементы R_t должны быть определены.

– генерация в момент времени t элементов множества V_t .

– композиция отношений $V_t \circ R_t$.

По результатам имитационного моделирования [6], можно говорить о снижении вероятности потерь транзактов на 0,17 для отдельных режимов работы коммутационной системы, а значит, об ее более высокой эффективности, по сравнению с традиционными коммутаторами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дудко, А. Л. Неблокирующие коммутационные схемы / А. Л. Дудко. – М.: ВЦ АН СССР, 1990. – 59 с.: ил.
2. А. с. № 1441471 СССР, МПК Н 03 К 17/04. Матрич-

ный коммутатор с параллельной настройкой / А. В. Каляев, В. В. Жила; заявитель Таганрогский радиотехнический институт им. В. Д. Калмыкова. – № 4142175/21-21; заявл. 03.11.86; опубл. 30.11.88, Бюл. № 44.

3. Kutuzov, D. Switching Element for Parallel Spatial Systems / D. Kutuzov, A. Utesheva // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2011), Proceedings. – Krasnoyarsk: Russia Siberia Section of the IEEE Siberian Federal University, september 15–16, 2011, pp. 60–62.

4. Кутузов, Д. В. Схемотехническая реализация и моделирование коммутационных ячеек параллельных пространственных коммутационных систем / Д. В. Кутузов, А. Ю. Утешева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет». – 2010. – № 3 (11). – С. 11–16.

5. Кутузов, Д. В. Параллельные устройства распределения и обработки информации / Д. В. Кутузов, А. В. Осовский // Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2012. – 103 с.

6. Кутузов, Д. В. Имитационное моделирование параллельной пространственной коммутационной системы / Д. В. Кутузов, А. В. Осовский // Известия ВолГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 3). – С. 137–139.

УДК 519.8+681.3.069

Е. А. Лазарев, Д. Е. Шапошников, П. В. Мисевич

МЕТОД ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет имени Р. Е. Алексеева

elazarev.nnov@gmail.com, dm.shaposhnikov@gmail.com, p_misevich@mail.ru

В статье предлагается метод ветвей и границ для нахождения множества оптимальных по Парето решений бикритериальной задачи оптимизации сети передачи данных, приводятся результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: метод ветвей и границ, бикритериальная оптимизация, планирование сетей.

E. A. Lazarev, D. E. Shaposhnikov, P. V. Misevich

BRANCH AND BOUND METHOD FOR DATA TRANSMISSION NETWORK STRUCTURE OPTIMIZATION

Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev

The paper presents branch and bound method searching of Pareto optimal solutions set of the bi-criteria problem of data transmission network optimization and computational results.

Keywords: branch and bound method, bi-criteria optimization, network design.

Введение

Сети связи бурно развиваются в последние десятилетия в связи с резким ростом использования сети Интернет. По прогнозам компании Cisco рост интернет-трафика продолжится и к 2015 году увеличится в четыре раза, достигнув значения в тысячу экзобайт в год. Такое значительное увеличение количества передаваемой информации будет оказывать существенную нагрузку на имеющиеся сети передачи данных.

Требования надежности и качества обслуживания современных сетей передачи данных и крупные инвестиции в инфраструктуру связи сделали актуальной задачу разработки способов оптимизации структуры сетей, которые отвечают эксплуатационным параметрам в форме системы ограничений.

В данной работе рассматривается способ получения оптимальной структуры сети, основанной на бикритериальной модели сети передачи данных и применении метода ветвей и границ.

Математическая модель

Процедура оптимизации базируется на модели сети передачи данных, основанной на классических потоковых моделях [1]. Известен ориентированный граф $G=(V, E)$, задающий существующую сеть передачи данных. Каждое ребро $(u, v) \in E$ имеет положительную пропускную способность $c(u, v)$. В графе выделяются источник s и сток t , которые в модели могут являться фиктивными вершинами. Также нам известен граф $G'=(V, E')$, $(E \cap E' = \emptyset)$, задающий множество ребер, которые могут быть достроены вместе с их пропускными способностями $c'(u, v)$ и стоимостями строительства $p'(u, v)$. Ограничение пропускной способности канала диктуется его техническими характеристиками. Требуется модифицировать существующую сеть передачи данных для увеличения пропускной способности сети.

Возможным решением задачи является множество ребер $\bar{E}$ такое, что $\bar{E} \subseteq E'$. При этом рассматриваются стоимость строительства сети передачи данных

$$Q_1(x) = \sum_{(u,v) \in \bar{E}} p'(u, v) \quad (1)$$

и величина, обратная максимальной пропускной способности сети

$$Q_2(x) = \frac{1}{\sum_{v \in V'} f(s, v)}, \quad (2)$$

задаваемые графом $\bar{G}=(V, E \cup \bar{E})$. Причем функция потока $f: V \times V \rightarrow \mathbb{R}$ (величина $f(u, v)$ задает величину потока, передаваемого по ребру (u, v) в единицу времени) должна удовлетворять трем условиям:

- ограничение пропускной способности: $f(u, v) \leq c(u, v)$ для всех $u, v \in V$;

- антисимметричность: $f(u, v) = -f(v, u)$ для всех $u, v \in V$;

- сохранение потока: для всех $u \in V \setminus \{s, t\}$: $\sum_{v \in V'} f(u, v) = 0$.

Задача I-1. Задача оптимизации формулируется следующим образом:

По заданным ациклическим ориентированным графам $G=(V, E)$ и $G'=(V, E')$, $E \cap E' = \emptyset$, матрицам пропускных способностей $c(u, v)$,

$c'(u, v)$ и матрице стоимости ребер $p'(u, v)$ найти все множество P Парето-оптимальных решений бикритериальной задачи оптимизации $\min_{x \in D} (Q_1(x)); \min_{x \in D} (Q_2(x))$, отсортированных по первому критерию.

Для поставленной задачи было доказано, что множество оптимальных по Парето решений может состоять из всех элементов множества решений D , мощность которого экспоненциально зависит от размерности задачи; доказана NP-трудность задачи I-1 нахождения всего множества оптимальных по Парето решений [2]. Поэтому была сформулирована задача поиска субоптимального множества решений I-2 [3].

Задача I-2. По заданным ациклическим ориентированным графам $G=(V, E)$ и $G'=(V, E')$, $E \cap E' = \emptyset$, матрицам пропускных способностей $c(u, v)$, $c'(u, v)$ и матрице стоимости ребер $p'(u, v)$ построить субоптимальное множество решений.

Для задачи I-2 были предложены генетические алгоритмы поиска субоптимального решения [3]. Для проверки эффективности предложенных эвристических алгоритмов необходимо вычислять все множество оптимальных по Парето решений. Метод полного перебора, используемый для этих целей, не способен находить ответ к задаче за приемлемое время, в случае, когда мощность множества E' превышает 30. Поэтому в данной работе предлагается более быстрый алгоритм, основанный на методе ветвей и границ для нахождения всего множества оптимальных по Парето решений задачи бикритериальной оптимизации сети передачи данных, который позволит искать решения для задач большей размерности.

Описание метода ветвей и границ

Под *методом ветвей и границ* понимается алгоритм решения задачи, имеющий древовидную структуру поиска оптимального решения и использующий результаты решения оценочных задач [4]. Древовидная структура, описывающая разбиение всего множества решений на непересекающиеся подмножества $D_1, D_2, \dots, D_n$ ($D = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_n$ и $D_i \cap D_j = \emptyset, i \neq j$), называется *деревом ветвления*. Приведем описание реализации метода ветвей и границ для решения задачи I-1.

1. Пронумеруем все ребра из множества E' , произвольным образом различными числами от 1 до $|E'|$. Обозначим через e_i ребро с номером i из множества E' .

2. Каждая вершина дерева ветвления соответствует некоторому подмножеству D_p области допустимых решений и содержит нижнюю (L_p) и верхнюю (H_p) оценки значения пары $(Q_1(x), Q_2(x))$ на этом подмножестве. При этом корневая вершина (нулевой уровень дерева) соответствует всей области допустимых решений D , а любой вершине уровня $k > 0$ соответствует подмножество решений, получающееся при фиксировании первых k ребер (из множества E') сети. Под термином «фиксирование» понимается тот факт, что для выбранных ребер уже принято решение: будут они построены или нет. Обозначим через S множество, содержащее фиксированные ребра, которые будут построены.

3. Из каждой вершины (за исключением концевых вершин, в которых зафиксированы все $|E'|$ ребер) производится ветвление на два подмножества, т. е. осуществляется дихотомическое ветвление. При этом первое из подмножеств получается путем фиксирования очередного ребра, но без добавления его в S ; таким образом, данное ребро не будет построено в сети. Второе из подмножеств получается путем фиксирования очередного ребра с добавлением его в S , таким образом, данное ребро будет построено в сети.

4. Нижняя оценка L_p решения x после фиксирования первых k ребер равна:

$$a) Q_1(x) = \sum_{e \in S} p'(e) + \sum_{i=k+1}^{|E'|} p'(e_i), \text{ т. е. сумме}$$

стоимостей строительства фиксированных ребер, которые будут построены, и ребер, которые еще не рассматривались, т. е. ребер с номерами, большими k ;

$$b) Q_2(x) = \frac{1}{F(G(V, E \cup S))}, \text{ т. е. обратной}$$

величине потока для графа, полученного путем добавления в исходный граф множества построенных фиксированных ребер.

5. Верхняя оценка H_p решения x после фиксирования первых k ребер равна:

$$a) Q_1(x) = \sum_{e \in S} p'(e), \text{ т. е. сумме стоимостей}$$

строительства фиксированных ребер, которые будут построены;

$$b) Q_2(x) = \frac{1}{F(G(V, E \cup S \cup \{e_i | i > k\}))}, \text{ т. е.}$$

обратной величине потока для графа, полученного путем добавления в исходный множества построенных фиксированных ребер и всех ребер, которые еще не рассматривались, т. е. ребра с номерами, большими k .

6. Функцией ветвления является рекурсивная функция (т. е. функция, которая вызывает саму себя), на вход которой подается номер ребра k для рассмотрения (подразумевается, что при вызове функции с параметром k ребра с номерами от 1 до $k-1$ являются фиксированными). Запуск алгоритма производится вызовом функции ветвления с аргументом 1.

7. Для каждой вершины дерева ветвления рассчитывается верхняя H_p и нижняя L_p оценки решения p . Они сравниваются с решениями из множества рекордов R . Пусть H_r и L_r – верхняя и нижняя оценки решения $r \in R$. Тогда:

а) если $L_p > H_r$, то $R = R \setminus \{r\}$, т. е. если нижняя граница текущего подмножества решений D_p доминирует верхнюю оценку решения $r \in R$, то r удаляется из множества рекордов, так как оно обязательно будет доминироваться одним из решений множества D_p ;

б) если $L_r > H_p$, то ветвление из данной вершины прекращается, т. е. если нижняя оценка решения $r \in R$ доминирует верхнюю оценку D_p , то в рассматриваемом подмножестве не может быть решений, оптимальных по Парето, так как все решения D_p доминируются рекордом r ;

с) если $\neg \exists r \in R : L_r > H_p$, то если текущая вершина дерева ветвления является концевой, то решение p добавляется во множество рекордов R ($R = R \cup \{p\}$). В противном случае, продолжается ветвление из данной вершины (вызывается функция ветвления с аргументом $k+1$). То есть, если ни одна нижняя оценка рекорда из R не доминирует верхнюю оценку подмножества решений D_p , то если зафикси-

рованы еще не все ребра, необходимо продолжить ветвление, иначе решение p является оптимальным по Парето на всех рассмотренных на данный момент подмножествах и его необходимо добавить в R .

Здесь символ $\succ$ обозначает Парето-доминируемость одного решения над другим.

8. Останов алгоритма выполняется при невозможности осуществления дальнейшего ветвления, т. е. после того как были рассмотрены все вершины дерева ветвлений, для которых было рационально выполнить операцию ветвления.

В результате работы алгоритма множество R содержит все решения задачи $I-1$, оптимальные по Парето.

Стоит отметить, что предложенный метод прост в реализации и не требует явного хранения в памяти подмножеств решений, которые необходимо подвергнуть процедуре ветвления.

Анализ метода

В худшем случае, метод по сложности будет сравним с алгоритмом полного перебора. В работе [2] приведен пример сети, в которой множество оптимальных по Парето решений имеет мощность $2^{|E'|}$. На такой сети метод ветвей и границ в ходе работы не сможет отсеять ни одного подмножества решений и в итоге построит дерево ветвлений, состоящее из $|E'|$ уровней (корень дерева имеет уровень 0). Уровень глубины i будет иметь 2^i вершин.

Несмотря на это, среднее время работы метода гораздо меньше, чем у алгоритма полного перебора, что доказывается результатами вы-

числительных экспериментов, приведенными ниже.

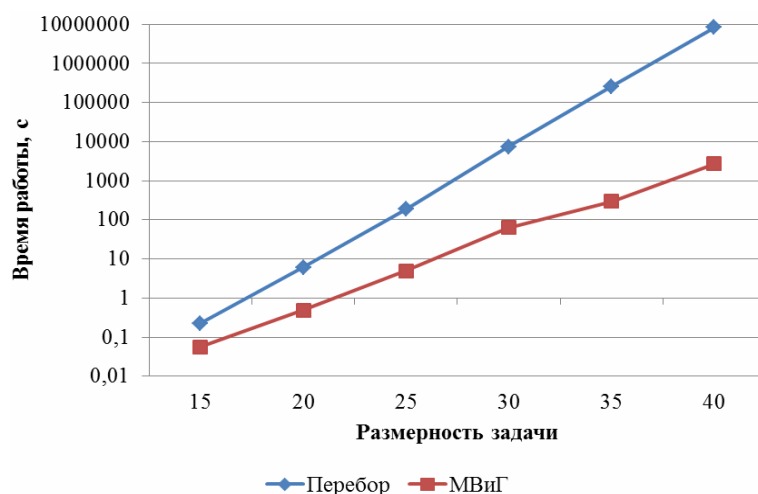
Требование по количеству памяти, необходимой для работы данного алгоритма, также имеет экспоненциальную зависимость от размера входных данных, так как необходимо хранить все недоминируемые решения, найденные в ходе работы. В худшем случае, в памяти будет храниться $2^{|E'|}$ решений. Таким образом, требования по памяти составляют $O(2^{|E'|} \cdot |E'|)$.

Однако чаще всего множество оптимальных по Парето решений имеет порядок нескольких десятков. Результаты вычислительных экспериментов показали, что для сетей, в которых можно достроить 35 каналов, Парето-совокупность содержит в среднем 41 решение (величина получена при анализе 100 различных примеров сетей). Поэтому на практике требуемое количество памяти невелико.

Результаты вычислительных экспериментов

Приведем результаты тестирования программной реализации метода ветвей и границ, выполненной на языке C++. Вычислительные эксперименты заключались в нахождении всего множества оптимальных по Парето решений для 100 различных случайным образом сгенерированных сетей передач данных с числом ребер во множестве E' , равным 15, 20, 25, 30, 35 и 40.

На рисунке приведено среднее время работы алгоритма полного перебора и метода ветвей и границ на задачах различной размерности. Для случаев $|E'| = 35$ и $|E'| = 40$ приведено



Среднее время работы алгоритма полного перебора и метода ветвей и границ на задачах различной размерности

приближенное время работы алгоритма полного перебора, вычисленное аналитически, исходя из анализа сложности работы данного алгоритма, поскольку реальный запуск на таких больших входных данных не представляется возможным.

Из рисунка видно, что метод ветвей и границ работает на порядок быстрее, уже начиная с сетей размерности 20. Чем больше мощность множества $|E'|$, тем больше разница. Так, для случая $|E'| = 40$ среднее время метода ветвей и границ более чем на три порядка меньше времени работы алгоритма полного перебора.

Выводы

Предложенный метод нахождения множества оптимальных по Парето решений задачи бикритериальной оптимизации сети передачи данных является эффективным способом решения поставленной задачи. Тестирование пока-

зывает, что он, в среднем, на несколько порядков превосходит по скорости работы алгоритм полного перебора и поэтому может быть использован для решения задач, размерность которых на 10–15 единиц превышает максимальную размерность задач, разрешимых полным перебором за приемлемое время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен [и др.]. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1296 с.
2. Лазарев, Е. А. Бикритериальная модель сети передачи данных / Е. А. Лазарев, Д. Е. Шапошников, П. В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 3.2(45). – С. 255–258.
3. Лазарев, Е. А. Генетические алгоритмы оптимизации сети передачи данных / Е. А. Лазарев, Д. Е. Шапошников, П. В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – № 4(46). – С. 59–63.
4. Сигал, И. Х. Введение в прикладное дискретное программирование. Модели и вычислительные алгоритмы / И. Х. Сигал, А. П. Иванова. – М.: Физматлит, 2007. – 304 с.

УДК 681.324

В. С. Лукьянов, Ф. А. Х. Аль-Хадша

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПО ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА

Волгоградский государственный технический университет

luk-vs@mail.ru, alhadsha@mail.ru

В данной статье представлен вариант проектирования компьютерной сети с вычисляемой схемой расположения центров коммутации и соединениями между ними, с учетом ограничений по стоимости канала.

Ключевые слова: эвристические методы проектирования, конфигурация вычислительных сетей.

V. S. Lukyanov, F. A. H. AL-hadsha

DESIGNING NETWORK TOPOLOGY WITH THE CHANNEL COST LIMITATION

Volgograd State Technical University

A way of engineering a computer network with adjustable locations of commutators and their interconnections is presented in this paper. This way considers the channel cost limitation.

Keywords: heuristic methods of engineering a computer network, configuration of computer networks.

Введение

Задача проектирования топологии сети включает в себя соединение абонентов с центрами коммутации с использованием кабеля минимальной суммарной длины.

Уплотнением канала назовем соединение каналов от нескольких абонентов в один. Иными словами, при уплотнении канала абонент соединяется не с центрами коммутации, а с другими абонентами. В результате через абонента может проходить не только его канал, но и канал других абонентов. Ограничение налагается на суммарную ширину канала у абонента.

Будем считать, что ограничения едины для всех абонентов. Ограничение, равное бесконечности, эквивалентно отсутствию ограничений.

Задачи максимизации или минимизации канала через абонента не ставится. Хотя минимизация суммарной длины кабеля обычно ведет к увеличению ширины канала.

Будем также считать, что центры коммутации как-то соединены между собой и решать проблему их соединения не следует. Также полагаем, что на подключаемые к центрам коммутации каналы не налагаются ограничения, то есть центры коммутации способны принять всех абонентов.

Стоимостью линии связи будем считать ее длину (стоимость кабеля действительно пропорциональна его длине).

Существуют различные методы проектирования топологии сети. Методы, рассматриваемые здесь, являются эмпирическими и дают решение лишь близкое к оптимальному, но практика использования этих методов говорит, что отклонения незначительны.

Метод Прима

Данный метод создан, чтобы построить минимальное остовное дерево по существующему графу. Будем полагать, что каждый узел может быть соединен с каждым, то есть в изначальном графе каждый узел связан с каждым. Это так называемая полносвязная топология.

С одной стороны, этот метод дает оптимальное решение (т. е. решение с меньшей суммарной длиной кабеля не существует). С другой стороны, этот метод не учитывает ограничения, налагаемые на уплотнение канала.

Суть метода проста. Он является одним из жадных алгоритмов. Существуют множества вершин и дуг, входящих в оптимальное решение. На каждой итерации добавляется одна вершина и одна дуга. Выбирается самая дешевая дуга из дуг, соединяющих вершину, входящую в оптимальное решение, и вершину, не входящую в оптимальное решение, и соответствующая вершина, не входящая в оптимальное решение. Если несколько дуг имеют одинаковую стоимость, то выбирается любая из них. Итерации продолжают, пока все вершины не войдут в оптимальное решение.

Существуют несколько способов выбора начального значения множеств оптимального решения. Во-первых, можно найти дугу минимальной длины, поместить ее во множество дуг, а во множество вершин поместить вершины, которая она соединяет. Если существует несколько дуг минимальной стоимости, то можно выбирать любую. Во-вторых, можно включить во множество вершин произвольную вершину. Вне зависимости от того, с какой вершиной мы начнем, решение будет оптимальным.

В нашем случае мы полагаем, что центры коммутации уже соединены, поэтому стоимость их соединения – 0, и стартовое множество вершин будет включать множество центров коммутации. Включать или не включать дуги, соединяющие центры коммутации, роли не играет.

Как уже говорилось выше, метод дает идеальное решение, но не учитывает ограничения.

Метод Прима с ограничениями

Метод Прима с ограничениями – это эмпирическая модификация метода Прима (то есть оптимальность решения не гарантируется).

Отличие в том, что перед тем, как добавить вершину и дугу во множества оптимального решения, мы проверяем ограничения. Делается это следующим образом. Канал от добавляемого узла складывается с каналом от узла, к которому мы добавляем, до центра коммутации. Параллельно с этим мы проверяем ограничения для каждого из абонентов. Если ограничения выполняются, то узел и дуга добавляются во множества. Если хоть где-то ограничения не выполняются, все изменения откатываются и выбранная дуга больше не рассматривается (как вариант можно полагать ее длину равной бесконечности).

Метод Ежи-Вильямса

Метод Ежи-Вильямса с самого начала учитывает ограничения, поэтому соответствующая модификация не требуется. Метод является эмпирическим и дает решение, близкое к оптимальному.

В принципе, этот метод также является жадным алгоритмом. Суть его предельно проста. Сначала давайте введем пару терминов. Первым узлом соединения будем называть узел, который присоединяют, а вторым – тот, к которому присоединяют. Канал проходит от первого ко второму. Первым узлом может быть только абонент, а вторым – как абонент, так и центр коммутации.

Сначала выбираются два узла по определенному критерию. Первый из них вместо того, чтобы присоединяться к центру коммутации, присоединяется ко второму узлу. Но перед этим проверяются отсутствие циклов и ограничения. Если уплотнение канала не противоречит ограничениям, а циклы не образуются, то соединение узлов производится, каналы уплотняются. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то соединение первого со вторым больше не рассматривается, но соединение второго с первым при определенных условиях может быть возможно. Итерации продолжают до тех пор, пока все абоненты не будут присоединены или пока не закончатся возможные соединения.

Нами были найдены два способа [1, с. 48–49; 102–104; 160], [2, с. 173–176] выбора пары узлов для соединения:

1) *e* (*most expensive*, самый дорогой) – выбирается такая пара, чтобы разность между расстоянием от первого узла до второго и расстоянием от первого узла до ближайшего центра коммутации была минимальной. Обратите внимание, что эта величина не может быть положительной, потому что, если положить вторым узлом ближайший центр коммутации, то получится 0 и ограничения будут верны в силу сделанных допущений;

2) *f* (*furthest*, самый дальний) – первым выбирается узел, наиболее удаленный от ближайшего центра коммутации, а вторым – узел, ближайший к первому.

Есть еще одна деталь. Существуют два способа рассмотрения узлов:

1) *s* (*single*, одинарный) – после присоединения первого узла ко второму первый узел выводится из рассмотрения, дальнейшие подключения к нему запрещены. В этом случае образование циклов невозможно, поэтому проверку можно не проводить. Также упрощается процесс уплотнения канала. Поясним. Если подключаемся к некоторому узлу, то мы уверены, что он ни к чему не подключен, поэтому достаточно уплотнить лишь его канал;

2) *m* (*multiple*, множественный) – после соединения двух узлов присоединения к любому из них допустимы. Образование циклов возможно, поэтому необходимо проверять, не существует ли уже в системе путь от второго к первому. Параллельно с этим осуществляем попытку уплотнения каналов, ведь второй узел может быть соединен со своим «вторым» узлом и канал того узла тоже надо будет уплотнять.

Итого мы получаем четыре различных варианта алгоритма. Расположим их по возрастанию стоимости сети (имеется в виду общая тенденция):

- 1) *em*;
- 2) *fm*;
- 3) *fs*.

Вариант «4» *es* дает весьма противоречивые по качеству результаты. В случае «*fs*» буква «*s*» оправдана тем, что мало рационально соединять узлы с дальним (мало рационально искать наикратчайший путь через более дальний узел, но иногда это все же оказывается выгодно), а в случае «*es*» буква «*s*» ничем не оправдана.

Самые хорошие результаты дает «*em*». В принципе, его не было в источниках, он по-

лучился как результат логических рассуждений по остаточному принципу, т. е. в результате комбинации существующих вариантов.

Расположим по возрастанию времени расчета:

- 1) *fs*;
- 2) *fm*;
- 3) *es*;
- 4) *em*.

Иными словами, расчет увеличивает буква «*e*». Это не удивительно. Поиск дальнего узла и ближайшего к нему занимает линейное время, а поиск пары «дорогих» узлов – квадратичное время. Буква «*m*» тоже увеличивает время расчета, но слабее. Уплотнения канала и проверка на циклы при одинарном рассмотрении занимает константное время, а при многократном – как максимум линейное.

Способ «*em*» дает самое качественное решение, но если время расчета становится критичным, то можно, слегка снизив качество, сильно сократить время расчета, используя «*fm*» или «*fs*». Последний даст результат несколько хуже предпоследнего при практически одинаковом времени расчета, но реализовать его проще (нет проверки на циклы, гораздо проще уплотнение канала).

Об изолированных узлах

Изолированным назовем узел, который никак не может быть соединен с центром коммутации. Чтобы это было возможно, необходимо и достаточно, чтобы ширина канала узла была больше ограничения. В противном случае существует, как минимум, прямое соединение с центром коммутации. Такие узлы выпадают из топологии по факту своего существования, поэтому дальше они рассматриваться не будут.

Иными словами, узлы получаются изолированными не в процессе синтеза, а потому, что заданы такими.

Программа для построения топологии сети

Принцип работы программы прост. Программа генерирует случайный набор абонентов в кругах заданного радиуса. Радиус и азимутальный угол распределены равномерно. Количество абонентов задается. Также задаются ограничение и максимальная ширина канала узлов. Ширина определенного канала – это случайное число, равномерно распределенное по промежутку от 0 до максимальной ширины канала. Также задаются число центров коммута-

ции и Seed для генерации, чтобы испытания можно было повторить.

Затем проводится соединение абонентов заданным алгоритмом. Программа использует внешние исполнительные файлы для расчета, поэтому мы также выбираем архитектуру. Расчет выполняется параллельно с использованием технологии OpenMP.

Программа выдает два времени расчета: время непосредственного расчета топологии и суммарное время, которое также включает в себя время построения картинки, передачу данных через stdin и stdout, генерацию топологии и т. д. Время, анализируемое нами, учитывает только время построения топологии, хотя суммарное время тоже отображается в программе.

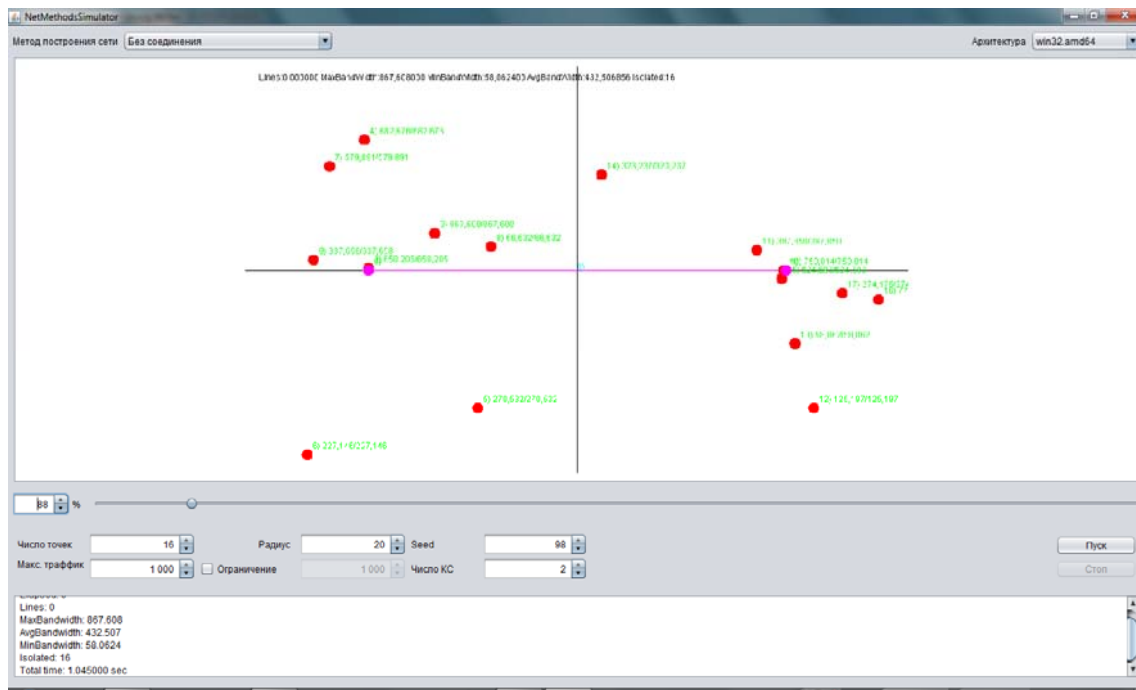


Рис. 1. Система абонентов

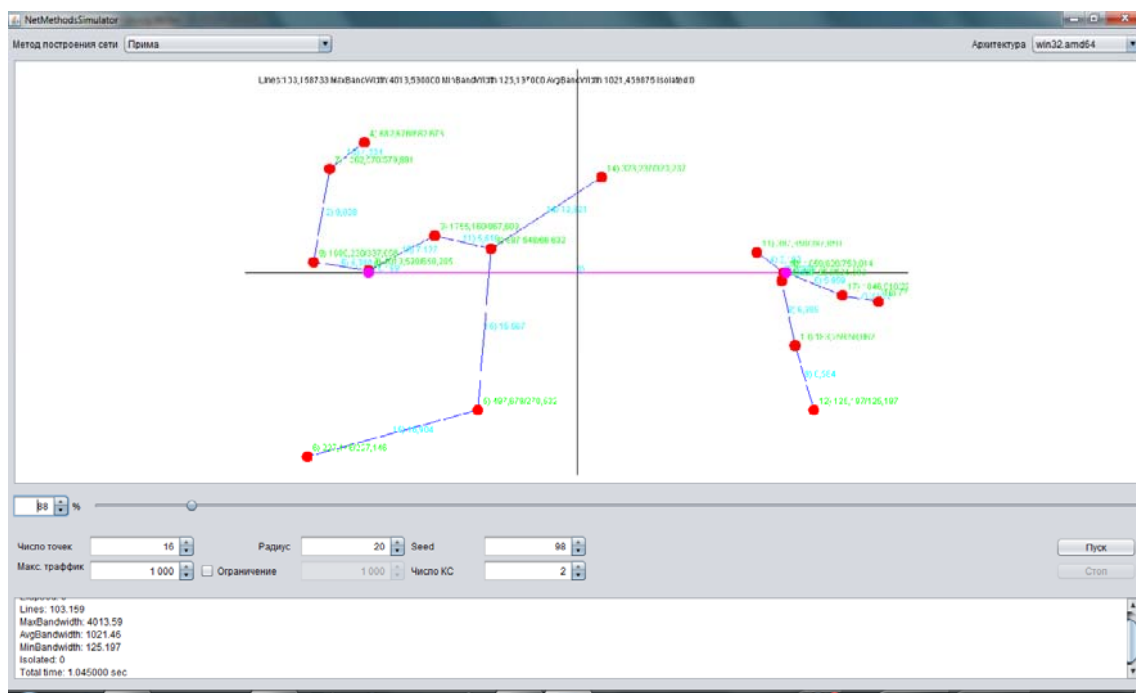


Рис. 2. Соединение методом Прима без ограничений

Все приводимые сначала примеры имеют малый размер, чтобы их можно было внимательно рассмотреть. При малом размере задачи время расчета содержит большую случайную составляющую, поэтому нет смысла его здесь приводить.

При больших объемах задачи время расчета становится критичным и довольно определенным, поэтому для большой задачи мы приводим временные показатели. Картинки не приводятся, потому что их очень трудно анализировать.

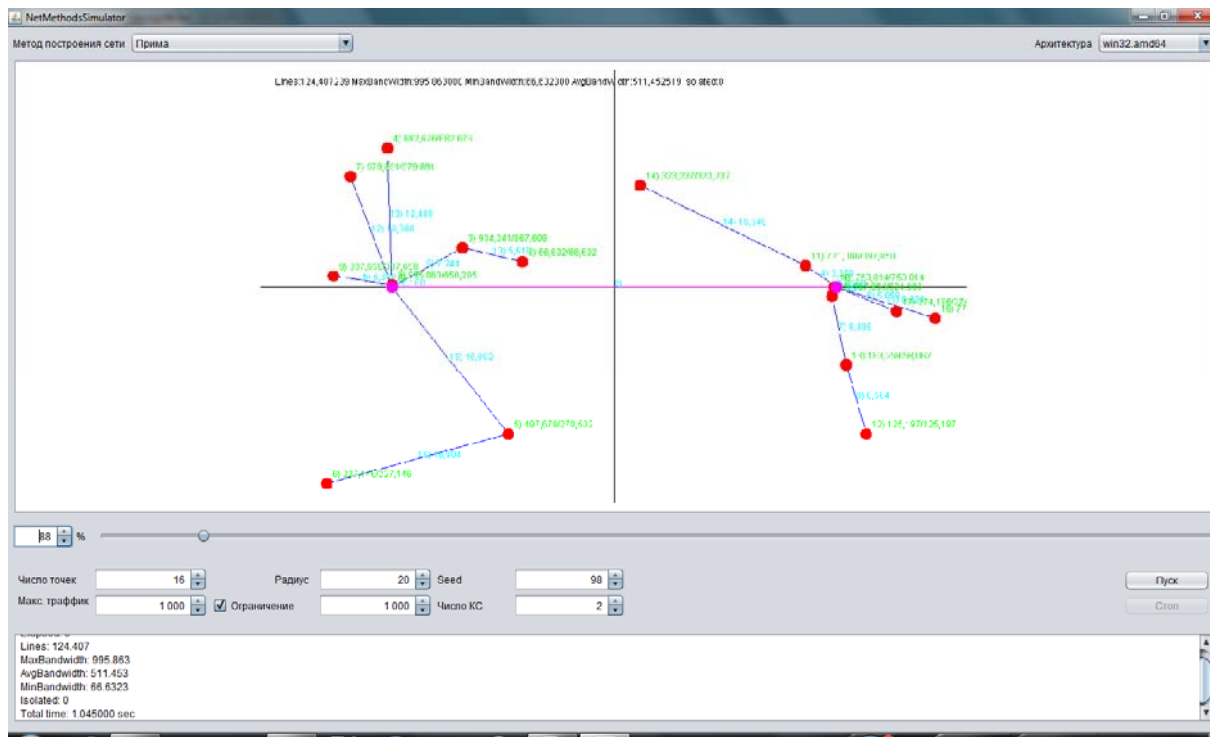


Рис. 3. Соединение методом Прима с ограничениями

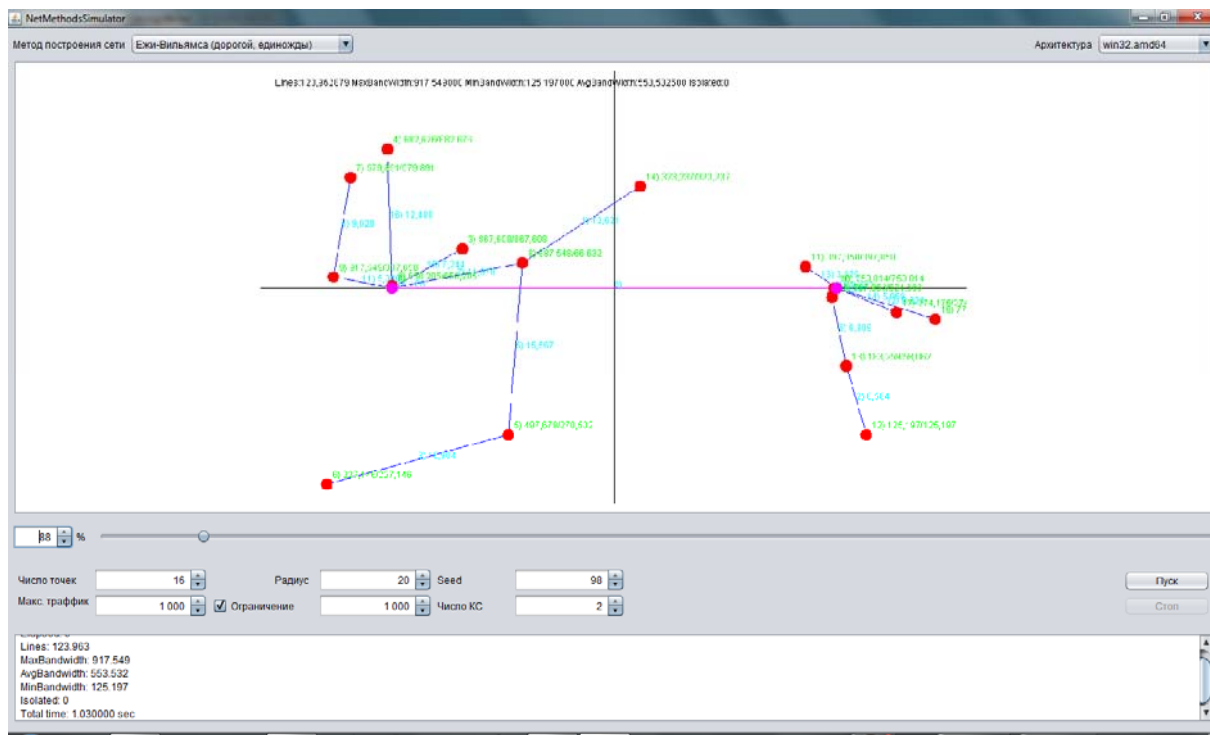


Рис. 4. Соединение методом Ежи-Вильямса (em)

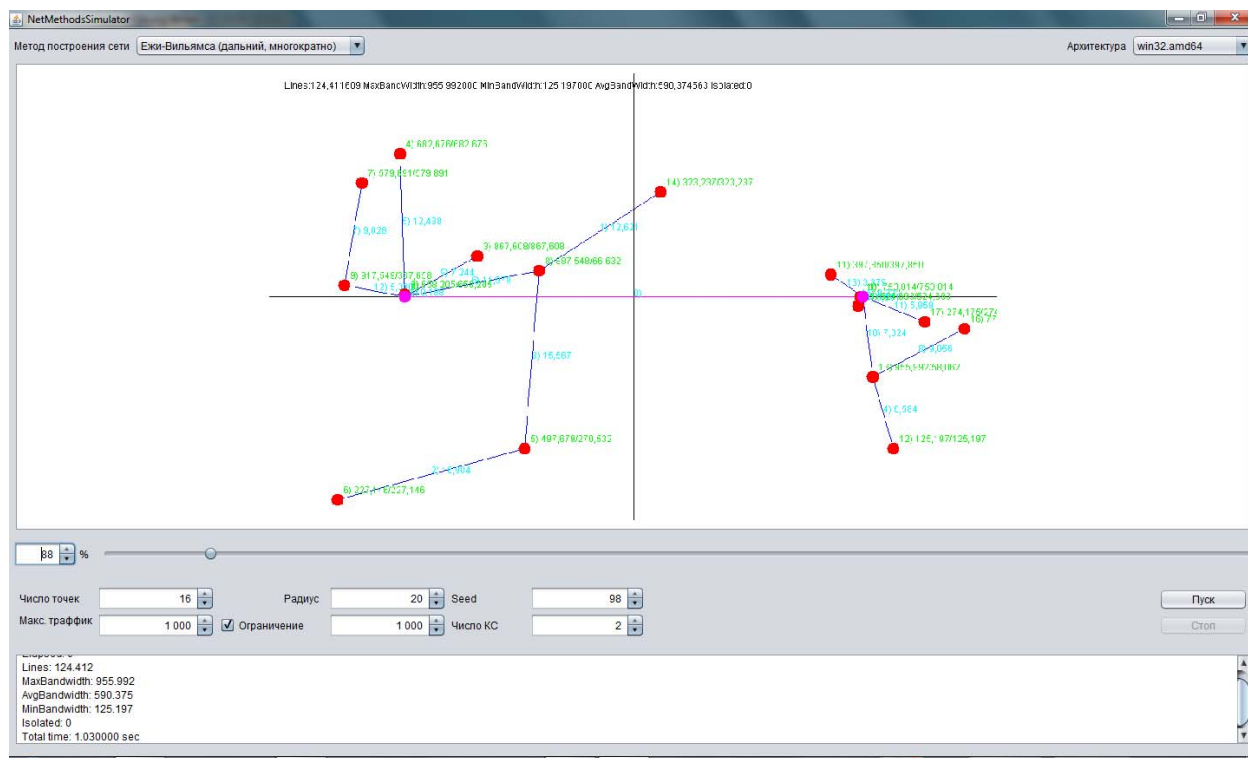


Рис. 5. Соединение методом Ежи-Вильямса (fm)

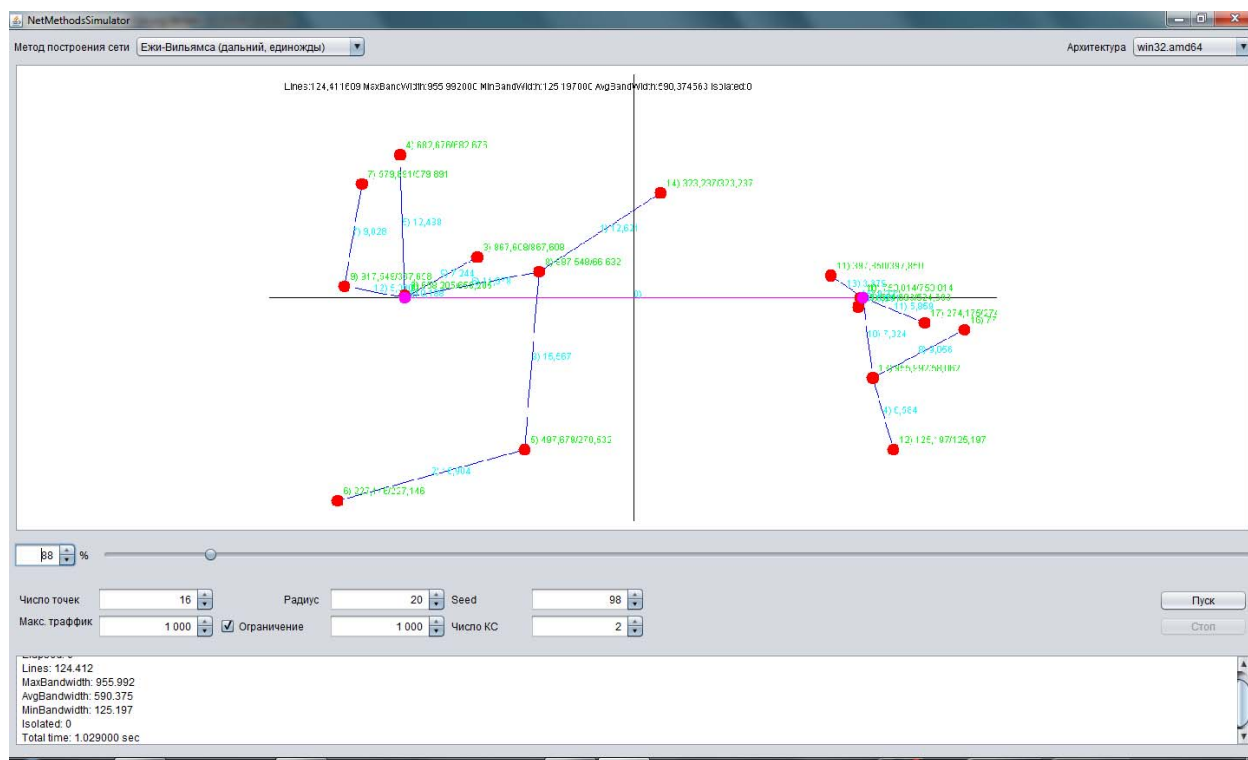


Рис. 6. Соединение методом Ежи-Вильямса (fs)

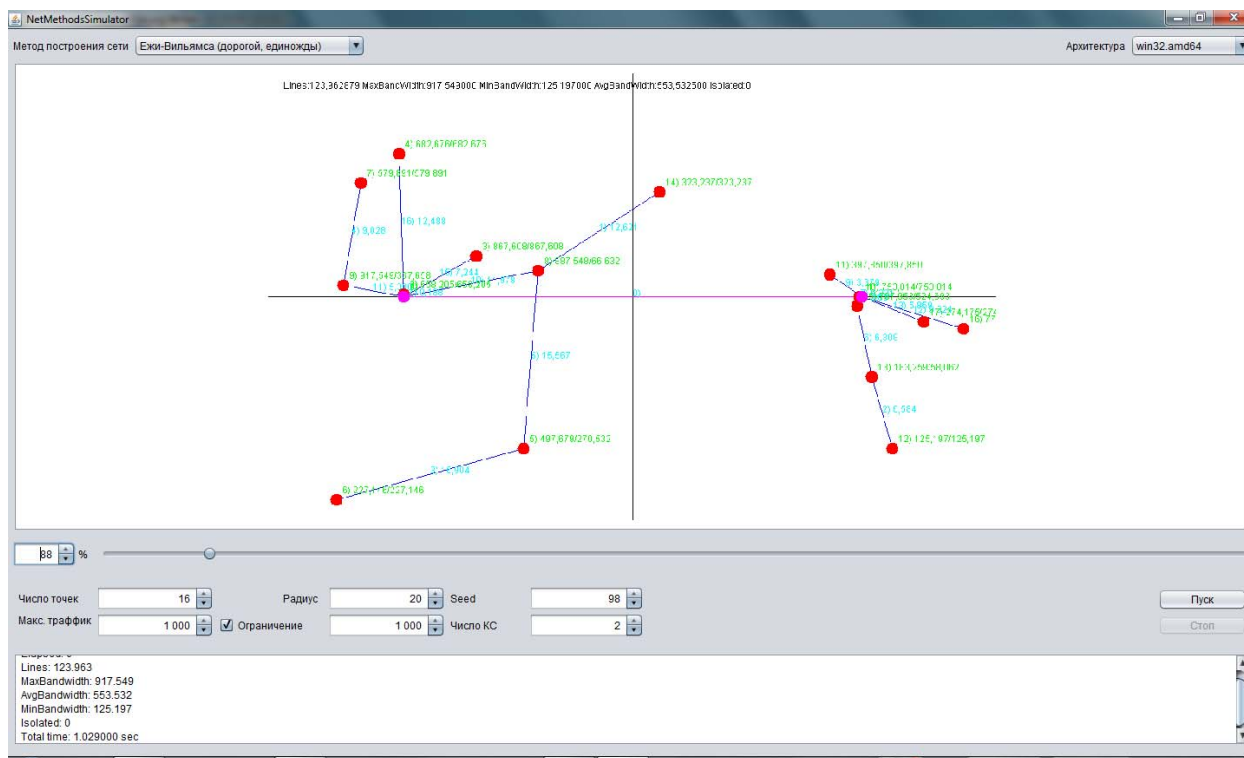


Рис. 7. Соединение методом Ежи-Вильямса (es)

Проведем сопоставление результатов расчета в табл. 1. Во-первых, видно, что здесь метод «Ежи-Вильямса (es)» дает хороший результат, хотя довольно часто бывает наоборот. Во-вторых, классический метод Прима не дает правильное решение, он лишь показывает нижнюю границу стоимости соединения.

Таблица 1

Сравнение методов на малом числе абонентов

Метод	Стоимость сети
Прима	103,159
Прима с ограничениями	124,407
Ежи-Вильямса (em)	123,963
Ежи-Вильямса (fm)	124,412
Ежи-Вильямса (fs)	124,412
Ежи-Вильямса (es)	123,963

Теперь рассмотрим соединение на большем числе точек. Увеличим его в 100 раз. Ограничение увеличим в 10 раз. Однако мы уже не будем строить картинки, потому что на них будет трудно что-либо рассмотреть. Просто сведем данные в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение методов на большом числе абонентов

Метод	Стоимость сети	Время расчета, сек
Прима	1220,69	4,602
Прима с ограничениями	2224,33	311,953
Ежи-Вильямса (em)	1709,63	164,923
Ежи-Вильямса (fm)	1798,09	1,045
Ежи-Вильямса (fs)	1825,79	0,702
Ежи-Вильямса (es)	1752,17	71,26

Очевидно, что метод Прима с ограничениями дает некачественное решение и занимает большое время, поэтому этот метод не подходит для построения сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукьянов, В. С. Модели топологических структур проводных телекоммуникационных сетей : моногр. / В. С. Лукьянов, Д. Г. Влазнев, А. В. Старовойтов ; ВолГТУ. – Волгоград, 2006. – 176 с.
2. Лукьянов, В. С. Модели анализа вероятностно-временных характеристик и структур сетей передачи данных : моногр. / В. С. Лукьянов, А. В. Старовойтов, И. В. Черковский ; ВолГТУ. – Волгоград, 2006. – 184 с.

УДК 003.26

*В. С. Лукьянов, И. А. Степаненко***ПРОБЛЕМА ПОВТОРНОЙ ОПЛАТЫ ЭЛЕКТРОННЫМ ЧЕКОМ****Волгоградский государственный технический университет**

stepanenkoigor1988@yandex.ru

Рассмотрена модификация финансового криптографического протокола «анонимные денежные чеки». В работе рассматриваются основные шаги выполнения модифицированного протокола, объясняется, как решается проблема повторного использования чека, а также говорится о достоинствах и недостатках рассмотренной модификации протокола «анонимные денежные чеки».

Ключевые слова: финансовая криптография, электронные денежные чеки, система электронных платежей, электронная наличность.

*V. S. Lukyanov, I. A. Stepanenko***REPAYMENT PROBLEM OF ELECTRONIC CHECK****Volgograd State Technical University**

Reviewed modification of the financial cryptographic protocol «anonymous cash checks». This paper deals with the implementation of the basic steps of the modified protocol, explains how to solve the problem of reuse check and describes the advantages and disadvantages discussed modifying the protocol "anonymous cash checks".

Keywords: financial cryptography, electronic cash checks, electronic funds transfer, electronic cash, repayment problem.

В модели электронных чеков одной из ключевых проблем является повторная оплата чеком, который уже ранее депонировался.

В данной статье рассматривается модификация криптографического протокола анонимных денежных чеков, который построен на базе «слепой» подписи, введенной Дэвидом Чаумом. Заметим, что на базе «слепой» подписи строятся многие другие криптографические протоколы где, так или иначе, затрагивается проблема анонимности (например, протоколы электронного голосования [4]). Данная модификация позволяет исключить возможность повторной оплаты чеком, который уже был использован ранее. Идея заключается в том, чтобы ввести криптографический механизм, позволяющий лишить анонимности лиц, которые повторно тратят денежный чек [1–3].

Рассматриваемый модифицированный протокол состоит из следующих шагов [2]:

1) покупатель готовит 100 анонимных денежных чеков по 1000 рублей каждый. К каждому денежному чеку он добавляет уникальную строку, выбранную случайным образом и достаточно длинную, чтобы вероятность использования этой строки другим человеком была пренебрежимо мала;

2) покупатель вкладывает каждый из них и листок копировальной бумаги в 100 различных конвертов и относит все конверты в банк;

3) банк открывает 99 конвертов и убеждается, что каждый чек выписан на 1000 рублей;

4) банк подписывает единственный оставшийся нераспечатанным конверт. С помощью копировальной бумаги подпись переводится на чек. Банк возвращает нераспечатанный конверт покупателю и списывает 1000 рублей с его счета;

5) покупатель вскрывает конверт и отдает денежный чек продавцу;

6) продавец проверяет банковскую подпись, убеждаясь в законности денежного чека;

7) продавец относит денежный чек в банк;

8) банк проверяет свою подпись и по своей базе данных убеждается, что денежный чек с такой уникальной строкой ранее не депонировался. Если это так, банк начисляет 1000 рублей на счет продавца и записывает уникальную строку в базу данных;

9) если денежный чек уже был депонирован ранее, банк отказывается принять его.

Из рассмотренного криптографического протокола следует, что если покупатель попытается расплатиться копией денежного чека или продавец попытается депонировать денежный чек повторно, используя копию, то банк обнаружит факт мошенничества.

Данный протокол, являющийся модификацией протокола «анонимные денежные чеки» позволяет защититься от мошенников, но не дает возможности установить их личности. Банк не знает, попытался ли получатель заверенного банком чека обмануть продавца или продавец предпринял попытку обмануть банк.

Данная неоднозначность исправляется следующим протоколом [2]:

1) покупатель готовит 100 анонимных денежных чеков по 1000 рублей каждый. К каждому денежному чеку он добавляет уникальную строку X , выбранную случайным образом и достаточно длинную, чтобы вероятность использования этой строки другим человеком была пренебрежимо мала;

2) покупатель вкладывает каждый из них и листок копировальной бумаги в 100 различных конвертов и относит все конверты в банк;

3) банк открывает 99 конвертов и убеждается, что каждый чек выписан на 1000 рублей, и что все случайные строки X различны;

4) банк подписывает единственный оставшийся нераспечатанным конверт. С помощью копировальной бумаги подпись переводится на чек. Банк возвращает нераспечатанный конверт покупателю и списывает 1000 рублей с его счета;

5) покупатель вскрывает конверт и отдает денежный чек продавцу;

6) продавец проверяет банковскую подпись, убеждаясь в законности денежного чека;

7) продавец просит покупателя написать случайную идентификационную строку Y на денежном чеке. К данной строке предъявляются те же требования, что и к строке X из первого пункта;

8) покупатель выполняет требования продавца;

9) продавец относит денежный чек в банк;

10) банк проверяет свою подпись и по своей базе данных убеждается, что денежный чек с такой уникальной строкой ранее не депонировался. Если это так, банк начисляет 1000 рублей на счет продавца и записывает пару X и Y в базу данных;

11) если уникальная строка X уже есть в базе данных, банк отказывается принять денежный чек и сравнивает идентификационную строку Y на денежном чеке с аналогичной строкой из базы данных. Если они совпадают, то банк убеждается, что копия была снята с чека продавцом. Если идентификационные строки различны, то банк знает, что чек был скопирован тем, кто его готовил.

Предполагается, что продавец не может изменить идентификатор Y после того как его напишет на чеке покупатель. Однако данный протокол не решает проблему полностью. Покупатель может потратить повторно денежный чек, написав тот же самый идентификатор на этапе восемь описанного протокола. Продавец будет введен в заблуждение, если у него нет собственной базы данных, где он хранит полученные денежные чеки и идентификаторы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Запечников, С. В.* Криптографические протоколы и их применение в финансовой и коммерческой деятельности / С. В. Запечников. – М.: Горячая Линия-Телеком, 2007.
2. *Шнайер, Б.* Прикладная криптография / Б. Шнайер. 2-е изд. – Москва: Триумф, 2002.
3. *Смарт, Н.* Мир программирования. Криптография / Н. Смарт. – М.: Техносфера, 2005.
4. *Македонский, С. А.* Анализ систем проведения электронного голосования / С. А. Македонский, В. С. Лукьянов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 9). – С. 152–155.
5. *Македонский, С. А.* Универсальный протокол защищенного электронного голосования / С. А. Македонский, В. С. Лукьянов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 9). – С. 156–158.

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
Волгоградского государственного технического университета
№ 10 (97), 2012 г.

С е р и я «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
Выпуск 14

Межвузовский сборник научных статей

Редактор *Л. Н. Рыжих*
Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2012 г. (научные издания). Поз. № 13.
Подписано в печать 08.08.2012. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,72. Уч.-изд. л. 24,66.
Тираж 80 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В сборнике научных статей «Известия высших учебных заведений», серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование наземных транспортных и тяговых систем и их элементов, а также на повышение эффективности транспортных операций.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится подпись автора (на бумажном варианте).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *б*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной – двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.