

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 21

№ 12(139)

Межвузовский сборник научных статей
Издается с января 2004 г.

2014



Волгоград
2014

УДК 881.3

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.

Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»
президент 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 физ.-мат. наук, профессор ВолгГТУ *Е. С. Брискин*
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 АИСИ *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.
№ 12(139) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2014. – 172 с. (Серия «Актуальные проблемы
управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 21).
ISBN 978–5–9948–1550–2

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, робототехника.

Ил. 91. Табл. 35. Библиогр.: 323 назв.

ISBN 978–5–9948–1550–2

© Волгоградский государственный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

<i>Андреев А. Е., Егунов В. А., Насонов А. А., Новокичёнов А. А.</i> Применение векторных инструкций в алгоритмах блочных операций линейной алгебры.....	5
<i>Андреев А. Е., Куц Д. В., Насонов А. А.</i> Реализация динамической балансировки нагрузки между ЦПУ и сопроцессорами архитектуры Intel MIC в пакете молекулярного моделирования CP2K.....	11
<i>Голованчиков А. Б., Кидалов Н. А., Князева А. С.</i> Корреляционный анализ линеаризованного реологического уравнения для водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента (УЩР).....	16
<i>Заводовский В. Б., Кириносенко С. И.</i> Применение гибридных вычислительных систем для операций с большими числами.....	19
<i>Завьялов Д. В., Коржова С. А., Красников А. А.</i> Оптимизация алгоритма определения старшего показателя Ляпунова с использованием технологии OPENCL.....	22
<i>Элькин П. М., Гречухина О. Н., Кочергина Д. Д., Лихтер А. М.</i> Структурно-динамические модели и спектроскопическая идентификация таутомеров 5-карбоксцитозина в конденсированном состоянии.....	26
<i>Эрман Е. А., Алыкова О. М., Джалмухамбетова Е. А., Коломин В. И., Стефанова Г. П.</i> Структурно-динамические модели и спектральная идентификация димеров урацил-цитозин.....	31
<i>Эрман Е. А., Смирнов В. В., Джалмухамбетова Е. А., Алыкова О. М., Стефанова Г. П., Крутова И. А.</i> Моделирование структуры и спектров нитроурацилов в конденсированном состоянии.....	38

Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Аверченков В. И., Гулаков В. К., Трубаков А. О., Трубаков Е. О., Матюшин В. Н.</i> Анализ и некоторая классификация методов доступа к данным.....	44
<i>Брумштейн Ю. М.</i> Интеллектуальные ресурсы региона: системный анализ компонентной структуры, подходов к оценкам, моделей динамики.....	52
<i>Бурлаков М. Е.</i> Выделение верхнего и нижнего пределов энергии при распознавании объектов нейронной сетью с механизмом реакции на последовательности.....	58
<i>Королева И. Ю., Сорокина А. Д.</i> Применение фильтров при реализации экранной лупы.....	60
<i>Кручинин С. В.</i> САПР и АСУ телекоммуникационных систем: взаимосвязь и взаимодействие.....	65

Часть III. УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<i>Аникин А. В., Дворянкин А. М.</i> Алгоритмы и вывод на онтологиях для поиска и интеграции образовательных ресурсов в открытых образовательных сетях.....	70
<i>Аникин А. В., Жукова И. Г.</i> Онтологическая модель представления знаний для поиска и интеграции образовательных ресурсов в открытых образовательных сетях.....	74

<i>Астафурова О. А., Сальникова Н. А.</i> Моделирование системы управления муниципальными финансами.....	80
<i>Конкин Е. Е., Литовкин Д. В., Ляпина О. Н.</i> Формирование требований к представлению учебных планов кафедры ПОАС.....	83
<i>Навроцкий М. А., Жукова И. Г., Дергачева М. Ю.</i> Интеллектуальная поддержка принятия решений в области управления персоналом на основе онтологической модели представления знаний и рассуждений по прецедентам.....	91
<i>Синицын А. А., Литовкин Д. В.</i> Разработка моделей и алгоритмов для создания тестов с различными методами адаптации в СДО MOODLE.....	98
<i>Ушаков А. Ф., Ляпина О. Н.</i> Создание концепции веб-сайта профилирующей кафедры ВУЗа.....	104
<i>Ушаков А. Ф., Литовкин Д. В.</i> Определение информационного наполнения и системы организации веб-сайта кафедры ПОАС.....	107
 Часть IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	
<i>Воробьева В. А., Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Колесников С. Г.</i> Обзор методов оценки оптимальности синтезируемых структур физического принципа действия технических систем.....	112
<i>Воронин Ю. Ф., Матюхина А. В., Сикорский Е. О., Розудеев А. Б.</i> Автоматизированная система диагностики и ликвидации литейных дефектов.....	116
<i>Дворянkin А. М., Романенко Р. Р.</i> Генерация прототипа пользовательского интерфейса с применением методов ТРИЗ.....	121
<i>Карачунова Г. А., Фоменков С. А., Гопта Е. А., Коробкин Д. М.</i> Автоматизированная система синтеза физических принципов действия «Сапфит 2».....	124
 Часть V. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ	
<i>Андреев А. Е., Красников А. А., Коржова С. А.</i> Применение OpenCL для шифрования изображений на базе кватернионов в неоднородных вычислительных системах.....	129
<i>Гаевой С. В., Аль-Хадша Ф. А. Х., Фоменков С. А.</i> Аппроксимация времени выполнения заданий на примере вычислительного кластера LPC EGEE 2004.....	135
<i>Толстов А. С., Пантюхов Д. В., Гудиков А. Л.</i> Синтез схем надежности систем с резервированием на основе использования алгоритмов оптимизации в комплексах ТСО охраняемых объектов.....	141
 Часть VI. РОБОТОТЕХНИКА	
<i>Большаков А. А., Глазков В. П., Кулик А. А.</i> Повышение эффективности управления движением полуавтоматических и автоматических протезируемых систем опорно-двигательного аппарата человека.....	146
<i>Гаврилов А. Е., Данишин А. С., Бурханов А. А.</i> Автономная роботизированная шагающая платформа для мониторинга окружающей среды.....	153
<i>Жога В. В., Аниськов Р. В., Меркулов А. А., Скакунов В. Н.</i> Система управления электроприводом шагающего робота с ортогональными движителями.....	157
<i>Малолетов А. В., Брискин Е. С.</i> Управление цикловым шагающим движителем на основе шарнирного четырехзвенника с изменяемой длиной коромысла.....	163
К сведению авторов.....	171

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 004.021

А. Е. Андреев, В. А. Егуннов, А. А. Насонов, А. А. Новокищонов

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ ИНСТРУКЦИЙ В АЛГОРИТМАХ БЛОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ ЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ

Волгоградский государственный технический университет

andan2005@yandex.ru, vegunov@mail.ru, shady__@mail.ru, tommy.fevt@gmail.com

В статье рассматривается оптимизация блочных алгоритмов линейной алгебры и алгоритмов решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Используются векторные инструкции SSE и AVX процессоров общего назначения, а также инструкции Intel MIC SIMD сопроцессора Intel Xeon PHI. Разработка алгоритмов проводилась на языке C++, тестирование проводилось на компиляторах MSVC, Intel C++ compiler, G++.

Ключевые слова: SSE, AVX, Intel MIC, Xeon PHI, СЛАУ, векторизация, интринсики, линейная алгебра, SIMD.

A. E. Andreev, V. A. Egunov, A. A. Nasonov, A. A. Novokshchonov

APPLICATION OF VECTOR INSTRUCTIONS IN ALGORITHMS OF BLOCK OPERATIONS OF THE LINEAR ALGEBRA

Volgograd State Technical University

In article, optimization of block algorithms of the linear algebra and algorithms of the decision of linear equation systems is considered. Vector instructions of SSE and AVX of general-purpose processors, and also the instructions of Intel MIC SIMD of the Intel Xeon PHI coprocessor are used. Development of algorithms carried out in the language of C++, testing was held on the compilers MSVC, Intel C++ compiler, G++.

Keywords: SSE, AVX, Intel MIC, Xeon PHI, System of linear equations, vectorization, intrinsics, the linear algebra, SIMD.

Введение

В настоящее время на практике часто возникают задачи, в которых для нахождения решения используются различные алгоритмы линейной алгебры. Значительная часть численных методов решения линейных и нелинейных задач включает в себя решение систем линейных уравнений как элементарный шаг соответствующего алгоритма. Развитие вычислительной техники позволило перейти от простых моделей к более сложным, в виде дифференциальных уравнений в частных производных и их дискретным аналогам на сетках. Этот переход привел к необходимости решения больших разреженных систем линейных алгебраических уравнений с матрицами нерегулярной структуры. Возникающие на практике системы часто являются разреженными, т. е. содержат большое количество нулевых элементов, а также имеют большое количество неизвестных. Поэтому для их решения требуются значительные

технические ресурсы, ведь на вычисления уходит довольно продолжительное время.

С другой стороны, микропроцессоры развиваются в сторону большого количества параллельных вычислений. То есть конвейеризация, суперскалярность, векторные операции – все это уровни параллелизма, когда мы пытаемся одновременно выполнять несколько арифметических и логических операций. Векторизацию также можно считать технологией одновременного выполнения инструкций. Обычно ее называют «параллелизмом данных» и подразумевают замену последовательно выполняемых скалярных операций операциями над множеством данных.

Все это приводит к необходимости модификации известных алгоритмов с целью повышения их производительности. Внедрение векторных инструкций в алгоритмы позволит сократить затраты на вычисления. Благодаря этим средствам можно получить более эффективный алгоритм (по критерию времени выполнения) [3].

Сейчас практически во всех микропроцессорах общего назначения присутствуют наборы коротких векторных инструкций. Это важное архитектурное нововведение последних десятилетий, которое позволяет значительно увеличить производительность процессора на мультимедийных и вычислительных задачах, в которых присутствует параллелизм на уровне данных. Наиболее распространенными методами введения векторных инструкций в код программы являются автоматическая векторизация компилятором, использование ассемблерных вставок или вызовов специальных библиотечных функций (интринсиков). Оно наиболее эффективно с точки зрения производительности конечного кода, однако, приводит к увеличению сложности разработки.

Упрощенная схема векторизации заключается в заполнении векторных регистров, выполнении над ними некой векторной операции, получении векторного результата. После чего этот векторный результат необходимо расформировать и записать уже в те ячейки памяти, в которых он должен находиться. Типичная векторная инструкция представляет собой операцию над двумя векторами в памяти или в регистрах фиксированной длины. Данные векторные регистры могут быть загружены из памяти либо за одну операцию, либо по частям.

Векторные инструкции

В данной работе используется векторизация алгоритмов с помощью таких технологий, как SSE и AVX процессоров общего назначения, а также Intel MIC сопроцессора Intel Xeon Phi. Их основные отличия – это размер векторных регистров и набор векторных команд (инструкций).

Технология SSE (Streaming SIMD Extensi-

ons) впервые появилась в Pentium III. В микропроцессор были добавлены 8 128-битных регистров (XMM0-XMM7) и 70 новых инструкций, в том числе для работы с вещественными числами. Тем не менее, хотя изначально каждый регистр трактуется как два значения с плавающей точкой двойной точности (2×64 -бит), операции могут применяться практически ко всем типам, «помещающимся» в 16 байт. Это означает, что появляется возможность одновременно сложить или умножить с помощью всего одной инструкции, например, два операнда из четырех чисел с плавающей точкой одинарной точности, двух – с двойной, двух 64-битных целочисленных, 16 8-битных целочисленных.

Advanced Vector Extensions (AVX) – расширение системы команд x86 для микропроцессоров Intel и AMD, предложенное Intel в марте 2008. Ширина векторных регистров SIMD увеличивается со 128 (XMM) до 256 бит (регистры YMM0-YMM15). Существующие 128-битные SSE инструкции будут использовать младшую половину новых YMM регистров, не изменяя старшую часть. Для работы с YMM регистрами добавлены новые 256-битные AVX инструкции. Набор инструкций AVX содержит в себе аналоги 128-битных SSE инструкций для вещественных чисел. При этом, в отличие от оригиналов, сохранение 128-битного результата будет обнулять старшую половину YMM регистра. 128-битные AVX инструкции сохраняют прочие преимущества AVX, такие как новая схема кодирования, трехоперандный синтаксис и невыровненный доступ к памяти. В связи с увеличением размеров регистров с помощью всего одной инструкции можно умножить два операнда из восьми чисел с плавающей точкой одинарной точности, четырех – с двойной.

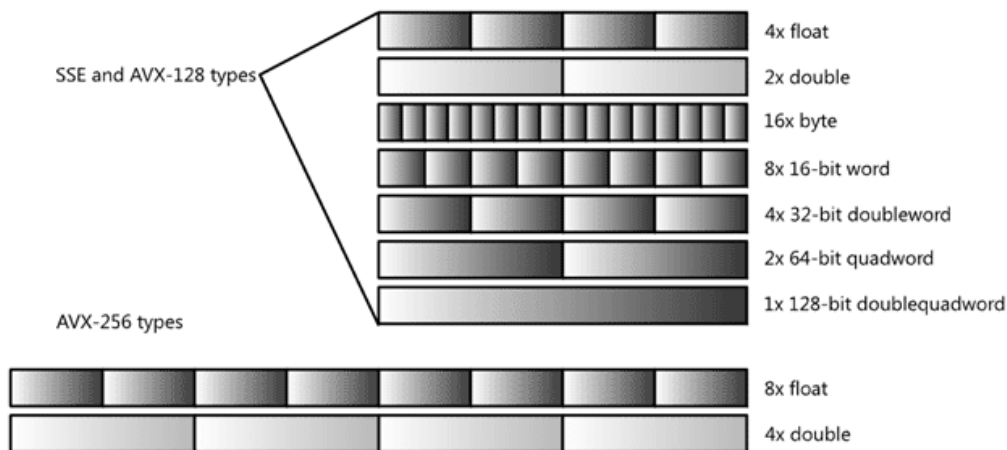


Рис. 1. Типы данных в регистрах

Intel MIC SIMD – набор векторных инструкций, доступных в сопроцессоре Intel Xeon PHI. Данная технология позволяет использовать 512-битные регистры.

Разрабатываемые алгоритмы

В данной работе разрабатываются алгоритмы умножения, транспонирования и обращения матриц. Эти операции используются для решения больших разреженных СЛАУ. Элементами разреженных матриц могут быть не только числа, но и маленькие блоки (матрицы). Вместо умножения числа на число можно получить умножение матрицы на матрицу. Таким образом, в алгоритме решения СЛАУ необходимо использовать алгоритмы для мелких матриц и векторов [2]. Размеры этих мелких матриц могут зависеть от конкретного типа задачи. Для решения СЛАУ большой размерности эти «микроалгоритмы» умножения мелких матриц могут вызываться большое количество раз. Оптимизируя эти микроалгоритмы, мы повышаем эффективность всего алгоритма. Так, для разных размеров мелких блоков и разных типов данных удобно использовать разные векторные регистры и инструкции. Оптимальный результат получается при помещении одной строки матрицы в один векторный регистр. В других случаях приходится использовать дополнительные функции перемешивания, горизонтального сложения и т. п. При размерах блока, не кратных степени 2, не-

обходимо дополнять матрицы до нужного размера незначащими нулями.

Алгоритмы умножения

При умножении матриц используются блочные операции AXPY и DOT. AXPY – операция 1-го уровня в базовых подпрограммах линейной алгебры (BLAS), представляет собой комбинацию скалярного умножения и сложения векторов

$$Y = \alpha * X + Y, \quad (1)$$

где α является скаляром, X и Y – векторами.

Блочная операция AXPY представляет собой прямое обобщение точечной операции AXPY [2]:

$$Y += X * A, \quad (2)$$

где A вместо скаляра в точечной версии представляет собой квадратную матрицу размера $N \times N$, а прямоугольные матрицы X и Y имеют размерность $M \times N$, где M – количество строк в матрицах; N – количество столбцов.

Блочная DOT аналогична AXPY за исключением предварительного транспонирования матрицы A .

Рассмотрим пример умножения мелких матриц размера 8×8 с числами одинарной точности (float). В исходной реализации он представляет собой обычное умножение в цикле:

```
int i, j, k;
for (k=0; k<8; k++)
    for (j=0; j<8; j++)
        for (i=0; i<8; i++)
            _cmatr[j*8+k] += (_amatr[i*8+j] * _bmatr[i*8+k]);
```

Здесь `_cmatr` – результирующая матрица, `_amatr`, `_bmatr` – перемножаемые матрицы.

В данном случае хорошо оптимизировать код, используя интринсики AVX. Алгоритм можно представить в таком виде:

```
int i, j;
__m256 a, b, c, d, ymm2[8];
for(i = 0; i < 8; i++)
{
    ymm2[i] = _mm256_load_ps(_bmatr+i*8);
}
for(j = 0; j < 8; j++)
{
    c = _mm256_load_ps(_cmatr+j*8);
    for(i = 0; i < 8; i+=2)
    {
        a = _mm256_broadcast_ss(_amatr+i*8+j);
        b = _mm256_broadcast_ss(_amatr+(i+1)*8+j);
        d = _mm256_add_ps(_mm256_mul_ps(a, ymm2[i]), _mm256_mul_ps(b, ymm2[i+1]));
        c = _mm256_add_ps(c, d);
    }
    _mm256_store_ps(_cmatr+j*8, c);
}
```

Такая реализация заметно повышает производительность алгоритма. Протестировав алгоритмы на разных размерностях, типах данных и

компиляторах, мы получили следующие результаты (табл. 1 и 2). Здесь и далее в таблицах сравнивается время выполнения алгоритма (t).

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритмов умножения на процессоре общего назначения

Умножение матриц			t, c (float)				t, c (double)			
			windows vs2010 x64	windows intel 14.0 x64	linux intel 14.0	linux gcc 4.7.0-mavx	windows vs2010 x64	windows intel 14.0 x64	linux intel 14.0	linux gcc 4.7.0-mavx
8x8	OLD	/O2	9,37	13,46	13,53	14,45	10,62	10,99	11,03	13,24
	SSE	/O2	4,73	2,68	2,59	4,73	6,19	6,35	6,27	5,54
	AVX	/O2	2,04	1,50	1,47	1,92	5,63	4,92	4,20	5,93
16x16	OLD	/O2	50,88	49,86	48,93	68,94	58,99	41,90	44,55	73,19
	SSE	/O2	22,06	11,20	11,09	21,88	29,36	29,93	29,59	27,35
	AVX	/O2	9,27	6,75	6,80	9,24	25,04	15,86	17,19	27,26

Таблица 2

Результаты тестирования алгоритмов умножения на сопроцессоре Intel Xeon Phi

Умножение матриц			t, c (float)	t, c (double)
Size	Opt	Key	linux intel 14.0	linux intel 14.0
8x8	OLD	/O2	15,47	24,79
	PHI	/O2	1,85	2,61
16x16	OLD	/O2	64,47	91,63
	PHI	/O2	3,35	9,16

Алгоритмы транспонирования

Здесь рассматривается транспонирование длинных матриц, количество строк в которых много больше количества столбцов.

Рассмотрим случай транспонирования матрицы из двух строк и $_m$ столбцов ($_m \gg 2$). Элементы матрицы имеют тип double.

Очевидная реализация выглядит таким образом:

```
int i, j;
for (i=0; i<2; i++)
{
    for (j=0; j<_m; j++)
    {
        _ahmatr[i*_m+j] = _amatr[j*2+i];
    }
}
```

Используя регистры и инструкции Intel MIC, алгоритм можно модифицировать:

```
int ost=_m%8;
lint64 c=_m/8;
__m512d a[2], tmp[2];
double *_ahmatr1=_ahmatr;
double *_ahmatr2=_ahmatr+_m;
for (int h=0; h<c; h++)
{
    for (int i=0; i<2; i++)
    {
        a[i] = _mm512_loadunpacklo_pd(a[i], _amatr+h*8*2+8*i);
```



```

    a[i] = _mm512_loadunpackhi_pd(a[i], _amatr+h*8*2+8*i+8);
}
_mm512_mask_packstorelo_pd(_ahmatr1+h*8, 0x55, a[0]);
_mm512_mask_packstorehi_pd(_ahmatr1+h*8+8, 0x55, a[0]);
_mm512_mask_packstorelo_pd(_ahmatr1+h*8+4, 0x55, a[1]);
_mm512_mask_packstorehi_pd(_ahmatr1+h*8+8+4, 0x55, a[1]);
_mm512_mask_packstorelo_pd(_ahmatr2+h*8, 0xAA, a[0]);
_mm512_mask_packstorehi_pd(_ahmatr2+h*8+8, 0xAA, a[0]);
_mm512_mask_packstorelo_pd(_ahmatr2+h*8+4, 0xAA, a[1]);
_mm512_mask_packstorehi_pd(_ahmatr2+h*8+8+4, 0xAA, a[1]);
}
for (int h=0;h<ost;h++)
{
    for (int j=0;j<2;j++)
    {
        _ahmatr[8*c+h*j*_m] = _amatr[h*2+j+8*2*c];
    }
}

```

Словесно данный алгоритм можно описать следующим образом. Мы разбиваем нашу большую матрицу на небольшие участки, удобно помещающиеся в векторные регистры. Загружаем данные в регистры, выгружаем с маской по новым адресам. Маленький остаток транспонируем в цикле.

Для других размерностей удобно использовать различные перемешивания внутри регистров. Например, рассмотрим алгоритм AVX для матрицы из 8 строк и $_m$ столбцов ($_m \gg 8$). Элементы матрицы имеют тип float.

1. Разбиваем прямоугольную матрицу на мелкие блоки размера 8x8, каждый из которых транспонируем отдельно.

2. Для каждого блока:

2.1. Загружаем в 8 YMM регистра 8 строки блока.

2.2. Перемешиваем между собой 1-й регистр со 2-м, 3-й с 4-м, 5-й с 6-м, 7-й с 8-м, чтобы полу-

чить регистры с младшими и старшими частями исходных регистров (0 1 2 3 4 5 6 7, 8 9 10 11 12 13 14 15 $\rightarrow$ 0 8 1 9 4 12 5 13, 2 10 3 11 6 14 7 15).

2.3. Повторяем пункт 2.2 три раза.

2.4. Меняем местами младшую и старшую часть одного регистра.

2.5. Склеиваем первый и второй регистр (их младшие и старшие части).

2.6. Меняем местами младшую и старшую часть второго регистра.

2.7. Повторяем пункты 2.4–2.6 четыре раза (для каждой пары регистров).

2.8. Выгружаем все регистры по необходимым адресам.

2.9. Если прямоугольная матрица не делится поровну на блоки 8x8, остаток считается обычным образом (в цикле).

Такие подходы дают ускорение в 2–3 раза. Результаты тестирования разработанных алгоритмов приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Результаты тестирования алгоритмов транспонирования на процессоре общего назначения

Транспонирование матриц			t, c (float)				t, c (double)			
			windows vs2010 x64	windows intel 14.0 x64	linux intel 14.0	linux gcc 4.7.0-mavx	windows vs2010 x64	windows intel 14.0 x64	linux intel 14.0	linux gcc 4.7.0-mavx
Size	Opt	Key								
8	OLD	/O2	13,57	14,13	13,89	13,62	28,10	28,02	27,10	27,07
	SSE	/O2	8,02	11,21	9,58	7,42	16,88	19,73	18,09	16,81
	AVX	/O2	7,44	7,86	7,39	7,67	16,58	22,01	19,59	15,54
16	OLD	/O2	45,53	44,65	43,68	44,14	66,51	66,55	58,00	58,62
	SSE	/O2	16,98	22,26	19,26	14,57	27,94	40,72	33,38	28,01
	AVX	/O2	17,02	26,04	21,63	17,25	32,37	38,43	39,04	32,68

Таблица 4

Результаты тестирования алгоритмов транспонирования на сопроцессоре Intel Xeon Phi

Транспонирование матриц			t, c (float)	t, c (double)
Size	Opt	Key	linux intel 14.0	linux intel 14.0
2	OLD	/O2	1,37	2,72
	PHI	/O2	0,47	0,95
4	OLD	/O2	4,48	8,84
	PHI	/O2	2,15	4,20
8	OLD	/O2	16,70	33,60
	PHI	/O2	5,21	8,48
16	OLD	/O2	65,91	130,00
	PHI	/O2	12,18	47,51

Алгоритмы обращения матриц

Рассматривается алгоритм обращения квадратной верхней треугольной матрицы `_value`

```

int i, j, k;
for (j=0; j<N; j++)
  for (i=0; i<N; i++)
    _invvalue[i+j*N] = 0;
for (i=0; i<N; i++)
  _invvalue[i+i*N] = 1;
for (j=0; j<N; j++)
{
  _invvalue[j+j*N] = 1 / _value[j+j*N];
  for (i=j-1; i>=0; i--)
  {
    for (k=0; k<j-i; k++)
      _invvalue[i+j*N] -= _value[i+(j-k)*N]*_invvalue[j-k+j*N];
    _invvalue[i+j*N] *= _invvalue[i+i*N];
  }
}

```

Алгоритм для SSE double выглядит следующим образом:

1. Находим диагональные элементы и группируем их по парам.
2. Делим элементы для нахождения по парам, в зависимости от необходимого количества слагаемых для их нахождения.

размера $N \times N$, хранящейся по столбцам, $N = \{4, 8, 16\}$ [4].

В качестве простейшей реализации данной операции можно привести следующий код:

3. Загружаем из исходной матрицы и комбинируем необходимые значения для нахождения обратных значений.

4. Выгружаем полученные значения в адреса результирующей матрицы.

Полученное ускорение можно наблюдать в следующих таблицах.

Таблица 5

Результаты тестирования алгоритмов обращения на процессоре общего назначения

Обращение матриц			t, c (float)				t, c (double)			
			windows vs2010 x64	windows intel 14.0 x64	linux intel 14.0	linux gcc 4.7.0-mavx	windows vs2010 x64	windows intel 14.0 x64	linux intel 14.0	linux gcc 4.7.0-mavx
8x8	OLD	/O2	22,54	25,65	25,22	19,24	25,26	27,30	26,62	23,46
	SSE	/O2	9,19	8,82	9,53	9,04	13,38	13,73	13,10	12,52
	AVX	/O2	22,66	22,47	21,20	22,95	28,82	28,39	24,49	29,48
16x16	OLD	/O2	11,70	13,64	12,97	11,41	15,65	16,40	17,36	12,62
	SSE	/O2	5,72	4,83	4,69	4,77	9,67	9,03	8,47	9,11
	AVX	/O2	9,46	9,01	7,97	8,70	12,35	13,87	12,50	12,96

Таблица 6

Результаты тестирования алгоритмов обращения на сопроцессоре Intel Xeon Phi

Обращение матриц			t, c (float)	t, c (double)
Size	Opt	Key	linux intel 14.0	linux intel 14.0
4x4	OLD	/O2	3,67	5,86
	PHI	/O2	2,10	3,92
8x8	OLD	/O2	3,94	4,61
	PHI	/O2	0,94	1,77
16x16	OLD	/O2	2,69	3,03
	PHI	/O2	0,71	1,24

Выводы

В итоге были разработаны векторные алгоритмы блочных операций аддитивного умножения, транспонирования и обращения матриц. Результаты были протестированы на разных типах данных, разных размерностях и разных компиляторах. Полученные данные показали, что используя векторные инструкции в этих вычислительных алгоритмах, можно получить заметное ускорение времени выполнения по сравнению с исходными алгоритмами.

Работа была выполнена по заказу инженеринговой компании ООО «ТЕСИС». Результаты исследования планируется использовать в алгоритмах решения СЛАУ программного комплекса FlowVision [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method [Text] / Aksenov A., Dyad-

kin A., Pokhilko V. // Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol 377-1, 1998.

2. Коньшин, И. Н. Трехуровневая MPI+TBB+CUDA параллельная реализация блочного итерационного алгоритма решения СЛАУ для мелкоблочных неструктурированных разреженных матриц / И. Н. Коньшин, Г. Б. Сушко, С. А. Харченко // Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений» (17–22 сентября 2012 г., г. Новороссийск). – 2012. – С. 522–528.

3. Новокщёнов, А. А. Block implementation of algorithms for solving sparse systems of linear equations with the high-performance computing tools / А. А. Новокщёнов, А. А. Насонов, В. А. Егунов // Innovation Information Technologie : mater. of the 3rd Int. scien.-pract. conf. (Prague, April 21–25, 2014). Part 2 / МИЭМ ВШЭ, Рос. центр науки и культуры в Праге. – М., 2014. – С. 81–83.

4. Андреев, А. Е. Прогнозирование производительности при реализации алгоритмов на гибридных архитектурах с сопроцессорами [Электронный ресурс] / А. Е. Андреев, И. М. Силкин, Ю. В. Шафран // Современные проблемы науки и образования : электрон. журнал. – 2012. – № 3. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/103-6389>.

УДК 004.021

А. Е. Андреев, Д. В. Куц, А. А. Насонов

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ЦПУ И СОПРОЦЕССОРАМИ АРХИТЕКТУРЫ INTEL MIC В ПАКЕТЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ CP2K

Волгоградский государственный технический университет

andan2005@yandex.ru, degeron@gmail.com, shady__@mail.ru

В статье рассматривается реализация алгоритма динамической балансировки нагрузки между сопроцессором и центральным процессорным устройством (ЦПУ) в библиотеке матричных вычислений из пакета молекулярного моделирования CP2K. Разработка алгоритма производилась на языке Fortran, тестирование проводилось на многоядерной системе с несколькими сопроцессорами. Был проведен анализ производительности реализации алгоритма и измерена производительность библиотеки.

Ключевые слова: Intel MIC, Xeon PHI, CP2K, алгоритм Кэнона.

A. E. Andreev, D. V. Kuts, A. A. Nasonov

IMPLEMENTATION OF DYNAMIC BALANCE ALGORITHM BETWEEN CPU AND INTEL'S MIC COPROCESSOR IN MOLECULAR MODELING PACKAGE CP2K

Volgograd State Technical University

In article, implementation of dynamic balancing and work-sharing between CPU and coprocessor algorithm of the matrix calculations from molecular modeling package CP2K is considered. Vector instructions of SSE and AVX of general-purpose processors, and also the instructions of Intel MIC SIMD of the Intel Xeon PHI coprocessor are used. Development of algorithms carried out in the language of Fortran, testing was held on multicore system with 2 coprocessors. Analyzed the performance of the algorithm implementation and measured the performance of the library.

Keywords: Intel MIC, Xeon PHI, CP2K, Cannon algorithm.

Введение

В настоящее время можно наблюдать тенденцию к увеличению вычислительных ядер в современных микропроцессорах. «Война мегагерц» закончилась, технологии вплотную приблизились к физическим пределам частоты работы процессоров [1]. В настоящее время, пожалуй, самым распространенным способом увеличения производительности программ является распараллеливание. Еще в 2005 году Герб Саттер сравнивал по значимости переход к параллельному программированию с разработкой и внедрением принципов ООП [2].

Помимо разработки центральных процессоров со все большим количеством ядер многие крупные компании предоставляют специализированные сопроцессоры, содержащие большое количество простых ядер. Примером могут служить графические ускорители (ГПУ) – видеокарты с несколькими сотнями вычислительных ядер, годных не только для обработки изображений, но и для матричных вычислений, которые используются во многих высокопроизводительных задачах и которыми оборудованы современные вычислительные кластеры [3].

Компания Intel не осталась в стороне и в 2010 году анонсировала архитектуру MIC (Many Integrated Cores). В 2013 году был выпущен сопроцессор под кодовым названием «Knights Corner», представляющий из себя плату расширения формата PCI-e. В основе архитектуры Intel MIC лежит классическая архитектура x86, на ускорителе выполняется операционная система Linux. Для программирования MIC предполагается использовать стандарты OpenMP, OpenCL и специализированные компиляторы Intel Fortran, Intel C++.

Существуют несколько вариантов работы сопроцессора. Он может использоваться как отдельный вычислительный узел, на котором можно производить вычисления [4], а также как периферийное устройство, подобно технологии Nvidia CUDA. В последнем случае компания Intel предоставляет собственные компиляторы, работающие с расширениями языков, позволяющими с помощью специальных директив указывать, какие вычисления необходимо перенести на сопроцессор.

Архитектура Intel MIC унаследовала набор команд x86, включает 512-битные векторные арифметико-логические устройств (до 16 операций над float или до 8 операций над double в инструкции), когерентный кеш L2 размером

512 КБ на ядро, и сверхширокую кольцевую шину для связи ядер и контроллера памяти [5].

Оптимизация существующего кода для использования сопроцессора сопряжена с некоторыми трудностями. В данной статье описывается процесс оптимизации исходного кода CP2K – пакета атомарного и молекулярного моделирования в твердых телах, жидкостях, молекулярных и биологических средах. Данный пакет имеет открытый исходный код, что позволяет легко модифицировать его.

Исходный алгоритм

Пакет CP2K написан на языке Fortran-95 и широко использует технологии OpenMP и MPI. Профилирование приложения показало, что большую часть времени (около 60 %) занимает работа библиотеки DBCSR. Данная библиотека предназначена для умножения больших разреженных матриц. Части этих матриц рассылаются процессам посредством технологии MPI, а каждый из этих процессов выполняет умножение. Внутри библиотеки реализован рекурсивный алгоритм Кэннона, предназначенный для умножения разреженных матриц. На первом шаге алгоритма формируется так называемый стек – список записей, в которых указаны индексы непустых блоков матриц, которые надо перемножить. На втором этапе идет обработка стека и перемножение подматриц.

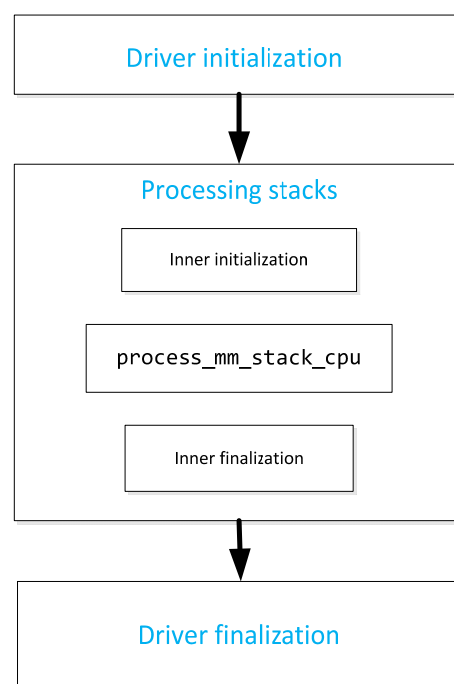


Рис. 1. Фрагмент алгоритма из библиотеки DBCSR, отвечающий за обработку стеков на сопроцессорах

В 2011 году Джеем Четти из Эдинбургского Университета была проведена работа по оптимизации данного пакета для использования сопроцессоров архитектуры NVidia CUDA, поэтому в коде уже есть секции инициализации и деинициализации сопроцессора [6]. Схематично фрагмент алгоритма, отвечающий за обработку стеков на сопроцессоре, представлен на рис. 1.

Первый вариант алгоритма

Для ускорения работы библиотеки было решено задействовать в расчетах сопроцессор Xeon Phi. Первым шагом был перенос всех вычислений

на сопроцессор, но прирост скорости работы приложения был минимальным, несмотря на то, что производительность Xeon Phi составляет порядка 1 TFlop, а ЦПУ – 0,4 TFlop. Это объясняется тем, что загрузка и выгрузка матриц на сопроцессор по шине PCI-express занимает существенное время, превышающее время расчетов.

Поскольку во время перемножения матриц их значения не меняются, а записи в стеках не пересекаются, было решено реализовать алгоритм, включающий в себя балансировку нагрузки между сопроцессором и ЦПУ. Схематично основная часть алгоритма показана на рис. 2.

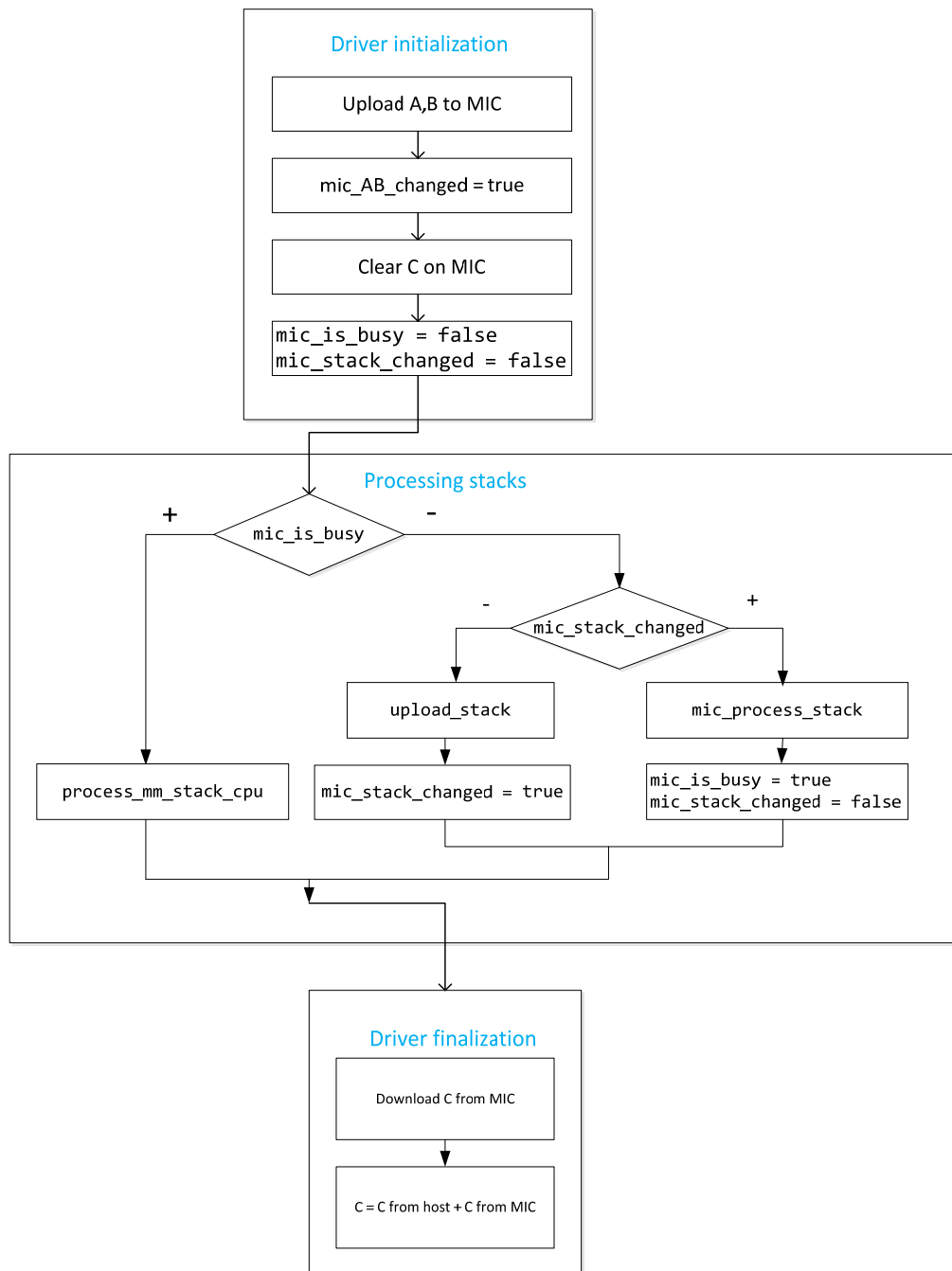


Рис. 2. Первый вариант алгоритма совместной обработки стеков

На этапе инициализации драйвера на сопроцессор загружаются матрицы A и B. В этот момент ЦПУ начинает обсчет стеков. Как только матрицы загружены на Xeon Phi, часть стеков загружается на сопроцессор и начинается их обсчет уже там (`mic_process_stack`). В этот момент ЦПУ обсчитывает оставшиеся стеки (`process_mm_stack_cpu`). Сброс флага занятости сопроцессора (`mic_is_busy`) происходит в функциях `upload_stack` и `mic_process_stack` в сопроцессоре. Этот процесс (блок Processing Stacks) итеративный и прекращается в тот момент, когда стеки заканчиваются. После этого с сопроцессора загружается матрица C, хранящая в себе результа-

ты обработки загруженных стеков и объединяется с матрицей C, полученной на хосте.

Второй вариант алгоритма

Анализ и профилирование полученного алгоритма показали, что в момент деинициализации драйвера основная система впустую тратит время на ожидание матрицы C, полученной на сопроцессоре. Для использования данного времени в процесс деинициализации был добавлен обсчет заранее сохраненных стеков. Это позволило сократить накладные расходы, связанные с низкой пропускной способностью шины PCI-express. Схематически алгоритм приведен на рис. 3.

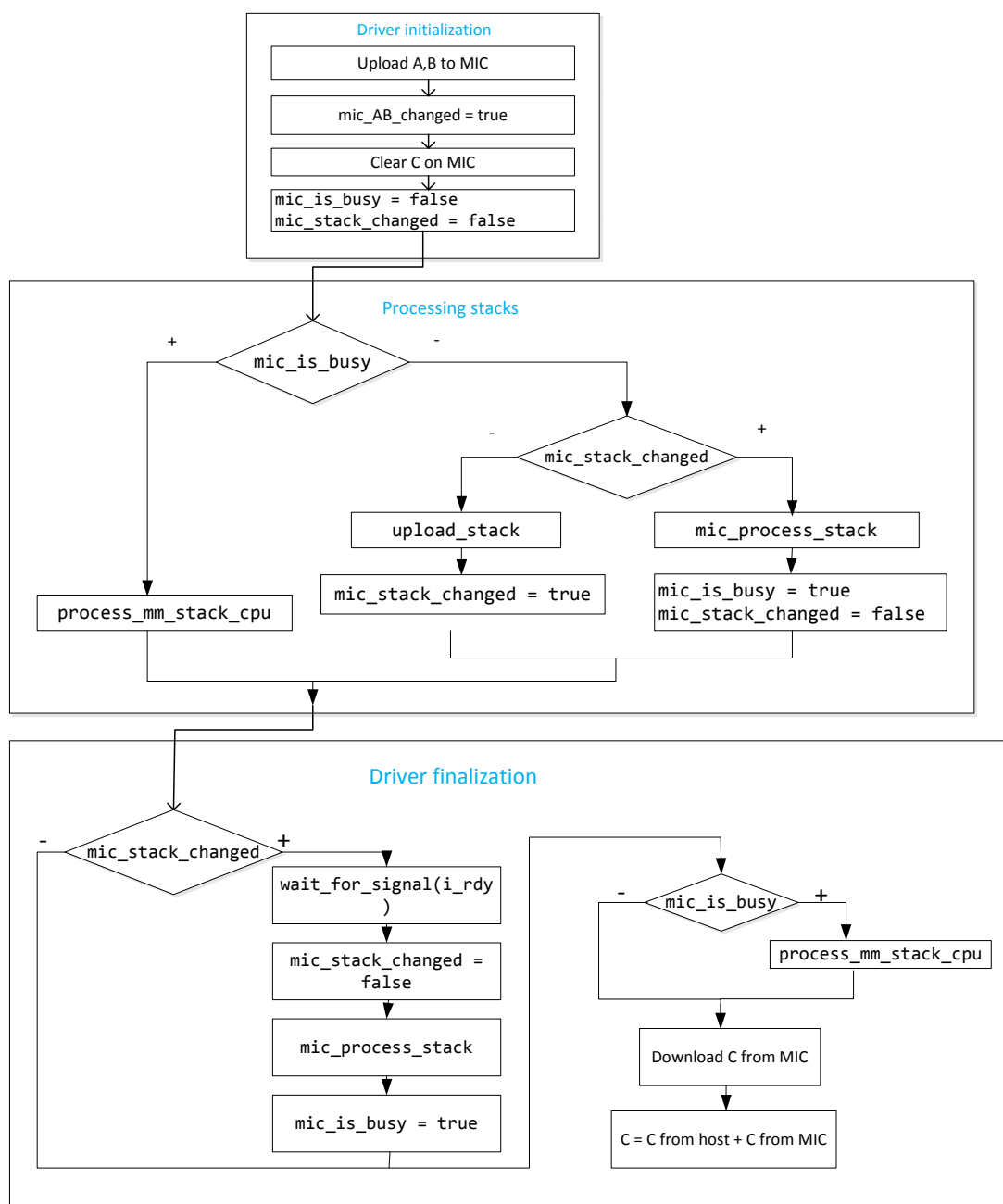


Рис. 3. Второй вариант алгоритма балансировки нагрузки при совместной обработке стеков

Модифицированный алгоритм позволил лучше задействовать сопроцессор, удалось убрать часть накладных расходов, связанных с передачей данных на сопроцессор и выгрузке с него путем сохранения нескольких стеков до начала расчетов (что намного быстрее).

Для тестирования программной реализации алгоритма была использована двухsocketная платформа с двумя процессорами Xeon E5-2697 (12 физических ядер) и двумя сопроцессорами Intel Xeon Phi 7110. Результаты измерений производительности программной реализации модифицированного алгоритма показаны в табл. 1.

Таблица 1

Производительность системы при реализации оригинального и разработанного алгоритмов

Количество процессоров	Производительность системы без сопроцессора, Mflops	Производительность системы с сопроцессором, Mflops	Ускорение
1	8305	14399	1,733775
8	61768	91328	1,478565
16	124048	147376	1,188056
24	159408	179208	1,12421

Как видно на приведенных в табл. 1 данных, ускорение реализованного алгоритма

снижается при повышении количества одновременно работающих процессов. Это связано, в первую очередь, с низкой пропускной способностью шины PCI-express. Процессы одновременно пытаются загрузить/выгрузить результаты с сопроцессора, из-за чего и падает производительность. Фактически, за то время, пока данные для одного стека передаются на сопроцессор, ЦПУ успевает посчитать несколько стеков. Отношение количества стеков, обработанных на ЦПУ, к количеству стеков, обработанных на сопроцессоре, приведено в табл. 2.

Таблица 2

Количество стеков, обработанных на ЦПУ и сопроцессоре

Количество процессов	Количество стеков, обработанных ЦПУ	Количество стеков, обработанных на сопроцессоре
1	1026	1040
8	952	1136
16	864	1232
24	600	1776

На рис. 4 показано время работы исходной и модифицированной версий библиотеки.

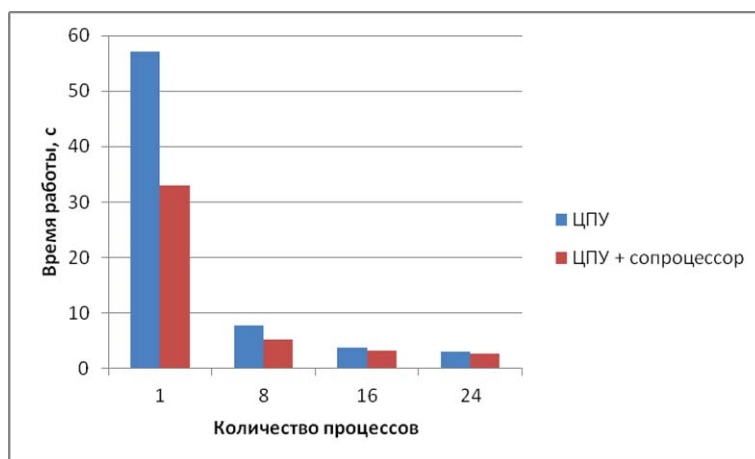


Рис. 4. Время работы библиотеки

Выводы

Был разработан алгоритм, распределяющий нагрузку между сопроцессором и ЦПУ при обработке блоков разреженных матриц. Реализация асинхронной загрузки и выгрузки данных с сопроцессора позволила сократить часть накладных расходов первой версии алгоритма, достигнуто ускорение вычислений до 1,7 раз по

сравнению с обработкой только на ЦПУ. Результаты тестирования показали, что при увеличении числа одновременно работающих процессов ускорение реализации вычислений на сопроцессоре и ЦПУ по сравнению с реализацией только на ЦПУ снижается. Данный эффект связан с низкой пропускной способностью шины PCI-express.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Почему не растёт частота? [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://habrahabr.ru/company/intel/blog/194836/> (дата обращения: 14.05.2014).
2. The free lunch is over: A fundamental turn toward concurrency in software [Текст] / Н. Sutter // Dr. Dobbs's Journal. – 2005. – Т. 30, № 3. – С. 202–210.
3. TOP500 [Электронный ресурс] : Материал из Википедии – свободной энциклопедии : Версия 63058944, сохраненная в 06:43 UTC 14 мая 2014 / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. – Электрон.

дан. – Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2014. – Режим доступа : <http://ru.wikipedia.org/?oldid=63058944>

4. Новокщёнов, А. А. Block implementation of algorithms for solving sparse systems of linear equations with the high-performance computing tools / А. А. Новокщёнов, А. А. Насонов, В. А. Егунин // Innovation Information Technologie : mater. of the 3rd Int. scien.-pract. conf. (Prague, April 21–25, 2014). Part 2 / МИЭМ ВШЭ, Рос. центр науки и культуры в Праге. – М., 2014. – С. 81–83.

5. Tesla vs. Xeon Phi vs. Radeon A Compiler Writer's Perspective / B. Leback, D. Miles, M. Wolfe.

6. Optimising the DBCSR GPU Implementation [Текст] / J. Chetty – 2011.

УДК 532.584:519.237.5

А. Б. Голованчиков, Н. А. Кидалов, А. С. Князева

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЛИНЕАРИЗОВАННОГО РЕОЛОГИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ВОДНО-ГЛИНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ УГЛЕЩЕЛОЧНОГО РЕАГЕНТА (УЩР)

Волгоградский государственный технический университет

anya-sn@mail.ru

Приводятся результаты корреляционного анализа линеаризованной зависимости касательных напряжений от градиента скорости бентонитовой водно-глинистой суспензии с добавлением углещелочного реагента – УЩР, которая описывается уравнением Гершеля – Балкли. Определяются значения критериев Кохрена, Фишера и Стьюдента. Рассчитывается коэффициент корреляции.

Ключевые слова: касательные напряжения, градиенты скоростей, реологическое уравнение Гершеля – Балкли, критерии Кохрена, Фишера и Стьюдента, коэффициент корреляции.

A. B. Golovanchikov, N. A. Kidalov, A. S. Knyazeva

CORRELATION ANALYSIS OF LINEARIZED RHEOLOGICAL EQUATION FOR WATER-CLAY SUSPENSIONS WITH ADDITION OF LIGNIN-ALKALINE REAGENT

Volgograd State Technical University

The article shows the results of correlation analysis of linearized dependence of shear stresses on the velocity gradient of bentonite water-clay suspension with the addition lignin-alkaline reagent, which is described by the Herschel-Bulkley equation. Determined the values of Cochran's test, Fisher's test and Student's test. Calculated the correlation coefficient.

Keywords: shear stresses, velocity gradients, rheological equation of Herschel-Bulkley, Cochran's test, Fisher's test, Student's test, correlation coefficient.

Целью работы являлась обработка линеаризованного реологического уравнения методами корреляционного анализа и сравнение результатов с методом корреляционного анализа обычного (нелинеаризованного) уравнения.

Были проведены исследования[1] по зави-

симости касательных напряжений от градиента скорости бентонитовой водно-глинистой суспензии, выполненные с помощью ротационного вискозиметра BrookfieldDV-II+Pro. Результаты проведенных исследований, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимости касательных напряжений от градиентов скорости для 10 мас.% суспензии с добавлением 4 мас.% УЩР

№	Наименование параметра	Величина в основных опытах								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Градиент скорости $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	18,6	27,9	37,2	46,5	65,1	83,7	125,5	167,4	186,1
2	Касательные напряжения в первом параллельном опыте τ_1 , Н/м ²	1,86	2,23	2,6	2,98	3,35	3,72	4,09	4,46	4,46
3	То же во втором τ_2	1,75	2,58	2,92	3,17	3,2	3,65	4,31	4,72	4,87
4	То же в третьем τ_3	1,9	2,17	2,54	2,69	3,54	3,86	4,39	4,55	4,63
5	Среднее значение касательных напряжений τ	1,84	2,33	2,69	2,95	3,36	3,74	4,26	4,57	4,65

Проводим аппроксимацию экспериментальной зависимости $\tau = \tau(\dot{\gamma})$ по формуле Гершеля – Балкли методом наименьших квадратов (МНК) [2–5]

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

предварительно линеаризуя эту формулу

$$\ln(\tau - \tau_0) = \ln k + n \cdot \ln \dot{\gamma} \quad (2)$$

и преобразуя к виду

$$y = b + a \cdot x, \quad (3)$$

где $y = \ln(\tau - \tau_0)$; $b = \ln k$ и $a = n$.

Ранее методом наименьших квадратов были найдены параметры реологического уравнения Гершеля – Балкли, которое имело следующий вид [6]:

$$\tau = 0,5 + 0,3744 \dot{\gamma}^{0,4746}. \quad (4)$$

Проводился корреляционный анализ данного уравнения без его линеаризации, показывающий, что выполняются условия воспроизво-

димости по критерию Кохрена, значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и адекватности по критерию Фишера с высокой корреляционной связью между касательными напряжениями и градиентами скорости. Относительные отклонения теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных данных: максимальное не превышает 9, а среднее $\pm 4,5 \%$.

Интересно провести корреляционный анализ линеаризованного уравнения (3).

В этом случае аналог табл. 1 для линеаризованных значений

$$y_j = \ln[(\tau_j - \tau_0)] \quad (5)$$

$j = 1, 2, 3$ и средние значения y представлены в табл. 2.

В табл. 3 заносим результаты построчных дисперсий по формуле

$$S_{\bar{y}_i}^2 = (y_1 - y)^2 + (y_2 - y)^2 + (y_3 - y)^2.$$

Таблица 2

Зависимости линеаризованных значений функции и ее средних значений от линеаризованных значений градиента скорости: формулы (1), (3) и (5) [7, 8]

№	Наименование параметра	Обозначение	Величина в основных опытах								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	lnградиента скорости	x	2,92	3,33	3,62	3,84	4,17	4,43	4,83	5,12	5,22
2	y_1 в первом параллельном опыте, $j=1$ (5)	$y_1 \cdot 10$	3,07	5,48	7,42	9,08	10,5	11,7	12,8	13,8	13,8
3	y_2 во втором параллельном опыте, $j = 2$ (5)	$y_2 \cdot 10$	2,23	7,32	8,84	9,82	9,93	11,5	13,4	14,4	14,7
4	y_3 в третьем параллельном опыте, $j=3$ (5)	$y_3 \cdot 10$	3,36	5,13	7,13	7,83	11,1	12,1	13,6	14,0	14,2
5	Среднее значение y	$y \cdot 10$	2,89	5,98	7,79	8,91	10,5	11,8	13,24	14,05	14,2

Таблица 3

Результаты расчетов построчных дисперсий воспроизводимости для линеаризованных значений функции

№ опыта	1	2*	3	4	5	6	7	8	9
$S_{\bar{y}_i}^2 \times 10^3$	6,93	27,8	16,7	20	7,03	2,15	3,47	2,08	4,89

Сумма дисперсий воспроизводимости для всех девяти опытов с учетом числа степеней свободы по параллельным опытам $f = m-1$.

$$\frac{\sum_{i=1}^m S_{\bar{y}_i}^2}{m-1} = 0,0456$$

Наибольшая построчная дисперсия воспроизводимости относится ко второму опыту (отмечено в табл. 3 звездочкой) $S_{\bar{y}_2}^2 = 0,028$.

Тогда расчетный критерий Кохрена

$$G_p = \frac{S_{\bar{y}_2}^2}{\frac{\sum_{i=1}^m S_{\bar{y}_i}^2}{m-1}} = 0, \frac{028}{0,0456} = 0,61;$$

он больше табличного $G_t = 0,4775$, то есть в линеаризованной системе координат построчные дисперсии неоднородны. Это объясняется тем, что в обычной системе координат все значения τ_i больше чем в линеаризованной $\ln(\tau_i - \tau_0)$ на величину $\tau_0 = 0,5$. Эта разница в скобках уменьшает значения y_i , а значит и их натуральные логарифмы, что увеличивает построчные линеаризованные дисперсии, особенно локальное наибольшее значение в начале координат, где τ_i близки к τ_0 .

Расчетная ошибка опыта в линеаризованной системе координат

$$S_{\varepsilon}^2 = \sum_{i=1}^{n1} \frac{S_{\varepsilon_i}^2}{m-1} = \frac{0,0446}{9} = 5,06 \cdot 10^{-3}.$$

Проверяем адекватность уравнения (4) в линеаризованных координатах. В табл. 4 приведены построчные квадраты отклонений теоретических значений функции от экспериментальных в линеаризованных координатах.

$$S_{\text{ад}_i}^2 = \left[\ln(\tau_i - \tau_0) - \ln(\tau_i - \tau_0) \right]^2.$$

Сумма построчных дисперсий табл. 4:

$$S_{\text{ад}}^2 = 3,17 \cdot 10^{-3}.$$

Дисперсия адекватности для линеаризованного уравнения

$$S_{\text{ад}_i}^2 = \left(\frac{m}{n1-l} \right) \cdot S_a^2 = 1,35 \cdot 10^{-2},$$

где l – число расчетных параметров линеаризованного уравнения (4).

Тогда расчетное значение критерия Фишера для реологического уравнения (4) в линеаризованном виде определяется по формуле

$$F_p = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_0^2} = \frac{1,35 \cdot 10^{-2}}{5,06 \cdot 10^{-3}} = 2,68.$$

Таблица 4

Построчные квадратичные отклонения теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных в линеаризованных координатах [3]

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{\text{ад}_i}^2 \times 10^3$	13,5	$3,75 \cdot 10^5$	2,06	2,64	2,61	3,27	0,181	1,85	5,61

Табличное значение критерия Фишера для общего числа степеней свободы $f_0 = n1 \cdot (m-1) = 18$ и число степеней свободы при расчете двух коэффициентов a и b $f_{\text{ад}} = n1 - 1$, где $l=2$ – число рассчитываемых коэффициентов $F_T = 3,55$ [3].

Для линеаризованного реологического уравнения, как и для реологического уравнения в обычных координатах, расчетное значение критерия Фишера меньше табличного, а значит полученное реологическое уравнение (4) адекватно экспериментальным данным.

Проверяем значимость коэффициентов $b = \ln k$ и $a = n$ в линеаризованных координатах [3].

Дисперсия обоих уравнений регрессии

$$S^2 = \frac{S_{\varepsilon}^2}{n1} = \frac{5,06 \cdot 10^{-3}}{9} = 0,56 \cdot 10^{-3}$$

$$S = \sqrt{S^2} = 0,023.$$

Табличное значение критерия Стьюдента для каждого коэффициента

$$t_k = \frac{|\ln k|}{S} = \frac{|-0,982|}{0,023} = 42,69$$

$$t_n = \frac{|n|}{S} = \frac{0,4776}{0,023} = 20,7.$$

Так как оба расчетных критерия Стьюдента t_k и t_n уравнения (4) в линеаризованном виде больше табличного, то оба эти коэффициента значимы.

Рассчитаем коэффициент корреляции для линеаризованного уравнения (4) по формуле [4]:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n1-1) \cdot S_x \cdot S_y}, \quad (6)$$

где $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n1} x_i}{n1}$ – среднее значение градиента

скорости в линеаризованном уравнении;

$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n1} y_i}{n1}$ – среднее значение функции в линеаризованном уравнении (см. уравнение 5);

$S_x = \sqrt{\frac{\sum [(x_i - \bar{x})^2]}{n1-1}}$ – среднее квадратичное отклонение градиента скорости в линеаризованном уравнении;

$S_y = \sqrt{\frac{\sum [(y_i - \bar{y})^2]}{n1-1}}$ – среднее квадратичное отклонение функции в линеаризованном уравнении (см. уравнение 5).

Значение коэффициента корреляции, рассчитанное по уравнению (6), численно равно

$$r = 0,987,$$

то есть корреляционная связь касательных напряжений и градиентов скорости сильная и прямая.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Князева, А. С. Реологические свойства и гидродинамика в трубопроводах водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента (УЩР) для формовочных смесей / А. С. Князева, Н. А. Кидалов, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(128) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 7). – С. 69–71.
2. Тябин, Н. В. Реологическая кибернетика. Ч. 1 / Н. В. Тябин. – Волгоград : Волгоградская правда, 1978. – 111 с.
3. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической промышленности / А. Г. Бондарь, В. А. Статюха. – Киев : Вища школа, 1976. – 183 с.

4. Бондарь, А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / А. Г. Бондарь. – Киев : Вища школа, 1973. – 211 с.

5. Закгейм, А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А. Ю. Закгейм. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Химия, 1982 – 288 с.

6. Князева, А. С. Корреляционный анализ экспериментальных данных по реологии водно-глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента (УЩР) / А. С. Князева, Н. А. Кидалов, А. Б. Голованчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(133) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 20). – С. 11–13.

7. Аппроксимация табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей степенным уравнением / А. Б. Голованчиков, А. А. Решетников, А. С. Остроухова, Е. Г. Фетисова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 37–40.

8. Повышение точности при аппроксимации табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей / А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева, А. С. Остроухова, А. А. Решетников // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 12). – С. 9–11.

УДК 004.021

В. Б. Заводовский, С. И. Кирносенко

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ С БОЛЬШИМИ ЧИСЛАМИ

Волгоградский государственный технический университет

iolife.g@gmail.com, kirnosenko@mail.ru

В работе рассматривается задача модификации алгоритма возведения в степень больших чисел методом Монтгомери с целью повышения скорости вычислений, а также оптимизация его под архитектуру сопроцессоров intelXeonPhi. Проведен тест, показывающий эффективность intelXeonPhi при выполнении операции возведения в степень по модулю методом Монтгомери.

Ключевые слова: возведение в степень, большие числа, операции по модулю, XeonPhi, модульная арифметика, Монтгомери.

V. B. Zavadovskiy, S. I. Kirnosenko

APPLICATION OF HYBRID COMPUTER SYSTEMS FOR OPERATIONS WITH LARGE NUMBERS

Volgograd State Technical University

The problem of modifying the algorithm exponentiation of large numbers by Montgomery to increase computing speed, as well as optimization of the architecture of its coprocessor intel Xeon Phi. Joint test, showing the effectiveness of intel Xeon Phi when performing exponentiation modulo by Montgomery.

Keywords: exponentiation, large numbers modulo operation, xeon phi, modular arithmetic, Montgomery.

Введение

Важным направлением использования современных вычислительных систем являются такие сферы деятельности, как моделирование объектов и процессов с высокой точностью. Для сохранения необходимой точности на протяжении всего процесса моделирования (а он может занимать год и более) часто для вычислений применяются числа большой разрядности. Кроме того, медленное выполнение математических операций требует высоких вычислительных ресурсов для их ускорения, что снижает экономическую выгоду при решении определенных задач, использующих такие операции. Поэтому важно максимально оптимизировать алгоритм вычисления, а также выбрать наиболее эффективные аппаратные средства,

чтобы с одной единицы вычислительных ресурсов получить максимальную производительность.

Алгоритмы

Среди самых известных алгоритмов вычислений операций над большими числами, применяемых на сегодняшний день, можно выделить алгоритмы Карацубы, Тома Кука и Монтгомери [1], [2]. Согласно алгоритму Карацубы в процессе вычислений происходит разбиение операндов на более простые множители, а затем перемножение их между собой. Такой подход позволяет существенно ускорить операции над числами разрядностью 256 бит и ниже, однако, он малоэффективен с операциями над числами разрядностью 2048, так как разрядность разложенных операндов окажется очень

большой и время над их вычислениями сократится несущественно [3]. Метод Тома Кука позволяет свести исходную задачу к пяти умножениям в три раза меньшей разрядности, одному короткому делению на 3, двум операциям деления на 3, 13 операций сдвига и 25 операциям суммирования и разности [4]. Метод Тома Кука в определенной степени схож с Алгоритмом Карацубы. Эффективность использования этого метода для выполнения операций возведения в степень разрядностью 2048 будет низкой, поскольку разрядность разложенных операндов окажется большой. Арифметика Монтгомери работает с альтернативным представлением целых чисел – представлением Монтгомери – и производит вычисления над остатками от деления на N , а не с большими числами. Такая арифметика часто применяется в компьютерных вычислениях из-за высокой скорости по отношению к простым методам, суть которых сводится к разложению больших чисел на числа меньшей разрядности [5]. Целью работы является повышение скорости вычисления операции возведения в степень чисел разрядностью 2048 и выше.

Представление чисел большой разрядности

Поскольку язык Си не поддерживает типов данных разрядностью 2048, каждое число представлено в виде массива целых чисел. Так, например, число разрядностью 2048 представляется в виде массива из 64 целых четырехбайтных чисел. Соответственно все операции выполняются над тетрадами байтов.

Модификация алгоритма Монтгомери

В процессе реализации операции над большими числами представляются в виде более простых. Для операции возведения в степень по модулю Монтгомери такой операцией являются сложение двух больших чисел. Если разобрать классическую схему сложения двух больших чисел, состоящих, предположим, из $N=64$ тетрад по 4 байта, то за первый такт выполнится сложение младшей (первой) тетрады, за второй такт сложатся вторые тетрады плюс перенос из первой. По данной схеме такое сложение двух чисел потребует 64 такта [6] (рис. 1). Это очень много. Если принять во внимание, что операция сложения является одной из самых часто выполняемых в операции возведения в степень по модулю Монтгомери [7], то использование данного алгоритма сильно замедлит операцию.

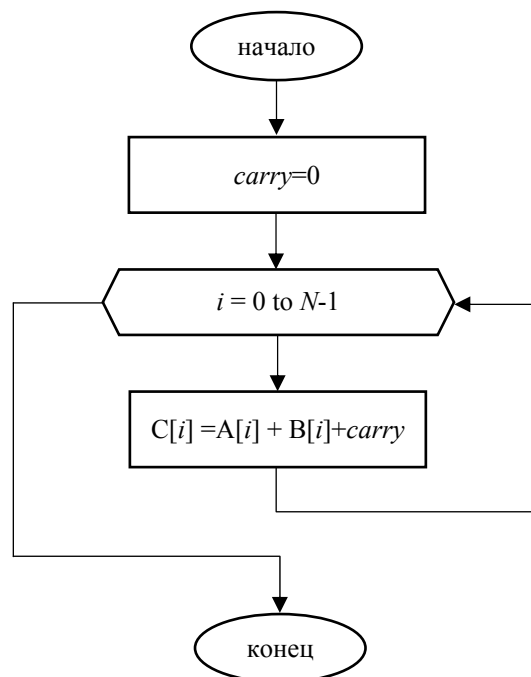


Рис. 1. Блок-схема алгоритма сложения двух чисел разрядностью 2048 бит

Данную проблему удалось частично решить и сократить число тактов на выполнение сложения, прибегая к следующему алгоритму [8]:

1. Выделить число-буфер, разрядностью 64 бита.
2. Сложить попарно все соответствующие тетрады.
3. Записать бит переноса для каждой тетрады в соответствующий бит буфера (из шага 1).
4. Прибавить к каждой тетраде результата «1» или «0», в зависимости от значения соответствующего бита в буфере.
5. Записать бит переноса для каждой тетрады в соответствующий бит буфера.
6. Выполнить операцию логического сложения для этого числа. Если результат отличен от нуля, переход на шаг 4. Иначе – на шаг 7.
7. Вывод результата.

Тестирование алгоритма

Тестирование алгоритма возведения в степень по модулю методом Монтгомери проводится на двух устройствах: на процессоре общего назначения IntelCorei5-4440, и на сопроцессоре IntelXeonPhi 5100. Разрядность операндов составляет 2048 бит. В процессе тестирования замеряется время и вычисляется скорость выполнения операций как на одном ядре, так и при использовании максимального числа ядер тестируемого устройства. Для максимального использования вычислительной мощности сопро-

цессора IntelXeonPhi тестируемый алгоритм использует 512-разрядные регистры для парал-

лельной обработки векторных операций. Результаты тестов приведены в табл.х 1 и 2.

Таблица 1

Результат тестов алгоритма возведения числа в степень по модулю Монтгомери разрядностью 2048 на одном ядре

Количество операций	intelCore i5- 4440		Intel Xeon Phi 5100.	
	Время выполнения (с)	Скорость выполнения (операций/с)	Время выполнения (с)	Скорость выполнения (операций/с)
100	0,89	112,36	25,2	3,96
500	4,53	110,38	127,24	3,92
1000	8,91	112,23	252,88	3,95
3000	26,75	112,15	755,67	3,97
5000	44,38	112,66	1265,82	3,95
7000	62,17	112,59	1758,79	3,98
10000	88,69	112,75	2487,56	4,02
20000	177,57	112,63	5037,78	3,97
30000	267,07	112,33	7425,74	4,04
40000	357,08	112,02	9950,25	4,02
50000	442,48	113,00	12406,95	4,03

Таблица 2

Результат тестов алгоритма возведения числа в степень по модулю Монтгомери разрядностью 2048 на максимальном количестве ядер

Количество операций	intelCore i5- 4440		Intel Xeon Phi 5100	
	Время выполнения (с)	Скорость выполнения (операций/с)	Время выполнения (с)	Скорость выполнения (операций/с)
100	0,43	232,55	0,57	175,44
500	1,51	331,13	0,68	735,29
1000	2,96	337,84	0,78	1282,05
3000	9,19	326,44	1,12	2678,57
5000	12,67	394,63	1,64	3048,78
7000	18,99	368,62	2,22	3153,15
10000	26,50	377,36	2,53	3952,57
20000	57,75	346,32	4,47	4474,27
30000	81,17	369,59	6,50	4615,38
40000	109,15	366,47	8,11	4932,18
50000	138,83	360,15	10,02	4990,02

Заключение

В итоге был реализован и протестирован модифицированный алгоритм возведения в степень по модулю Монтгомери. Хотя каждое ядро IntelXeonPhi гораздо медленнее одного ядра современного центрального процессора, этот недостаток компенсируется их количеством, технологией hyperthreading и 512-разрядными векторными регистрами. Исходя из результатов

тестов, можно сделать вывод о высокой эффективности использования IntelXeonPhi для вычисления операций над числами большой разрядности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Четырехмодульная система модулярной обработки информации для высокоточных вычислений / А. А. Коляда [и др.] // Информатика. – 2008. – № 1. – С. 18–30.

2. *Kawamura, S.* Cox-Rower architecture for fast parallel Montgomery multiplication / Shinichi Kawamura, Masanobu Koike, Fumihiko Sano, Atsushi Shimbo // Eurocrypt 2000, LNCS. – Vol. 1807. – Berlin, 2000. – P. 523–538.

3. *Alia, G.* Fast modular exponentiation of large number with large exponents / G. Alia, E. Marti-nelli // J. Syst. Archit. – 2002. – Vol. 47, № 14–15. – P. 1079–1088.

4. *Bajart, J.-C.* An RNS montgomery modular multiplication algorithm / J.-C. Bajart, L.-S. Didier, P. Kornerup // IEEE Trans. Comput. – 1998. – Vol. 47, № 7. – P. 766–776.

5. Функциональные особенности и общие принципы реализации модулярной вычислительной технологии на ди-

апазонах большой мощности / С. М. Завгороднев [и др.] // Электроника инфо. – 2008. – № 12. – С. 50–55.

6. *Инютин, С. А.* Модулярные вычисления в сверх-больших компьютерных диапазонах / С. А. Инютин // Изв. вузов. Электрон. – 2001. – № 6. – С. 65–73.

7. Умножение по большому модулю в минимально избыточной модулярной системе счисления с применением операций масштабирования / А. Ф. Чернявский [и др.] // Информатика. – 2009. – № 4. – С. 49–65.

8. *Hiasat, A. A.* New efficient structure for a modular multiplier for RNS / A. A. Hiasat // IEEE Trans. Comput. – 2000. – Vol. 49, № 2. – P. 170–174.

УДК 004.021

Д. В. Завьялов, С. А. Коржова, А. А. Красников

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАРШЕГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЛЯПУНОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ OPENCL

Волгоградский государственный технический университет

sinegordon@hotmail.com, katenok1_91@mail.ru, realistic@yandex.ru

В статье рассматривается алгоритм вычисления старшего показателя Ляпунова для электромагнитного импульса, распространяющегося в графеновой сверхрешетке, оптимизированный при помощи технологии OpenCL. Сравнение производилось с таким же алгоритмом, реализованным на C++ как однопоточно, так и с использованием многопоточности в модели OpenMP. Тестирование производилось на процессоре AMDAthlon(tm) II X4 620 (2.6 GHz, RAM: 4 GB) и видеокарте NVidia GeForce GTX 470. В результате время выполнения при большом количестве итераций алгоритма уменьшилось относительно OpenMP реализации в 12 раз, а однопоточной C++ реализации в 45 раз.

Ключевые слова: графен, графеновая сверхрешетка, OpenCL.

D. V. Zav'yalov, S. A. Korzhova, A. A. Krasnikov

ALGORITHM'S OPTIMIZATION FOR DETERMINING THE LARGEST LYAPUNOV EXPONENT USING TECHNOLOGY OPENCL

Volgograd State Technical University

This article observes an algorithm for computing the largest Lyapunov exponent for the electromagnetic pulse spreading in the graphenesuperlattice optimized using technology OpenCL. The compare was performed with the same algorithm, implemented in as a single-threaded C++ and using multithreading model OpenMP. Testing was performed on the CPU AMD Athlon (tm) II X4 620 (2.6 GHz, RAM: 4 GB) and video card NVidia GeForce GTX 470. As a result, algorithm execution time for large iterations decreased relative OpenMP in 12 times and relative C++ in 45 times.

Keywords: graphene, graphenesuperlattice, OpenCL.

Введение

В настоящее время такая технология как OpenCL активно используется при построении сложных приложений. Центральная идея OpenCL – предоставить программисту универсальный инструмент для использования всех вычислительных мощностей современных вычислительных систем. Этот стандарт позволяет создавать приложения, которые могли бы выполняться параллельно на различных по архитектуре графических (GPU) или центральных (CPU) процессорах, расположенных в некоторой гетерогенной системе.

Технология OpenCL

С точки зрения модели вычислений OpenCL-приложение состоит из хостовой программы и набора ядер (kernels). OpenCL-ядро в общем виде представляет собой функцию, написанную на языке OpenCL C (подмножество языка ISO C'99) и скомпилированную OpenCL-компилятором.

Ядро создается в хостовой программе и затем с помощью специальной команды ставится в очередь на выполнение в одном из OpenCL-устройств. OpenCL-устройством может быть CPU, GPU, DSP или любой другой процессор

в системе, поддерживающий установленными в системе OpenCL-драйверами. OpenCL-устройства логически делятся моделью на вычислительные модули (compute units), которые в свою очередь делятся на обрабатывающие элементы (processing elements). Вычисления на OpenCL-устройствах в действительности происходят на обрабатывающих элементах. На рис. 1 схематически изображена OpenCL-платформа из трех устройств. Во время выполнения упомянутой команды OpenCL Runtime System создает целочисленное пространство индексов (integer index space), каждый элемент которого носит название глобального идентификатора (global ID). Каждый экземпляр ядра выполняется отдельно для каждого значения глобального идентификатора. Экземпляр ядра носит название work-item. Таким образом, каждый work-item однозначно определяется своим глобальным идентификатором.

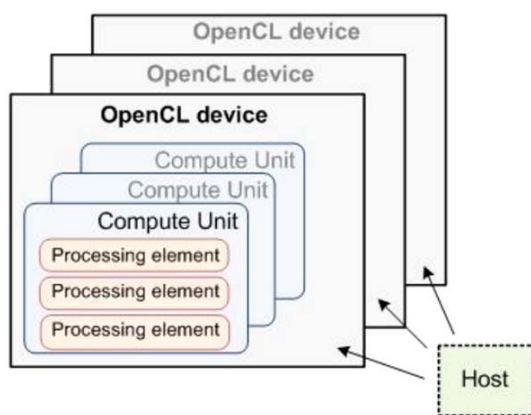


Рис. 1. Платформа OpenCL

Компиляция программы OpenCL происходит непосредственно драйвером устройства, на котором будет происходить запуск программы.

Процесс инициализации для OpenCL

1. Выбор платформы.
2. Создание контекста, привязанного к платформе.
3. Выбор устройства из контекста.

Системы памяти сильно отличаются друг от друга в зависимости от компьютерной платформы. К примеру, все современные CPU поддерживают автоматическое кэширование данных – в отличие от GPU, в которых это бывает далеко не всегда.

Для переносимости кода (code portability) в OpenCL определяется абстрактная модель памяти. Память, определяемая в OpenCL, условно показана на рис. 2:

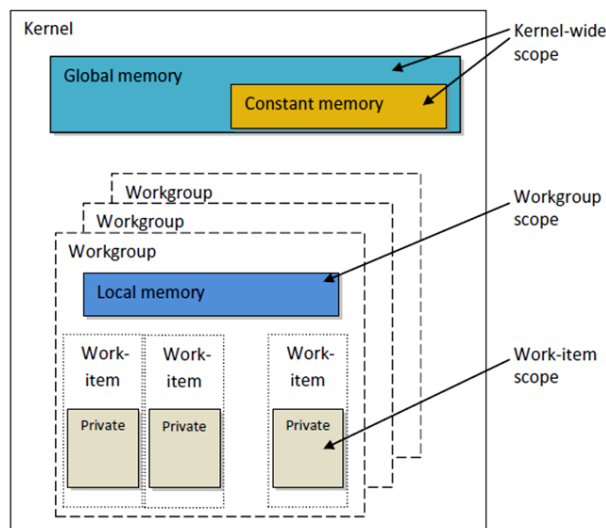


Рис. 2. Модель памяти в OpenCL

Графен и сверхрешетки на основе графена

Модельной системой, для которой разрабатывалась реализация алгоритма, был взят короткий электромагнитный импульс, распространяющийся в сверхрешетке на основе графена.

Графен и новые структуры на его основе привлекают исследователей благодаря своим замечательным электронным свойствам. В последнее время активно изучаются сверхрешетки на основе графена и влияние сильных электромагнитных (ЭМ) полей на оптические и электрические свойства структуры графена [1].

Графеновая сверхрешетка представляет собой лист графена, нанесенного на ленточную подложку с периодически чередующимися слоями любых двух кристаллов ($\text{SiO}_2/\text{h-BN}$ или SiO_2/SiC) вдоль оси Oz. Электронный спектр этой решетки описывается следующим уравнением:

$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \sqrt{\Delta^2 + p_x^2 v_F^2 + \Delta_1^2 \left(1 - \cos \frac{p_z d}{\hbar}\right)}, \quad (1)$$

где параметры Δ , Δ_1 , d устанавливаются в процессе получения из графеновой сверхрешетки, а v_F является скоростью на поверхности Ферми.

Если идеальная сверхрешетка находится в электромагнитном поле с векторным потенциалом $\mathbf{A} = (0, 0, A_z)$, то плотность тока, индуцированного в этой области, имеет следующий вид:

$$j_z^0 = -\frac{en_0 d \Delta_1^2 \sin \varphi}{2a_0 \hbar \sqrt{\Delta^2 + \Delta_1^2 (1 - \cos \varphi)}}, \quad (2)$$

где $\varphi = e d A_z / \hbar c$ – безразмерный потенциал электромагнитного поля; $\omega_0^2 = 2\pi n_0 e^2 d^2 \Delta / a_0 \hbar^2$; n_0 – поверхностная концентрация носителей заряда, a_0 – ширина слоя графена. Таким образом, невозмущенное уравнение Даламбера в графеновой сверхрешетке описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\omega_0^2 b^2 \sin \varphi}{\sqrt{1 + b^2 (1 - \cos \varphi)}} = 0. \quad (3)$$

В результате преобразования уравнения (3) к уравнению дважды возмущенного синус-Гордона, мы имеем уравнение движения электромагнитного импульса в графеновой сверхрешетке:

$$-\frac{d^2 \varphi}{d\xi^2} - 2\mu \frac{d\varphi}{d\xi} + \frac{b^2 \sin \varphi}{\sqrt{1 + b^2 (1 - \cos \varphi)}} = q \cos \Omega (\xi - \xi_x), \quad (4)$$

где $\mu = 2\pi c k \beta / \omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}$, $q = 4\pi e d j_0 / \hbar \omega_0^2$;
 $\Omega = \omega \sqrt{1 - \beta^2} / \omega_0 \beta$, $\xi_x = x / L_0$.

Алгоритм определения старшего показателя Ляпунова

Для того чтобы узнать значения параметров q , Ω и b , при которых возникает хаос в электронной подсистеме, мы будем использовать метод определения старшего показателя Ляпунова. Для этого приведем уравнение (4) к каноническому виду:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{d\xi} = \chi(\xi), \\ \frac{d\chi}{d\xi} = \frac{b^2 \sin \varphi}{\sqrt{1 + b^2 (1 - \cos \varphi)}} - 2\mu \chi(\xi) - q \cos \Omega (\xi - \xi_x). \end{cases} \quad (5)$$

Воспользуемся методом, описанным в [2]. К системе (5) добавим систему

$$\frac{d\vec{\eta}}{dz} = J\vec{\eta}, \quad (6)$$

где $\vec{\eta} = \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{pmatrix}$ – вектор-столбец функций времени;

$$J = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ b^2 \left(\frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + b^2 (1 - \cos \varphi)}} - \frac{b^2 \sin^2 \varphi}{2 \left(1 + b^2 (1 - \cos \varphi) \right)^{3/2}} \right) & -2\mu \end{pmatrix} \quad (7)$$

якобиан системы (5). Начальные условия для (6) выбираем произвольно и так, чтобы вектор $\vec{\eta}$ был единичным.

Разобьем время наблюдения на достаточно малые участки τ . На каждом участке будем решать систему (5) совместно с (6) методом Рунге – Кутты и в конце каждого шага вычислять соотношение

$$d_i = \frac{\|\vec{\eta}(\tau)\|}{\|\vec{\eta}(0)\|}, \quad (8)$$

где $\|\vec{\eta}(0)\|$ – норма вектора $\vec{\eta}$ в начале i -го участка; $\|\vec{\eta}(\tau)\|$ – норма вектора $\vec{\eta}$ в конце i -го участка.

После этого перенормируем вектор $\vec{\eta}$ к единичной длине и используем эти значения в качестве начальных условий для решения уравнений на следующем временном шаге τ . Матрица (7) вычисляется заново на каждом временном шаге метода Рунге – Кутты. Старший показатель Ляпунова будет тогда

$$\lambda = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \ln(d_i), \quad (9)$$

где T – время наблюдения; N – число интервалов длины τ .

Код ядра с использованием технологии OpenCL:

```
__kernel void Run (__global const float* params, __global const float* etta10, __global const float* etta20,
__global float* res)
{
    intgid = get_global_id(0);
```



```

floatt0 = 1;
floatphi0 = -3.1415926; //начальный угол отклонения вблизи -π
floathi0 = 0; //величина шага для метода Рунге-Кутты
// params[0] - params[6] – параметры для системы дифференциальных уравнений
float q = params[0];
float w = params[1];
float mu = params[2];
float b = params[3];
floatdt = params[4];
intcount = params[5]; //количество участков наблюдения
intn = params[6]; // количество точек на одном участке наблюдения
floatsol[] = {phi0, hi0, 0, 0}; //начальные условия для метода Рунге-Кутты 4-го порядка
intn0 = t0/dt; //количество точек на первом участке (на котором мы ничего не считаем и который нужен
просто для установления процессов релаксации)
RK4(sol, 0, dt, n0, q, w, mu, b); // функция расчета системы ОДУ методом Рунге-Кутты
sol[2] = etta10[gid]; //первое значение вектора смещения
sol[3] = etta20[gid]; // второе значение вектора смещения
floattemp = 0; //Промежуточное значение старшего показателя Ляпунова
floatd0, d1; // нормы вектора
floatt = 0; //начальная точка участка, с которой и начинается расчет показателя
for(int i = 0; i < count; i++){
    d0 = sqrt(sol[2]*sol[2] + sol[3]*sol[3]); // норма вектора в начале i-го участка
    RK4(sol, t, dt, n, q, w, mu, b); //Нахождение решения ОДУ
    t = t + n*dt; // конечная точка участка
    d1 = sqrt(sol[2]*sol[2] + sol[3]*sol[3]); //норма вектора в конце i-го участка
    temp = temp + log(d1/d0); // расстояние между траекториями
    //sol[2] - sol[3] - новые параметры вектора смещения для следующего шага
    sol[2] = sol[2] / sqrt(sol[2]*sol[2] + sol[3]*sol[3]);
    sol[3] = sol[3] / sqrt(sol[2]*sol[2] + sol[3]*sol[3]);
}
res[gid] = temp / (dt*n*count); //старший показатель Ляпунова
}

```

На рис. 3 и 4 представлена карта плотности распределения старшего показателя Ляпунова при $q = \{0,1; 1\}$, $\Omega = \{0,1; 1\}$ и $b = 0,1$ для алгоритма на C++ и OpenCL соответственно. Как видно, результаты хорошо совпадают.

Результаты сравнения алгоритма, реализо-

ванного на C++, OpenMP и OpenCL, при значениях $q = \{0,1; 1\}$, $\Omega = \{0,1; 1\}$ и $b = 0,1$, приведены в таблице. ArraySize – количество итераций определения старшего показателя Ляпунова для каждого q и Ω ; count – количество участков наблюдения.

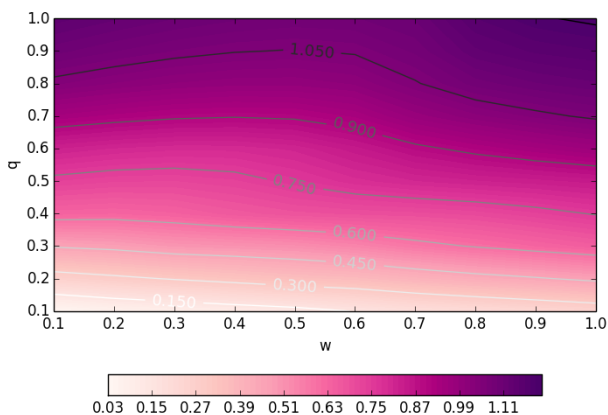


Рис. 3. Карта плотности распределения старшего показателя Ляпунова (C++)

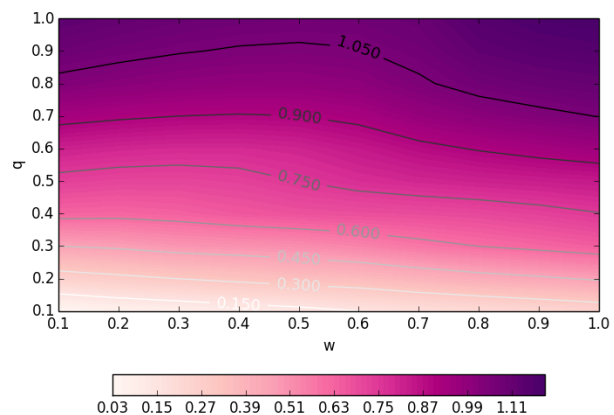


Рис. 4. Карта плотности распределения старшего показателя Ляпунова (OpenCL)

Результаты тестирования алгоритма определения старшего показателя Ляпунова

Входные параметры	C++, с	OpenMP, с	OpenCL, с
ArraySize= 100 count=1000	71	20	64
ArraySize= 500 count=1000	361	99	79
ArraySize= 1000 count=1000	726	208	79
ArraySize= 5000 count=1000	3617	978	79
ArraySize= 10000 count=1000	7110	1970	158

Как видно из таблицы, OpenCL оказался быстрее OpenMP в 12 раз, а C++ – в 45 раз, при большом количестве итераций. Отсюда следует, что оптимизация алгоритма расчета старшего показателя Ляпунова с помощью OpenCL дала хорошие результаты при большом количестве итераций. Можно также отметить, что OpenCL отлично подходит для работы с вычислительно сложными задачами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D. Bolmatov, Chung-Yu Mou. Physica B: Condensed Matter 405 (2010) 2896-2899.
2. Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for hamiltonian systems: A method for computing all of them. Part I: Theory. Part II: Numerical application // Mecanica. – 1980. – Vol. 15. – P. 9.
3. The open standard for parallel programming of heterogeneous systems [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.khronos.org/opencl/>
4. OpenCL [Электронный ресурс]. – URL: <http://opencl.ru/design>
5. Обзор OpenCL [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.slideshare.net/MSUGMLVideogroup/opencl-overview-4157578>
6. Введение в технологию OpenCL [Электронный ресурс]. – URL: http://mmcs.sfedu.ru/~dubrov/files/sl_parallel_06_opencl.pdf
7. Работа с OpenCL [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mql5.com/ru/docs/opencl>
8. Новые наноструктуры на основе графена: физико-химические свойства и приложения [Электронный ресурс]. – URL: http://tisnum.ru/research-departments/tg_pdf/Papers/UH83_251.pdf
9. Графен и его свойства [Электронный ресурс]. – URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/17.05.11.pdf>
10. Малинецкий, Г. Г. Нелинейная динамика. Подходы, результаты, надежды / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов, А. В. Подлазов. – М.: Либроком, 2011. – 280 с.

УДК 539.193/.194;535/33.34

П. М. Элькин, О. Н. Гречухина, Д. Д. Кочергина, А. М. Лихтер

СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТАУТОМЕРОВ 5-КАРБОКСИЦИТОЗИНА В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Астраханский государственный университет

d_kochergina@mail.ru

В статье представлены результаты модельных расчетов колебательных состояний таутомеров 5-карбокситозина, полученных с помощью метода функционала плотности DFT/b3LYP. На основании полученных результатов предложены структурно-динамические модели исследуемых соединений и выявлены признаки их спектральной идентификации.

Ключевые слова: 5-карбокситозин, адиабатический потенциал, колебательный спектр, таутомер, водородная связь.

P. M. Elkin, O. N. Grechuhina, D. D. Kochergina, A. M. Likhter

STRUCTURAL AND DYNAMIC MODELS AND SPECTROSCOPIC IDENTIFICATION OF TAUTOMERS OF 5-CARBOXYCYTOSINE IN CONDENSED STATE

Astrakhan State University

The article presents the results of model calculations of vibrational states of tautomers 5-carboxycytosine obtained using density functional method DFT/b3LYP. Based on the obtained results are suggested structural and dynamic models of the compounds and showed signs of their spectral identification.

Keywords: 5-carboxycytosine, adiabatic potential, the vibrational spectrum, tautomer, hydrogen bond.

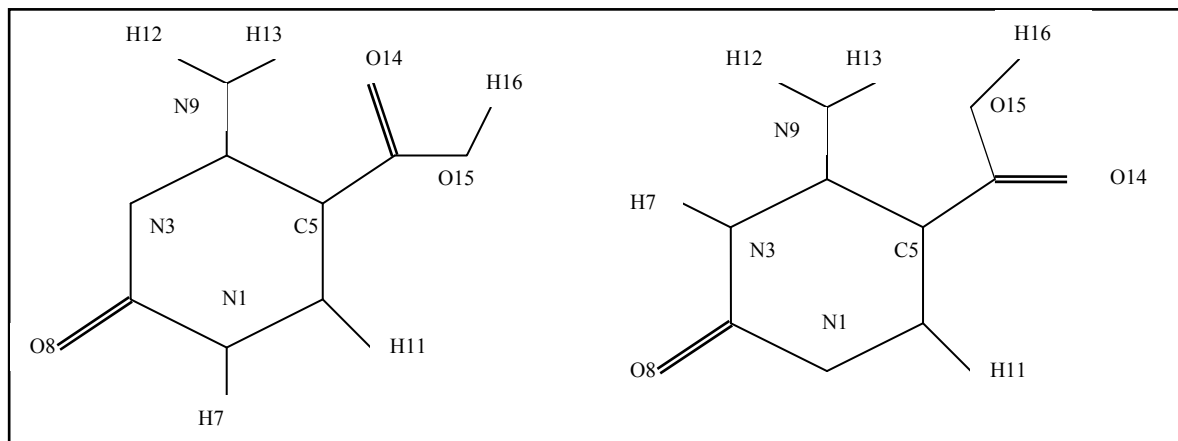
Введение

Таутомерные формы 5-карбоксизамещенных цитозина (см. рисунок), как простейшие основания ДНК, в конденсированном состоянии могут существовать в виде двух типов димеров

с сильной водородной связью. В первом типе димеров водородная связь образуется между атомом кислорода связи C=O и атомом водорода связи N-H (i=1,3). Данный тип связи и его спектроскопическое проявление исследовано

достаточно подробно. Для примера сошлемся на публикации [1–3], где сделан вывод о достоверности предсказательных расчетов структуры и фундаментальных колебательных состояний цитозина и его замещенных с различными электронно-донорными свойствами в рамках мето-

да функционала плотности DFT/b3LYP [4]. При этом выбор базиса расчета принципиального значения не имеет, поскольку энергетические щели между колебательными состояниями существенно больше оценок смещения полос в различных базисах.



Молекулярная структура N1-цитозина (конформер_2) и N3-цитозина (Конформер_1)

Второй тип димеров связан с образованием водородных связей между карбоксильными фрагментами (COOH) мономеров. Такой тип связи имеет место в димерах карбоновых кислот, для которых интерпретация сложной структуры высокочастотного диапазона колебательного спектра является предметом научной дискуссии. Подробно об этом сказано в публикациях [5, 6].

Для 5-карбоксцитозина возможно наличие внутримолекулярной водородной связи между атомом водорода аминогруппы (NH₂) и атомом кислорода карбоксильного фрагмента. Выяснение механизма указанной связи и его влияние на параметры полос колебательного спектра является предметом данной статьи.

Результаты модельных расчетов и их обсуждение

Оптимизация геометрической структуры 5-карбоксцитозина осуществлялась в предположении принадлежности молекулы к группе симметрии (C₁). Однако исходная пирамидальная структура фрагмента NH₂ в результате процедуры оптимизации превратилась в планарную структуру для исследуемых конформеров N1 и N3 таутомерных форм цитозинового фрагмента. Первый конформер (K1) определяется двугранным углом D(4,5,10,15)= 0, конформер (K2) – D(4,5,10,14)=0.

Согласно модельным расчетам в таутомере N1 длины водородных связей в конформерах K1

и K2 оцениваются (в Å) соответственно величинами R(12,15)=1.99 и R(12,14)=1.98. Для таутомера N3 это R(12,15)=1.95 и R(12,14)=1.91.

Влияние замещения на геометрические параметры цитозинового фрагмента носит локальный характер и касается изменения валентных углов A(4,5,10) и A(6,5,10). Для конформера K1 таутомера N1 имеет место следующая их оценка: 129 и 116°. Для конформера K2 таутомера N1 – 123 и 121°. Для конформера K1 таутомера N3 – 126 и 118°. Для конформера K2 таутомера N3 – 120 и 123°. Отклонение остальных параметров от их соответствующих значений в цитозине не превышает 0.01 Å для валентных связей и 1.5° для валентных углов. В тех же пределах изменяются значения геометрических параметров цитозинового фрагмента при образовании димеров 5-карбоксцитозинов. Длины водородных связей для димеров первого типа (R_{C=O...HN}) попадают в интервал 1.71–1.72 Å. Для димеров второго типа (R_{C=O...HO}) интервальная оценка 1.62–1.66 Å.

Модельные расчеты фундаментальных колебательных состояний осуществлены в ангармоническом приближении теории молекулярных колебаний:

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

Следует подчеркнуть и тот факт, что оценки ангармонического смещения частот хорошо согласуются между собой ($\Delta\nu \sim 20 \text{ см}^{-1}$) в рамках соотношения (1) и с использованием выраже-

ний для констант ангармоничности χ_{st} из работы [5], и применением процедуры масштабирования типа:

$$\nu_{анг} = (0.98 - 4.4E-06 \nu_2) \nu_2. \quad (2)$$

Исключение составляют валентные колебания фрагмента *ОН* ($\Delta\nu \sim 150 \text{ см}^{-1}$) в димерах с участием карбоксильного фрагмента. Причина

расхождения подробно обсуждена в публикации [6]. Для решения задачи спектральной идентификации исследуемых молекулярных объектов этот факт принципиального значения не имеет.

Интерпретация спектра фундаментальных колебаний для конформеров N1 и N3 таутомеров 5-карбоксицитозина в мономерах и димерах соединения предложена в табл. 1, 2.

Таблица 1

Интерпретация фундаментальных колебаний N1-таутомера 5-карбоксицитозина

Форма колеб	V _{эксп}	V _{выч}	K1		K2		Форма колеб	V _{эксп}	V _{выч}	K1		K2	
			ИК	КР	ИК	КР				ИК	КР	ИК	КР
Таутомер N1 (Мономер)													
q _{OH}	3570	3585	98	130	109	142	β _{OH} ,β _{NH}	—	1166	—	—	242	7
q _{NH2}	3560	3529	132	49	115	61	β _{OH} ,β _{NH}	1123	1142	248	3	—	—
q _{NH} ,q _{NH2}	3464	3430	192	267	90	142	β _{CNH2}	—	1072	173	3	11	1
q _{NH2}		3371	—	—	126	111	γ	—	1042	109	6	250	9
q _{C=O}	1735	1720	560	18	701	68	ρ _{NH}	634	672	80	1	60	1
Q,β,γ	1595	1633	772	46	508	12	γ _{OCO}	625	606	24	2	52	2
β _{HNNH}	1565	1578	160	10	216	3	β _{CN}	—	589	43	2	4	4
Q,β _{NH}	1472	1498	91	17	196	12	χ _{OH}	560	546	89	8	97	7
β _{HNNH}	1439	1446	154	5	6	24	χ,ρ _{NH}	416	420	1	1	59	3
β _{OH} ,Q _{CC}	1330	1346	43	13	126	7	χ,ρ _{NH}	382	385	—	—	129	1
β _{OH} ,β _{NH}	1212	1201	13	13	38	21	χ,ρ _{NH}	—	332	192	1	—	—
Таутомер N1 (Димер C=O---HN)													
q _{OH}	3570	3583	204	339	230	336	Q,β _{NH}		1435	241	71	115	46
q _{NH2}	3560	3528	257	117	220	139	β _{OH}	1325	1353	169	82	418	39
q _{NH2}	3443	3416	218	333	—	—	β,Q,β _{NH}	1284	1292	98	57	62	32
q _{NH2}		3367	—	—	263	291	β _{OH} ,β _{NH}	1238	1243	62	10	79	24
q _{NH}	2960	2965	5328	—	5431	—	β _{OH} ,β _{NH}	—	1170	799	37	675	83
q _{NH}	2894	2908	—	1230	—	1237	β _{NH2}	—	1089	116	1	31	4
q _{C=O}	1735	1723	679	162	293	305	γ	—	1058	319	17	460	15
q _{C=O}	1679	1683	2072	74	3121	43	ρ _{NH}	925	914	95	4	98	4
Q,β,γ	1595	1626	2202	129	1491	30	γ _{OCO}	625	617	95	11	251	6
β _{HNNH}	1580	1573	486	21	874	1	β _{CN}	609	600	222	6	32	17
Q,β _{NH}	1537	1545	55	86	140	123	χ _{OH}	560	548	176	17	223	15
β _{HNNH}	1439	1449	754	11	323	79	χ,ρ _{NH}	416	443	0	1	48	4
Таутомер N1 (Димер C=O---HO)													
q _{NH2}	3560	3530	268	102	254	118	Q,β _{NH}	1439	1413	146	81	337	160
q _{NH}	3464	3427	164	339	181	332	β,β _{OH}	1330	1315	863	174	626	79
q _{NH2}		3339	222	252	228	267	Q,β _{NH}	1284	1282	43	5	312	83
q _{OH}		3066	—	—	6224	—	β _{OH} ,β _{NH}	1238	1245	139	15	48	8
q _{OH}	2955	2970	7054	—	—	1196	β _{NH2}	1123	1111	30	6	61	10
q _{OH}	2728	2852	—	1174	—	—	ρ _{NH}	638	674	146	2	108	1
q _{C=O}	1679	1669	960	—	2369		γ _{OCO}	625	625	38	1	100	2
q _{C=O}		1640	—	5	—	272	β _{CCO}		467	155	4	84	1
Q,β,γ	1595	1618	2034	312	430	87	γ		394	71	24	4	27
β _{HNNH}	1565	1574	630	10	341	7	χ _{OH}	962	906	212	1	219	1
Q,β _{NH}		1495	95	25	540	32	χ,ρ _{NH}		422	1	3	82	4
β _{HNNH}	1472	1461	458	146	138	3	χ,ρ _{NH}	382	380	383	1	294	0

Таблица 2

Интерпретация фундаментальных колебаний N3-таутомера 5-карбоксцитозина

Форма колеб	V _{эксп}	V _{выч}	K1		K2		Форма колеб	V _{эксп}	V _{выч}	K1		K2	
			ИК	КР	ИК	КР				ИК	КР	ИК	КР
Таутомер N3 (Мономер)													
q _{OH}	3570	3583	96	149	113	140	β,β _{OH}	1342	1366	—	—	179	2
q _{NH2}	3560	3517	106	58	94	87	β _{NH₂} ,β	1330	1322	112	22	41	28
q _{NH} ,q _{NH2}	3374	3403	143	226	38	107	Q,β	1284	1274	78	8	20	3
q _{NH2}		3299	—	—	164	83	β _{OH}	—	1187	163	14	232	14
q _{C=O}	1735	1750	1176	1126	588	67	β _{NH2}	—	1075	31	13	298	27
q _{C=O}	1679	1687	—	—	579	41	q _{CO}	—	1034	259	13	—	—
β _{NH₂} ,Q	1537	1541	122	1	—	—	ρ _{NH}	638	628	41	3	108	2
β _{CNH2}	1508	1498	—	—	40	24	χ _{OH}	560	545	135	7	86	7
Q,γ	1472	1455	67	29	132	24	χ _{NH2}	—	281	—	—	85	0
Таутомер N3(Димер C=O—HN)													
q _{OH}	3570	3582	205	364	237	365	Q,γ	1472	1460	211	40	247	73
q _{NH2}	3560	3506	490	70	—	—	Q,β	1439	1424	414	7	44	57
q _{NH2}	3443	3477	—	—	463	81	β,Q,β _{NH}	1330	1374	22	99	215	39
q _{NH2}	3374	3385	255	281	—	—	β _{OH}	—	1349	—	—	530	32
q _{NH2}		3336	—	—	243	234	β _{OH₂} ,Q,β	1284	1296	361	17	53	2
q _{NH}	2982	2953	3820		3904	—	β _{OH}		1188	470	45	611	50
q _{NH}	2920	2891	—	774	—	796	β _{NH2}	1123	1106	8	7	108	10
q _{C=O}	1735	1743	659	237	—	—	q _{CO}	—	1069	536	18	434	5
q _{C=O}	1679	1690	2330	6	2778	253	ρ _{NH}	925	940	139	1	134	1
β _{HNH}	1595	1624	890	81	568	64	β _{C=O} ,γ _O	634	615	346	11	395	7
Q,β,γ	1565	1587	1369	147	845	73	ρ _{C=O} ,χ	802	790	12	0	98	0
β _{NH₂} ,Q	1537	1551	—	—	837	3	χ _{OH}	560	545	206	17	214	13
Таутомер N3 (Димер C=O—HO)													
q _{NH2}	3560	3515	221	134	203	168	β _{HN} ,Q	1508	1503	—	—	195	41
q _{NH}	3464	3410	77	288	79	257	Q,γ	1472	1458	109	30	306	66
q _{NH2}	3374	3383	280	230	—	—	Q,β	1439	1434	93	140	335	151
q _{NH2}	—	3325	—	—	297	240	β,β _{NH}	1342	1380	129	155	21	48
q _{OH}	—	3066	—	—	6459	—	β _{OH₂} ,β	1330	1318	352	51	1035	168
q _{OH}	2955	2981	—	—	—	1261	β _{OH₂} ,β	1284	1274	1144	63	573	31
q _{OH}	—	2932	7491	—	—	—	Q,β _{C=O}	1123	1134	121	6	211	17
q _{OH}	2728	2824	—	1209	—	—	γ _{OCO}	625	637	32	3	127	5
q _{C=O}	1735	1747	1236	181	1340	178	β _{CCO}		475	176	2	106	2
q _{C=O}	1679	1668	1484	—	1582	—	β _{CC}		271	43	0	111	5
q _{C=O}		1632	—	262		185	χ _{OH}	962	950	214	1	215	1
β _{HNH}	1595	1608	971	30	500	14	ρ _{NH}	638	611	—	—	201	3
Q,β,γ	1565	1596	1766	53	1363	33	ρ _{NH}	—	571	144	1	—	—
β _{HN} ,Q	1537	1541	307	49	—	—	χ	—	220	121	2	57	2

Расчетные данные по частотам сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными по спектрам ИК и КР [7–11]. Для карбок-

сильного фрагмента такие данные заимствованы из публикаций [5, 6]. Тем самым констатируем факт использования приближения локаль-

ного взаимодействия заместителя на силовое поле циклического цикла. Обоснованием возможности такого подхода является хорошее совпадение результатов модельных расчетов колебательных состояний ряда 5-Х цитозин с соответствующим экспериментом [7–11]. Из рассмотрения исключены полосы, не представляющие интереса для решения задачи спектральной идентификации рассмотренных соединений. К ним относятся полосы слабой интенсивности в ИК- и КР-спектрах, а также полосы, характеристичные по частоте, форме колебаний и оценкам интенсивностей.

В мономерах, согласно представленным результатам, положение полос, интерпретированных как валентные колебания связей аминогруппы (ν_{NH_2}), можно использовать в качестве признаков спектральной идентификации конформеров N1 и N3 таутомеров 5-карбоксцитозина. Смещение полос достигает величины $\sim 100 \text{ см}^{-1}$. Полосы интенсивны в ИК- и КР-спектрах. По ним можно идентифицировать и сами таутомеры. Дополнительным признаком идентификации таутомеров могут служить положение и интенсивность полос низкочастотного диапазона колебательного спектра (ниже 400 см^{-1}). Для этой же цели можно использовать полосы, отнесенные к деформационным колебаниям гидроксильного фрагмента (β_{OH}). В N3-таутомере полосы смещаются в низкочастотный диапазон на величину $\sim 40 \text{ см}^{-1}$.

Для идентификации конформеров каждого из таутомеров следует использовать модельные оценки положения и интенсивностей полос, отнесенных к валентным колебаниям карбоксильного фрагмента ($\nu_{\text{C=O}}$, ν_{CO}) и аминогруппы. Образование димера типа $\text{C}_2=\text{O}_8\text{---H}_7\text{N}$, как и в димерах цитозина, приводит к смещению полосы, интерпретированной как валентное колебание связи NH (ν_{NH}), в длинноволновый диапазон на величину $\sim 500 \text{ см}^{-1}$. Полоса, отнесенная к деформационному колебанию связи NH (ρ_{NH}), смещается в коротковолновый диапазон на величину $\sim 300 \text{ см}^{-1}$. Признаком спектральной идентификации таутомеров данного типа димера, наряду с характером поведения валентных колебаний NH_2 , может служить интенсивность полос в диапазоне $1300\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$, отнесенных к деформационным колебаниям гидроксильного фрагмента (β_{OH}) карбоксильной группы.

В димерах типа $\text{C}=\text{O}\text{---}\text{HO}$, в образовании водородных связей между мономерами 5-карбо-

ксцитозина которых участвуют атомы карбоксильного фрагмента, характер смещения полос, отнесенных к валентным и крутильным колебаниям гидроксильного фрагмента, полностью совпадает с таковым для димеров карбоновых кислот, в частности для димера бензойной кислоты. На величину $\sim 500\text{--}700 \text{ см}^{-1}$ в длинноволновый диапазон смещаются полосы, отнесенные к валентным колебаниям связей OH (ν_{OH}); на величину $\sim 400 \text{ см}^{-1}$ в коротковолновый диапазон смещаются полосы, интерпретированные как крутильные колебания фрагмента OH (χ_{OH}). Интенсивность полос, отнесенных к колебаниям гидроксильного фрагмента, можно использовать для идентификации типа димера таутомеров 5-карбоксцитозина.

Заключение

Результаты проведенных модельных расчетов структуры и спектра фундаментальных колебаний мономеров и димеров N1 и N3-таутомеров 5-карбоксцитозина позволяют констатировать факт наличия квазиплоской конформационной структуры исследуемых соединений. Характер проявления полос, отнесенных к фундаментальным колебаниям карбоксильного фрагмента, как в мономерах, так и в димерах соединения совпадает с таковым для соединений класса карбоновых кислот. Наличие слабой водородной связи между атомом водорода аминогруппы и атомами кислорода карбоксильного фрагмента приводит к смещению полос валентных колебаний связей NH до величины, позволяющей использовать полосы в задаче спектральной идентификации конформеров и таутомеров соединения. Выявлены признаки спектральной идентификации конформеров для каждого типа таутомера как в свободном, так и конденсированном состояниях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колебательные спектры 5-галоидо-цитозина в конденсированном состоянии / М. Д. Элькин, Н. А. Равчеева, В. Ф. Пулин, О. М. Алыкова // Проблемы оптической физики и биофотоники. Материалы международной конференции SFM-2012. – Саратов, 2012. – С. 106–109.
2. Элькин, П. М. Структурно-динамические модели и спектральная идентификация замещенных цитозина / П. М. Элькин, Д. Д. Кочергина, А. Р. Гайсина // Проблемы оптической физики и биофотоники. Материалы международной конференции SFM-2013. – Саратов, 2013. – С. 158–161.
3. Структурно-динамические модели гидроксцитозина / М. Д. Элькин [и др.] // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1(21). – С. 102–110.

4. Frisch M J., Trucks G. W., Schlegel H. B. and others. Gaussian 03, Revision B.03, Gaussian Inc., Pittsburgh PA (2003).
5. Элькин, М. Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М. Д. Элькин, Л. М. Бабков // Известия СГУ. Серия Физика. – 2011. – Т. 11, № 1. – С. 20–25.
6. 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.
7. Density functional study of the 5-methylcytosine tautomers / J. R. Sambrano [etc.] // Chemical Physics. – 2001. – Vol. 264. – P. 333–340.
8. Krishnakumar, V. Analysis of vibrational spectra of 5-fluoro, 5-chloro, 5-bromo cytosines based on density functional theory calculations / V. Krishnakumar, V. Balachandran // Spectrochim. Acta. – 2005. – Vol. 61A, № 5. – P. 1001–1006.
9. Gunasekaran, S. Vibrational spectra and normal coordinate analysis of flucytosine / S. Gunasekaran, S. Seshadri, Muthu // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – 2006. – Vol. 44. – P. 581–586.
10. Vibrational spectra and thermodynamic of biomolecules: 5-chlorocytosine / V. K. Rastogi, [etc.] // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – 2006. – Vol. 44. – P. 553–560.
11. Vibrational spectra and thermodynamics of biomolecule: 5-chlorocytosine / V. F. Rastogi, [etc.] // Indian Journal of Pure & Applied Physics. – 2006. – Vol. 44. – P. 653–660.

УДК 539.193/.194;535/33.34

Е. А. Эрман, О. М. Алыкова, Е. А. Джалмухамбетова, В. И. Коломин, Г. П. Стефанова

СТРУКТУРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИМЕРОВ УРАЦИЛ-ЦИТОЗИН

Астраханский государственный университет

kof@aspu.ru

В работе приведены результаты модельных квантовых расчетов геометрической структуры и конформационных свойств нитрофрагмента в мономере и димере цитозин-урацила, выполненные в рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP. На основании анализа результатов модельных расчетов спектра фундаментальных колебаний димеров цитозина и урацила сделан вывод, что весь набор частот можно разделить на две группы. К первой группе следует отнести колебания циклических фрагментов соединений, ко второй – валентные (q_{NH}) и неплоские деформационные (p_{NH}) колебания связей NH. Для спектральной идентификации димеров в работе использованы полосы, отнесенные к плоским (β_{NH}) и неплоским (p_{NH}) деформационным колебаниям связей NH. Показано, что влияние заместителя на электронную структуру пиримидинового кольца носит локальный характер, а спектр его фундаментальных колебаний определяется относительным положением нитрогруппы. Дана полная теоретическая интерпретация колебательных спектров исследуемых молекулярных объектов. Выявлены признаки спектральной идентификации димеров цитозин-урацила, являющиеся общими для всего класса урациловых и цитозиновых оснований ДНК.

Ключевые слова: цитозин, урацил, димер, конформер, колебательный спектр, ангармонизм, адиабатический потенциал, пиримидиновое кольцо, нитрофрагмент.

E. A. Erman, O. M. Alykova, E. A. Dzhalmuhambetova, V. I. Kolomin, G. P. Stefanova

STRUCTURAL AND DYNAMIC MODELS AND SPECTROSCOPIC IDENTIFICATION OF THE CYTOSINE-URACIL DIMERS

Astrakhan State University

The article presents the results of model calculations of quantum geometric structure and conformational properties of the nitro moiety in the monomers and dimers, cytosine-uracil, made in the framework of the density functional method DFT/b3LYP. Analysis of the results of model calculations of the spectrum of the fundamental vibrations of cytosine and uracil dimers showed that the entire set of frequencies can be divided into two groups. The first group include the cyclical fluctuations of fragments of compounds, the second - valence (q_{NH}) and non-planar deformation (p_{NH}) vibrations of NH. For the spectral identification of dimers used band interpreted as a non-planar deformation (p_{NH}) vibrations of NH, and the band assigned to the flat deformation vibrations of NH (β_{NH}). It is shown that the effect of substituents on the electronic structure of the pyrimidine ring is local, and the range of its fundamental oscillation is determined by the relative position of the nitro group. We give a complete theoretical interpretation of the study of molecular objects. Identified signs of spectroscopic identification of cytosine-uracil dimers, which are common to the entire class of uracil and cytosine bases of DNA. Found patterns allow to reveal features spectral class of molecular identification of studied objects.

Keywords: cytosine, uracil, dimer, conformer, vibrational spectrum, anharmonic, adiabatic potential, pyrimidine ring, nitrofragment.

Выявление признаков спектральной идентификации соединений, их интерпретация или отнесение к конкретному молекулярному фраг-

менту являются одними из фундаментальных задач математического моделирования в теории молекулярных систем. В научном мире эта за-

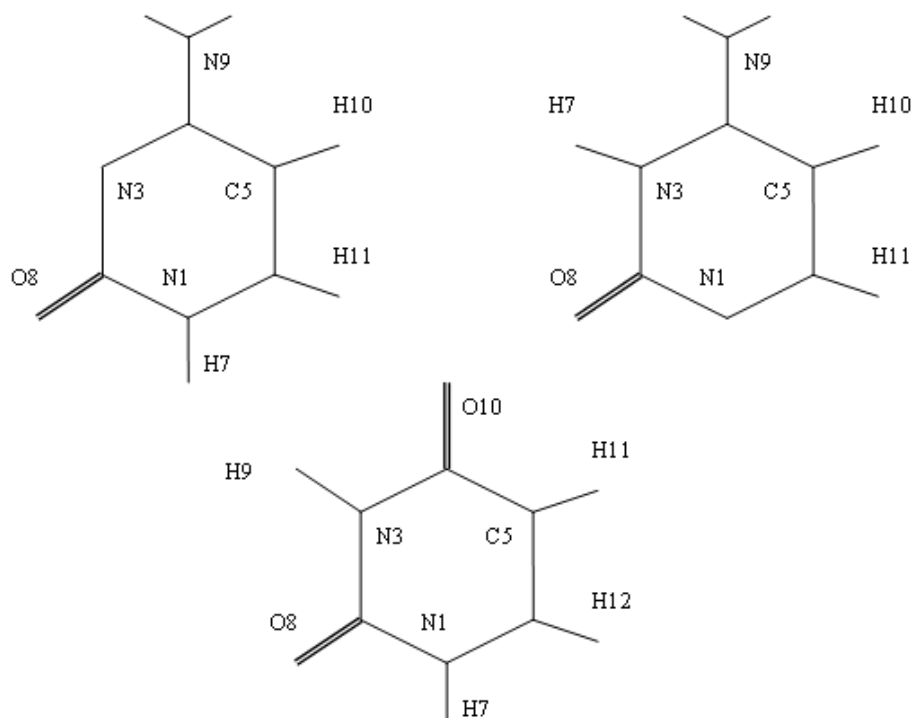
дача носит название «Строение-Структура-Спектр» и имеет значительные особенности для каждого класса соединений. В настоящей работе ставилась цель исследовать структурно-динамические модели и выполнить спектральную идентификацию димеров урацил-цитозин на основе использования современных программных средств моделирования.

Исследуемые в статье соединения (урацилы и цитозины) являются базовыми фрагментами простейших оснований нуклеиновых кислот (ДНК). Роль указанных кислот в генной инженерии и в сфере «биологии моря» трудно переоценить. При этом методы оптической физики считаются наиболее информативными в задачах исследования структуры рассматриваемых типов молекулярных объектов.

Решение задач рассматриваемых в статье типов возможно в рамках высоких технологий молекулярного моделирования – использования квантовых методов анализа параметров адиабатического потенциала. Эти методы в начале XXI века полностью сменили классические методы молекулярной динамики, основанные на решении обратных задач в сфере теоретической физики. Применяемые нами методы реализованы в виде программных разработок прикладного характера. Доминирующей среди них по частоте использования признан пакет «Gaussian». Его составной частью является реализация метода функционала плотности DFT/B3LYP, по-

зволяющего эффективно моделировать рассматриваемые в статье задачи.

Цитозин ($C_4N_2OH_3NH_2$) и урацил ($C_4N_2O_2H_4$) относятся к группе пиримидиновых производных, являющихся базовыми фрагментами (см. рисунок) простейших оснований нуклеиновых кислот. Интерпретация колебательных спектров мономеров и димеров соединений, основанная на результатах модельных квантовых расчетов параметров адиабатического потенциала в рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP [1] предложена в публикациях [2–5]. Подтверждено, что в димерах цитозина и урацила механизмом димеризации является сильная водородная связь типа $NH\cdots O=C$. В димерах урацила может иметь место и слабая водородная связь типа $CH\cdots O=C$. В этих работах построение структурно-динамических моделей урацила и цитозина осуществлено в ангармоническом приближении теории молекулярных колебаний. В данном классе соединений для предварительной оценки ангармонического смещения полос в колебательных спектрах может быть применена процедура масштабирования частот колебаний [6], поскольку различие с результатами квантовых ангармонических расчетов частот фундаментальных колебаний не превышает величины $\sim 30\text{ см}^{-1}$ для диапазона выше 1400 см^{-1} . Для низкочастотного диапазона (ниже 1000 см^{-1}) такое отличие вдвое меньше.



Молекулярные диаграммы N1, N3 цитозина и урацила

Выбор базиса для модельных квантовых расчетов принципиального значения не имеет, поскольку смещение полос является величиной того же порядка, а для большинства полос энергетическая щель между ними больше указанных различий. Тем не менее, предпочтение следует отдать базисам 6-311 (G**, +G**, ++G**). Отметим только, что можно пренебречь учетом поляризационных параметров базиса (+, ++).

На основе результатов модельных расчетов спектра фундаментальных колебаний димеров цитозина и урацила, представленных в табл. 1–4, весь набор частот можно разделить на две группы. К первой группе можно отнести колебания

циклических фрагментов соединений, ко второй – валентные (q_{NH}) и неплоские деформационные (ρ_{NH}) колебания связей NH. Смещение полос по сравнению с мономерами для первой группы не превосходит величины $\sim 50 \text{ см}^{-1}$ и касается, в основном, высокочастотного диапазона. Для второй группы смещение полос достигает соответственно величин $\sim 450 \text{ см}^{-1}$ и 300 см^{-1} . Для спектральной идентификации димеров в первую очередь следует использовать полосы, интерпретированные как неплоские деформационные (ρ_{NH}) колебания связей NH, а также полосы, отнесенные к плоским деформационным колебаниям связей NH (β_{NH}).

Таблица 1

Интерпретация колебаний в димерах урацила

Форма колеб	$\nu_{\text{экс}}$ [13]	$\nu_{\text{ант}}^*$	7-8;7-8		8-9;8-9		9-10;9-10		7-8;8-9		10-7;9-8		9-8;10-9	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
$Q_{C=O}$	1764	1767	–	–	–	–	1119	22	–	–	539	12	490	11
	–	1738	511	103	780	69	–	–	890	86	315	44	296	37
	1741	1716	2817	20	1980	40	–	–	2103	29	1453	4.2	1393	3.7
	–	1692	–	–	–	–	1764	129			788	80	630	81
Q, β, γ	1643	1621	183	30	104	35	69	34	132	33	102	29	92	33
β_{NH}, Q	–	1509	90	90	–	–	–	–	61	39	70	54	–	–
	1472	1460	–	–	163	22	155	29	68	12	69	13	158	25
β_{NH}, β	–	1433	–	–	12	31	38	47	16	18	33	22	30	39
	1399	1399	251	5.2	–	–	–	–	121	4.0	112	3.9	–	–
β_{NH}, β	1389	1373	38	10	358	0.5	113	4.9	229	3.9	69	5	221	2.8
Q, β, β_{NH}	1360	1351	29	28	67	17	185	28	40	22	121	28	135	21
β, β_{NH}	1217	1202	158	8.4	8.3	23	9.4	39	64	15	72	25	9.3	31
$Q\beta_{NH}$	1184	1170	82	42	195	3.3	163	2.1	148	21	124	23	180	3.1
β, Q	1073	1060	18	19	10	11	9.4	11	14	15	14	17	10	11
Γ	982	970	33	12	34	2.4	34	0.7	32	5.5	33	4.9	35	1.7
Q, β_{NH}, Γ	958	954	13	2.9	13	4.0	53	15	18	4.5	37	9.4	31	8.6
Γ	759	755	21	40	7.9	54	9.8	53	12	48	11	47	8.8	54
$\beta_{C=O}$	559	559	9.6	7.7	39	3.0	3.7	5.3	43	4.0	7.3	5.2	30	3.9
$\gamma, \beta_{C=O}$	536	540	75	20	68	7.5	49	8.5	50	12	58	12	59	6.9
Γ	516	519	100	6.6	23	6.1	70	4.7	62	7.8	89	8.4	38	6.6
$\beta_{C=O}$	391	403	60	3.7	82	3.0	97	3.0	70	3.3	77	3.3	89	3.0
$\rho, \rho_{C=O}$	804	799	134	0.9	63	2.2	62	2.2	120	1.5	96	1.8	65	2.2
$\rho_{C=O}, \chi$	722	752	33	0.4	20	0.5	30	0.4	26	0.5	34	0.4	24	0.4
χ, ρ	718	714	0.4	3.9	42	3.6	44	2.4	17	3.8	27	3.0	42	3.1
$X\chi$	395	399	21	2.1	32	3.5	38	4.4	27	2.9	30	3.2	35	4.0

Примечание. Частоты колебаний (ν) в см^{-1} , интенсивности в спектрах ИК в км/моль , в спектрах КР в $\text{\AA}^4/\text{а.е.м.}$ Символом * помечена усредненная оценка расчетных значений частот колебаний с энергетической щелью, не превышающей величину $\sim 20 \text{ см}^{-1}$.

Результат разделения набора фундаментальных частот на две группы был использован

для построения структурно-динамических моделей монозамещенных цитозина и урацила

в конденсированном состоянии и установления признаков их спектральной идентификации. Такие исследования представлены, к примеру, в публикациях [7–11]. Совпадения с имеющимися экспериментальными данными по колебательным спектрам полностью подтвердили

достоверность полученных результатов модельных расчетов структуры и спектра, что дает основание использовать этот подход и для построения структурно-динамических моделей димеров цитозин-урацил.

Таблица 2

Интерпретация колебаний урацилового фрагмента в димерах цитозин-урацил

Форма колеб	$\nu_{\text{эк}}$ [14]	$\nu_{\text{анг}}$	8-7;8-7		9-8;7-8		10-7;8-9		9-8;8-7		9-8;8-9		9-10;8-9	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
$Q_{C=O}$	1764	1771	–	–	–	–	544	13	–	–	–	–	538	13
	–	1733	300	47	327	39	–	–	365	47	320	39	–	–
	1741	1712	1404	2.3	1392	2.0	–	–	1626	0.7	1723	0.9	–	–
	–	1677	–	–	–	–	134	92	–	–	–	–	1749	1.1
Q, β, γ	1643	1621	70	10	62	18	22	16	47	8.1	418	7.0	12	13
β_{NH}, Q	–	1524	77	72	–	–	–	–	32	59	–	–	–	–
	1472	1467	–	–	–	–	50	26	144	3.7	47	27	144	3.7
	–	1442	–	–	135	68	138	0.5	–	–	–	–	–	–
β_{NH}, β	1399	1406	122	3.4	–	–	–	–	126	2.5	12	0.4	16	0.6
β_{NH}, β	1389	1375	19	7.2	243	0.7	61	2.7	126	2.5	12	0.4	16	0.6
Q, β	1360	1352	16	13	10	8.4	108	12	18	12	1.6	6.7	83	25
β, β_{NH}	1217	1223	47	6.0	–	–	–	–	102	3.6	–	–	–	–
	1184	1191	–	–	1.2	12	4.3	22	–	–	2.6	11	10	25
Q, β_{NH}	–	1170	29	24	104	1.2	81	1.3	31	23	104	0.9	74	3.0
β, Q	1073	1061	13	11	5.4	5.6	4.0	6.1	9.0	3.6	2.3	2.2	4.0	5.5
Γ	975	972	37	7.5	18	1.9	18	0.9	32	12	32	3.8	49	7.9
Q, β_{NH}	950	953	4.5	1.9	15	3.4	41	9.7	0.5	2.2	14	1.2	50	4.5
$\gamma, \rho_{C=O}, \chi$	759	758	35	12	25	13	27	11	31	15	14	21	22	19
$\beta_{C=O}$	565	561	6.5	1.8	26	2.9	12	2.8	5.2	2.1	–	–	–	–
$\gamma, \beta_{C=O}$	536	542	6.1	10	52	2.2	27	2.7	8.5	10	46	3.4	–	–
Γ	516	517	61	4.8	5.6	3.3	27	3.5	66	5.7	7.2	6.3	36	3.9
$\beta_{C=O}, \chi$	396	399	48	2.6	73	3.3	87	3.7	48	2.8	48	3.3	78	5.1
$\rho, \rho_{C=O}$	804	798	67	0.6	42	1.1	34	1.3	64	0.6	46	1.1	30	1.1
χ, ρ	718	714	0.1	2.2	18	2.1	25	1.3	0.0	2.0	19	2.0	24	1.1

Анализ модельных расчетов и их обсуждение

Для оценки колебательных состояний исследуемых молекулярных объектов авторами было использовано известное соотношение:

$$E_v = \nu_s \left(n_s + \frac{1}{2} \right) + \chi_{sr} \left(n_s + \frac{1}{2} \right) \left(n_r + \frac{1}{2} \right). \quad (1)$$

Оценка ангармонических констант χ_{sr} осуществлялась по соотношениям, предложенным в работе [12]. Необходимые для этого значения кубических и квартичных силовых констант заимствованы из публикаций [2–5].

Результаты модельных расчетов спектра фундаментальных колебаний димеров цитозина и урацила представлены в табл. 1–4. В трех первых таблицах (для первой группы фундаментальных колебаний) они сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными по колебательным спектрам мономеров соединений [13, 14]. Имеющееся расхождение между экспериментальными данными и модельными расчетами в диапазоне выше 1400 см⁻¹ обусловлено наличием межмолекулярного взаимодействия (механизм водородной связи типа NH---

O=C). Образование димеров приводит к расхождению полос (дублеты), интерпретированных нами как валентные ($\nu_{C=O}$) и деформационные (β_{NH}) колебания связей Q=O и NH соответственно. Полосы обладают заметной интенсивностью в ИК- и КР-спектрах, энергетическая щель между ними может достигать величины $\sim 50 \text{ см}^{-1}$.

Этот факт, а также заметное различие в интенсивностях полос дают возможность использовать указанный диапазон для решения задачи спектральной идентификации димеров. Важно отметить, что положение полос и качественная оценка их интенсивностей определяются типом димера.

Таблица 3

Интерпретация колебаний цитозинового фрагмента в димерах цитозин-урацил

Форма колебаний	$\nu_{жс}$ [5]	$\nu_{анг}$	Димер_N ₃		9-8;8-7		9-8;8-9		9-10;8-9	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
$Q_{C=O}, \gamma, \beta_{NH}$	1730	—	—	—	—	—	295	39	154	82
$Q_{C=O}, \gamma, \beta_{NH}$		1678	1505	3.4	685	24	89	17	445	11
Q, β, β_{CNH}	1602	1627	962	27	468	8.9	70	20	55	24
Q, β, β_{NH}	1569	1570	16	60	39	24	—	—	—	—
Q, β, β_{NH}		1498	—	—	—	—	48	36	212	28
	1465	1465	353	13	170	8.5	—	—	—	—
β, Q, β_{NH}		1430	84	3.5	4.8	0.8	—	—	—	—
	1382	1384	—	—	—	—	154	27	169	11
	1340	1342	341	31	187	26	—	—	—	—
β	1125	1163	7.3	21	5.3	10	9.2	10	7.2	10
γ	968	943	150	16	60	3.2	45	3.4	—	—
$\rho_{C=O}, \chi$	784	799	6.6	67	6.1	36	8.1	38	7.0	39
γ	767	788	36	0.1	12	0.1	8.7	0.2	16	0.3
ρ	717	750	56	0.0	30	0.2	31	0.4	31	0.4
$\gamma, \beta_{C=O}$	—	602	122	11	65	4.4	—	—	—	—
	571	571	—	—			11	2.8	—	—
$\beta_{C=O}$	533	551	7.9	4.1	11	3.6	2.1	2.7	22	7.1
$\chi\chi, \chi, \beta_{NH2}$	—	489	24	1.8	—	—	—	—	—	—
$\chi\chi, \chi$	447	430	17	1.6	8.7	1.1	42	0.9	26	1.3
β_{CN}	342	353	20	3.5	3.8	2.2	21	2.3	7.5	2.0
$\chi\chi, \rho_{NH}$	—	324	—	—	—	—	241	1.6	250	1.9
	—	218	89	0.7	229	1.3	—	—	—	—
			Димер_N ₁		7-8;7-8		7-8;8-9		7-10;8-9-	
$Q_{C=O}, \gamma$	1730	1678	1700	43	827	36	575	50	1668	2.8
Q, β, γ	1668	1632	1304	17	711	9.1	566	7.6	618	9.3
$Q, \beta, \gamma, \beta_{NH}$	1540	1540	101	54	59	12	82	13	71	16
β_{NH}	1423	1466	408	33	220	4.9	147	2.3	189	3.2
β, Q	1461	1450	311	70	123	39	108	8.2	29	67
β, Q	1340	1330	191	21	84	10	71	10	76	10
Q, β	1258	1251	32	10	16	8.7	15	9.2	13	8.4
β, Q	1196	1215	94	22	96	5.5	39	7.3	41	7.9
β, Q	1083	1106	34	41	10	18	10	16	11	18
γ, Q, ρ	—	965	85	16	10	10	27	5.9	56	5.9
Q, β, β_{NH}	—	918	54	12	10	4.1	7.5	4.4	8.4	5.2

Окончание табл. 3

Форма колебаний	$\nu_{\text{экс}}$ [5]	$\nu_{\text{анг}}$	Димер_ N ₃		9-8;8-7		9-8;8-9		9-10;8-9	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
$\chi, \rho_{\text{C=O}}$	784	772	61	46	30	32	30	41	29	42
$\rho, \rho_{\text{CN}}, \chi$	749	750	65	2.5	25	0.9	25	0.8	28	1.0
γ	—	585	68	18	40	8.4	27	6.7	26	7.2
$\gamma, \beta_{\text{C=O}}, \chi^x$	524	535	108	23	77	12	38	11	49	11
χ	396	418	18	1.3	8.3	0.7	10	0.7	9.1	0.6
β_{CN}	—	364	28	1.7	10	1.2	5.9	0.8	5.7	0.8
χ^x	—	226	521	4.0	25	0.1	254	1.9	256	1.9
χ	—	—	—	—	205	1.4	—	—	—	—

В диапазоне ниже 1400 см^{-1} дублетное расщепление полос димеров цитозина и урацила по сравнению с мономерами соединений [2–5] не превышает величины $\sim 20 \text{ см}^{-1}$. Учитывая сказанное выше относительно влияния базиса расчета на смещение полос, колебания данного диапазона следует считать характеристическими по частоте, поэтому их спектральная иден-

тификация возможна только по значениям интенсивностей полос [2–6]. Сказанное имеет место и для димеров цитозин-урацил, а полученные исключения в характере смещения полос по отношению к мономерам цитозина и урацила связаны с взаимодействием фрагмента NH_2 с водородными связями.

Таблица 4

Интерпретация колебаний валентных (q_{NH}) и неплоских деформационных (ρ_{NH}) колебаний связей NH в димерах цитозин-урацил

Форма колеб	$\nu_{\text{экс}}$ [2–6]	Таутомер_ N1: 7-8;8-7			7-8;8-9			7-10;8-9		
		$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР	$\nu_{\text{анг}}$	ИК	КР
q_{NH}	3424–3463	3426	57	72	3467	91	93	3460	100	132
q_{NH}	3127–3197	3122	1958	301	3172	1641	268	3126	2035	313
q_{NH}	2920–3092	2915	1904	605	3016	1147	472	2973	1155	483
ρ_{NH}	890–976	911	123	0.4	934	98	0.1	943	71	0.2
ρ_{NH}	839–890	848	14	1.9	845	35	0.8	866	32	1.1
ρ_{NH}	669–672	671	49	2.5	—	—	—	—	—	—
ρ_{NH}	555–557	—	—	—	554	62	0.9	574	59	0.8
		Таутомер_ N3: 9-8;8-7			9-8;8-9			9-1;8-9		
q_{NH}	3424–3463	3426	55	73	3467	90	86	3458	105	129
$q_{\text{NH--}}$	3092–3129	3089	1707	216	3131	1503	203	3083	1880	202
$q_{\text{NH--}}$	2851–3092	2878	1783	498	2986	881	506	2942	993	402
$\rho_{\text{NH--}}$	890–946	920	127	1.1	940	104	0.1	950	117	0.3
$\rho_{\text{NH--}}$	840–897	846	29	0.5	843	48	0.2	865	40	0.3
ρ_{NH}	669–672	671	50	2.4	—	—	—	—	—	—
ρ_{NH}	555–557	—	—	—	553	66	0.9	579	59	0.8

Использовать для спектральной идентификации диапазон ниже 900 см^{-1} затруднительно. Большинство полос имеют слабую интенсивность в ИК- и КР-спектрах. Ряд полос имеют сравнимую по порядку величины интенсивность. В диапазон ниже 350 см^{-1} , согласно на-

шим расчетам, попадают крутильные колебания фрагмента NH_2 . Однако к этим результатам надо относиться критически, поскольку в низкочастотном диапазоне могут сказываться известные недостатки численных методов, реализованных в пакте «Gaussian» [1].

Приведенные в табл. 4 результаты интерпретации валентных и неплоских деформационных колебаний связей NH в димерах цитозин-урацил следует рассматривать как установленные показатели спектральной идентификации исследуемых соединений. Особенно это касается неплоских деформационных колебаний (ρ_{NH}). Полосы, отнесенные к валентным колебаниям этих связей, участвующих в образовании димеров, обладают существенной шириной, а их использование в задачах спектральной идентификации может встретить затруднение.

Заключение

Результаты предсказательных модельных квантовых расчетов структуры и спектров димеров урацил-цитозин дают основание утверждать, что проявляющиеся закономерности в характеристиках полос в оптических колебательных спектрах исследуемых молекулярных объектов являются общими для всего класса урациловых и цитозиновых оснований ДНК. Весь набор фундаментальных колебаний можно отнести к колебаниям урацилового и цитозинового фрагментов, колебаниям связей NH, участвующим в образовании водородных связей. Установленные закономерности позволяют выявить признаки спектральной идентификации исследуемого класса молекулярных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование адиабатических потенциалов многогидроксиазаурацилов в конденсированном состоянии / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. Н. Гречухина, О. М. Алыкова, А. Р. Гайсина, Н. А. Равчеева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 2(22). – С. 63–72.
2. Моделирование колебательных состояний урациловых оснований ДНК и их спектральная идентификация / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. Ю. Степанович, В. Ф. Пулин, А. М. Лихтер, О. Н. Гречухина // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – № 1(69). – С. 74–79.
3. Системный анализ результатов модельных расчетов параметров адиабатического потенциала 5Х-замещенных урацила в конденсированном состоянии / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. Н. Гречухина, О. М. Алыкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3(23). – С. 78–85.
4. Структурно-динамические модели гидроксицитозинов / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. М. Алыкова, А. Р. Гайсина, В. И. Коломин, Н. А. Равчеева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1(21). – С. 102–110.
5. Структурно-динамические модели и спектральная идентификация конформеров дигидроксиурацила и дигидроксиазаурацилов / М. Д. Элькин, О. Н. Гречухина, Е. А. Джалмухамбетова, А. Р. Гайсина, М. В. Карташов, Н. А. Равчеева // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 1(21). – С. 93–101.
6. Элькин, М. Д. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью / М. Д. Элькин, Л. М. Бабков // Известия СГУ. Серия «Физика». – 2011. – Т. 11, № 1. – С. 20–25.
7. Элькин, П. М. Анализ колебательных спектров метилзамещенных урацила в ангармоническом приближении / П. М. Элькин, М. А. Эрман, О. В. Пулин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2006. – Т. 73. – № 4. – С. 431–436.
8. Элькин, П. М. Математическое моделирование структуры и динамики димеров урацила и азаурацилов / П. М. Элькин, М. А. Эрман, В. М. Карташов // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2012. – № 10 (97), вып. 14. – С. 55–63.
9. Элькин, П. М. Структурно-динамические модели и ангармонический анализ колебательных состояний замещенных урацила / П. М. Элькин, О. В. Пулин, Е. А. Джалмухамбетова // Вестник СГТУ. – 2005. – № 4(9). – С. 36–45.
10. Программно-алгоритмическая поддержка задач молекулярного моделирования / Е. А. Эрман, П. М. Элькин, Г. П. Стефанова, Н. А. Равчеева // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. Сер. Актуальные проблемы управления, выч. техники и информатики в техн. системах. – 2012. – № 10 (97), вып. 14. – С. 63–67.
11. Структурно-динамические модели и колебательные состояния димеров хлорурацила / Е. А. Эрман, М. Д. Элькин, А. М. Лихтер, Е. А. Джалмухамбетова, О. М. Алыкова, Н. А. Равчеева // Естественные науки. – 2012. – № 2. – С. 220–227.
12. Gaussian 03. Revision B.3. / M.J.Frish [et.al]. Pittsburgh PA.: Gaussian Inc., 2003.
13. Rozenberg M., Shoham G., Reva I., Fausto R. Low temperature Fourier transform infrared spectra and hydrogen bonding in polycrystalline uracil and thymine // Spectrochim. Acta. – 2004. – Vol. 60 A. – P. 2323–2330.
14. Yarasi S., Billingham B.E., Loppnow G.R. Vibrational property of thymine and uracyl and their isotopomers // J. Raman Spectroscopy. – 2007. – Vol. 38, № 9. – P. 1117–1120.

УДК 539.193/.194;535/33.34

*Е. А. Эрман, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. М. Алыкова
Г. П. Стефанова, И. А. Крутова*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СПЕКТРОВ НИТРОУРАЦИЛОВ В КОНДЕНСИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

Астраханский государственный университет

kof@aspu.ru

Влияние заместителя на электронную структуру пиримидинового кольца носит локальный характер. Спектр фундаментальных колебаний нитрозамещенных соединений определяется относительным положением нитрогруппы. Нитроурацилы способны образовывать димеры с сильной водородной связью. Положение и интенсивность спектральных полос валентных и деформационных колебаний нитрогруппы и атомов, связанных с ней, позволяют идентифицировать тип замещения в нитроурацилах. Модельные квантовые расчеты геометрической структуры, конформационных свойств нитрофрагмента в мономерах и димерах нитроурацилов осуществлены в рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP.

Ключевые слова: нитроурацилы, димер, мономер, конформер, колебательный спектр, нитрогруппа, адиабатический потенциал, пиримидиновое кольцо, водородная связь.

*E. A. Erman, V. V. Smirnov, E. A. Dzhalmuhambetova, O. M. Alykova,
G. P. Stefanova, I. A. Krutova*

SIMULATION OF THE STRUCTURE AND SPECTRA NITROURACILOV IN THE CONDENSED STATE

Astrakhan State University

Effect of the substituent on the electronic structure of the pyrimidine ring is local in character. Range of fundamental vibrations of nitro compounds is determined by the relative position of the nitro group. Nitrouratsily capable of forming dimers with strong hydrogen bonding. The position and intensity of the spectral bands stretching and deformation vibrations of the nitro group and atoms related to identify the type of substitution in nitrouratsilah. Model quantum calculations of the geometric structure, conformational properties nitrofragmenta in the monomer and dimer nitrouratsilov implemented within density functional method DFT/B3LYP.

Keywords: nitrouratsily, dimer, monomer, conformer, vibrational spectrum, nitro group, adiabatic potential, pyrimidine ring, hydrogen bond.

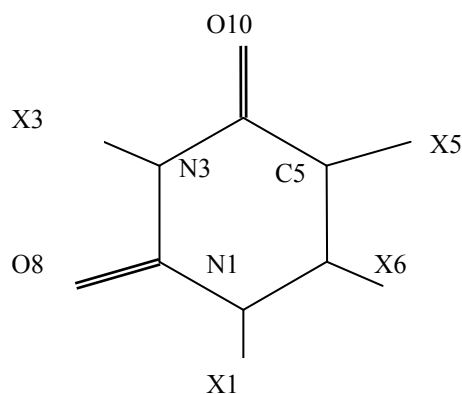
Введение

Модельные расчеты [2–4] структуры и спектров монозамещенных урацила ($C_4N_2O_2H_3X$, $X=CH_3$, OH, NH_2 , F, Cl) и их сопоставление с имеющимися экспериментальными данными по колебательным спектрам позволяют сделать вывод, что в рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP можно осуществлять достоверные предсказательные оценки геометрической структуры, параметров адиабатического потенциала мономеров и димеров указанного класса соединений, анализ конформационных свойств их замещенных.

Предложенная в публикациях [2–4] интерпретация фундаментальных колебаний позволила выявить закономерности в поведении полос в ИК- и КР-спектрах, которые следует использовать как признаки спектральной идентификации возможных димеров монозамещенных урацила.

Одна из таких закономерностей состоит в том, что весь набор фундаментальных коле-

баний можно разделить на три группы. К первой относятся колебания урацилового остова, во вторую входят колебания NH и C=O фрагментов, участвующих в образовании димеров соединений с механизмом межмолекулярной водородной связи, третья группа – колебания фрагментов-заместителей.



Молекулярная диаграмма нитроурацилов
($X=H$, NO_2)

Колебания первой группы можно считать характеристическими по частоте, поэтому для спектральной идентификации соединений следует применять различия интенсивностей полос в ИК- и КР-спектрах. Для валентных и неполюских деформационных колебаний связей NH, входящих во вторую группу имеет место смещение полос в длинноволновый и коротковолновый диапазоны колебательного спектра на величину $\sim 450 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 300 \text{ см}^{-1}$ соответственно. Колебания третьей группы (CX и NX фрагментов) являются характеристическими по частоте и форме колебаний и, как правило, по интенсивности во всех шестичленных циклических и азациклических соединениях [1]. Отметим также, что приближение о локальном влиянии монозамещения на гармоническое силовое поле шестичленного цикла, используемое авторами монографии [1] при интерпретации колебательного спектра шестичленных азациклов, находит подтверждение в результатах модельных расчетов, представленных в публикациях [2–4].

Результаты модельных расчетов и их обсуждение

При оптимизации геометрической структуры нитроурацилов (см. рисунок) в предположении плоской исходной структуры молекул (симметрия C_s) низкочастотные крутильные колебания нитрогруппы относительно плоскости шестичленного цикла удалось воспроизвести только для 6-нитроурацила. Для остальных этого добились путем понижения симметрии до группы C_1 . Для 3-нитроурацила квантовые расчеты привели к конфигурации, при которой плоскости пиримидинового цикла и нитрофрагмента ортого-

нальны (симметрия C_s), для 1- и 5-нитроурацилов крутильные колебания возможны (получены положительные значения) для двугранных углов $D(C_6N_1O_7H) \sim 160^\circ$ и $D(C_4C_5O_{11}H) \sim 13^\circ$. Такие результаты объясняются взаимодействием атомов кислорода нитрогруппы с соседними атомами кислорода связей $C=O$. Отметим, что влиянием некомпланарности геометрической структуры на результаты расчетов остальных частот фундаментальных колебаний можно пренебречь. Иными словами, имеем дело с приближением свободного вращения в задачах теоретической интерпретации колебательных спектров монозамещенных шестичленных циклических соединений [1].

Образование димеров с водородными связями типа $NH\cdots O=C$ приводит к отклонению значений геометрических параметров урациловых фрагментов на величины $\sim 0.01 \text{ \AA}$ для валентных связей и 0.5° для валентных углов. Значения длин водородных связей располагаются в интервале $1.78\text{--}1.91 \text{ \AA}$, что совпадает с аналогичными данными, приведенными в работах [2–4].

Для нитрофрагмента, согласно модельным расчетам, значения длин валентных связей C-N и N-N располагаются в диапазоне $1.46\text{--}1.49 \text{ \AA}$, длин связей NO – $1.20\text{--}1.22 \text{ \AA}$, валентные углы – $126\text{--}129^\circ$.

Интерпретация спектра фундаментальных колебаний и оценки интенсивностей полос в ИК- и КР-спектрах нитроурацилов представлены в табл. 1–4. Из рассмотрения исключены полосы низкой интенсивности, как не представляющие интерес для задачи спектральной идентификации соединений.

Таблица 1

Интерпретация колебаний симметричных димеров 1-нитроурацила

Форма колебан	$\nu_{\text{эксп}}$ [4]	$\nu_{\text{анг}}$	8---9		9---10		Форма колебан	$\nu_{\text{эксп}}$ [1]	$\nu_{\text{анг}}$	8---9		9--10	
			ИК	КР	ИК	КР				ИК	КР	ИК	КР
Q, β, γ	1644	1629	56	95	43	115	γ, Q, ρ_{NO}	749	732	77	11	87	15
β_{NH}, Q	1432	1451	69	35	14	109	$\beta_{C=O}$	608	625	28	6.1	49	22
β, Q, β_{NH}	1386	1394	105	19	125	27	γ		591	7.6	4.8	52	6.0
$Q, \gamma, \beta_{C=O}$	1358	1335	260	5.0	172	0.8	γ	538	537	55	6.4	45	6.5
β, Q	1320	1274	163	95	186	129	γ	—	336	51	14	94	23
β, Q	1188	1174	186	60	251	86	ρ	—	963	3.4	4.8	19	7.6
β, Q	—	1100	48	1.5	30	1.3	ρ	802	808	48	2.8	58	3.0
q_{NN}	—	1001	572	1.8	664	1.9	$\chi, \rho_{C=O}$	760	741	79	19	70	16
Q, γ	963	929	69	11	255	13	$\chi, \beta_{C=O}$	388	386	73	8.2	35	11

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

Таблица 2

Интерпретация колебаний симметричного (7---8) димера 3-нитроурацила

Форма колебан	$\nu_{\text{эсп}}$ [1]	$\nu_{\text{анг}}$	Мономер		Димер		Форма колебан	$\nu_{\text{эсп}}$ [1]	$\nu_{\text{анг}}$	Мономер		Димер	
			ИК	КР	ИК	КР				ИК	КР	ИК	КР
β, Q, γ	1648	1633	91	21	268	36	Q, β, γ	1063	1045	6.8	2.6	60	7.1
β_{NH}, Q	1504	1516	—	—	139	90	q_{NN}, γ, Q	—	998	28	10	71	17
	1471	1465	74	8.5	—	—	$\gamma, \rho, \rho_{\text{C=O}}$	801	783	51	10	119	20
$\beta, \beta_{\text{NH}}, Q$	1389	1384	3.8	3.3	68	7.3	$\rho_{\text{C=O}}, \chi$	751	735	22	0.0	15	0.5
$Q, \beta, \beta_{\text{C=O}}$	1360	1367	9.9	8.8	26	32	$Q, \rho_{\text{C=O}}, \chi$	712	702	26	1.2	30	4.1
$\beta, \beta_{\text{NH}}, Q$	1257	1225	—	—	238	3.7	ρ_{NN}	—	554	62	1.0	50	7.4
	1218	1196	55	7.2			$\beta_{\text{C=O}}$	541	527	22	5.2	122	13
Q, β_{NN}	1142	1166	74	10	42	52	$\gamma, \beta_{\text{C=O}}$	415	420	1.1	9.3	17	21
β, Q	1108	1072	23	9.5	4.3	32	γ	—	280	16	4.6	41	10

Оценка ангармонического смещения полос осуществлялась в рамках соотношения теории возмущения

$$E_v = \nu_s \left(n_s + \frac{1}{2} \right) + \chi_{sr} \left(n_s + \frac{1}{2} \right) \left(n_r + \frac{1}{2} \right); \quad (1)$$

здесь ν_s — частоты гармонических колебаний; n_s — набор квантовых чисел.

Расчеты ангармонических констант χ_{sr} осуществлялись по методике, апробированной в работах [2, 3]. Оценки ангармонических силовых констант заимствованы из работ [2–4].

В представленных таблицах результаты теоретической интерпретации колебаний нитроурацилов сопоставлены с данными численного эксперимента по метилзамещенным урацила [4]. Выбор продиктован тем, что указанные монозамещенные урацила наиболее полно представлены в реальном оптическом эксперименте по ИК- и КР-спектрам. При этом экспериментальное

и теоретическое отнесение фундаментальных колебаний считается устоявшимся [5–8].

Для 1-нитроурацила (табл. 1) возможно существование двух типов димеров с сильной водородной связью ($\text{N}_3\text{H}_9\text{---O}_8\text{C}_2$ и $\text{N}_3\text{H}_9\text{---O}_{10}\text{C}_4$). В качестве признака спектральной идентификации димеров можно использовать интенсивность полосы $\sim 930 \text{ см}^{-1}$ в ИК-спектре, интерпретированную как колебания пиримидинового кольца (Q, γ), а также полосы, отнесенные к валентному и неплоскому деформационным колебаниям связи N_3H_9 и валентному колебанию связи C=O (табл. 4). Здесь явным признаком является смещение положения спектральных полос, достигающее величины $\sim 100 \text{ см}^{-1}$ для валентных колебаний связи NH и наличие дублета ($\Delta \sim 100 \text{ см}^{-1}$) для валентных колебаний связей C=O в димере 9---10. Отличительной особенностью 1-нитроурацила является сильная по интенсивности полоса, интерпретированная как валентное колебание связи N-N (q_{NN}).

Таблица 3

Интерпретация колебаний симметричных димеров 5- и 6-нитроурацилов

Форма колебан	$\nu_{\text{эсп}}$ [1]	$\nu_{\text{анг}}$	Мономер		7---8		8---9		9--10	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
5-нитроурацил										
Q, β, γ	1643	1635	188	46	403	102	292	107	255	77
$\beta_{\text{NH}_2} Q$	1464	1478	106	11	—	—	193	29	192	29
$\beta_{\text{NH}_2} Q$	1434	1445	—	—	—	—	6.6	52	37	46
	1388	1399	6.3	2.1	244	23	—	—	—	—
$Q, \beta_{\text{NH}_2}, \beta_{\text{C=O}}$		1363	55	4.6	—	—	207	3.8	132	5.0
Q, β, γ	1327	1322	—	—	1040	260	952	—	—	—
		1296	306	42	—	—	—	134	564	77
$Q, \beta_{\text{NH}_2}, \beta$	1234	1239	—	—	185	9.4	—	—	—	—
	1190	1190	67	4.8	—	—	162	7.5	110	13

Окончание табл. 3

Форма колебан	$\nu_{\text{всп}}$ [1]	$\nu_{\text{анг}}$	Мономер		7---8		8---9		9---10	
			ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР	ИК	КР
Q, β , γ	1178	1153	63	1.6	173	8.0	113	4.8	78	1.3
Q, γ	—	1080	0.2	1.2	4.2	9.2	23	5.2	15	4.5
Q, γ	954	942	6.1	1.8	—	—	16	2.2	66	11
Q, γ	788	767	0.5	21	29	55	5.9	51	1.1	52
$\beta_{\text{C=O}}$	727	736	4.3	5.6	65	22	15	11	33	9.4
γ , $\beta_{\text{C=O}}$	602	620	26	0.6	113	1.3	153	2.3	44	4.4
γ	540	538	5.4	3.2	33	19	37	5.7	55	4.8
$\beta_{\text{C=O}}$	391	388	14	3.3	41	8.6	32	6.0	80	4.7
χ , ρ_{NH} , $\rho_{\text{C=O}}$	756	760	93	2.5	140	5.5	38	5.5	52	4.2
χ , ρ_{NH} , ρ_{NN}	—	493	20	1.0	17	1.3	26	2.2	29	2.6
6-нитроурацил										
Q, β , γ	1663	1660	11	86	18	153	13	182	0.9	180
β_{NH7} , β	1488	1475	203	11	729	61	410	21	347	61
	1422	1442	—	—	—	—	4.8	40	59	94
β_{NH9}	1363	1380	0.3	6.8	233	17	—	—	—	—
Q, γ , $\beta_{\text{C=O}}$	1329	1359	19	24	30	7.9	282	2.6	54	17
β , β_{NH}	—	1277	5.7	3.3	18	30	2.9	6.2	41	6.3
Q, β	1183	1175	26	15	60	46	50	22	27	34
Q, β , β_{NH}	1063	1065	34	5.1	36	23	63	8.4	54	10
γ , ρ_{CN}	1014	997	0.6	2.7	27	21	6.1	9.0	9.2	17
Q, β , β_{NH}	—	984	15	7.9	42	11	10	9.8	28	23
Q, ρ_{CN} , γ	920	903	35	0.8	65	1.6	133	6.6	156	7.4
γ	570	572	4.3	8.4	27	33	58	14	33	14
γ , $\beta_{\text{C=O}}$	526	525	14	1.4	103	2.5	33	3.6	42	4.8
γ , $\beta_{\text{C=O}}$	386	413	30	1.9	58	3.4	121	6.0	134	6.3
β_{CN}		208	7.3	0.1	38	0.3	9.5	0.1	14	0.1
ρ	832	858	34	3.3	141	5.0	59	6.2	53	8.0
ρ_{NH} , $\rho_{\text{C=O}}$, χ	731	748	84	0.9	108	1.8	41	1.8	52	1.8

Для 3-нитроурацила имеется один тип димера с сильной водородной связью (табл. 2). В отличие от 1-нитроурацила интенсивность полосы в ИК-спектре, отнесенной к валентному колебанию связи N-N, на порядок ниже, низкочастотном диапазоне в ИК-спектре заметной интенсивностью обладают полосы, отнесенные к деформационному колебанию связи C=O ($\beta_{\text{C=O}}$) $\sim 530 \text{ см}^{-1}$ и неплоскому деформационному колебанию этой связи ($\rho_{\text{C=O}}$) $\sim 800 \text{ см}^{-1}$.

Для спектральной идентификации димеров 5-нитроурацила (табл. 3) можно использовать интенсивность и положение полос в диапазоне $1200\text{--}1500 \text{ см}^{-1}$, отнесенных к деформацион-

ным колебаниям связей NH (β_{NH}), также отличающуюся для различных димеров по интенсивности в ИК-спектре полосу $\sim 760 \text{ см}^{-1}$, интерпретированную как неплоское деформационное колебание связи C=O ($\rho_{\text{C=O}}$), и крутильное колебание связей урацилового цикла. Для димеров 7---8 и 8---9 характерной является полоса $\sim 600 \text{ см}^{-1}$, отнесенная к колебаниям валентных углов ароматического кольца (γ). Можно использовать положение и интенсивность полос, интерпретированных как неплоские деформационные колебания связей NH в диапазоне $600\text{--}670 \text{ см}^{-1}$, а также дублет ($\Delta \sim 80 \text{ см}^{-1}$) для валентного колебания связи C=O в димере 9---10 (табл. 4).

Таблица 4

Интерпретация валентных (q_{NH}) и неплоских деформационных (ρ_{NH}) колебаний связей NH валентных колебаний ($q_{C=O}$) связей C=O в димерах нитроурацила

Мономер			Димер 7---8			Димер 8---9			Димер 9---10		
$\nu_{анг}$	ИК	КР	$\nu_{анг}$	ИК	КР	$\nu_{анг}$	ИК	КР	$\nu_{анг}$	ИК	КР
1-нитроурацил ($\nu(q_{NH})=3424, 3139-3198$; $\nu(\rho_{NH})=669, 889, 915$; $\nu(q_{C=O})=1740$)											
3464	76	89	—	—	—	3263	1654	598	3161	2651	804
1803	590	8.0	—	—	—	1769	1142	21	1803	1026	20
1762	537	86	—	—	—	1754	1416	167	1712	1683	265
659	37	3.2	—	—	—	854	199	0.1	889	172	0.2
3-нитроурацил ($\nu(q_{NH})=3462, 3082-3164$; $\nu(\rho_{NH})=566, 840, 861$; $\nu(q_{C=O})=1670, 1730$)											
3505	116	109	3167	3169	960	—	—	—	—	—	—
1775	319	20	1765	391	117	—	—	—	—	—	—
1744	719	27	1711	2529	10	—	—	—	—	—	—
555	62	1.0	827	145	1.3	—	—	—	—	—	—
5-нитроурацил ($\nu(q_{NH})=3480, 3119-3180$; $\nu(\rho_{NH})=552, 669, 888-909$; $\nu(q_{C=O})=1670-1770$)											
3499	130	116	3528	157	150	3496	255	205	3494	266	273
3469	79	82	3188	3767	1116	3238	1928	636	3197	2254	665
1793	590	27	1777	674	82	1774	565	71	1798	1094	51
1770	605	27	1759	2782	47	1750	2227	61	1728	1734	119
669	87	1.8	864	190	2.6	869	193	0.2	883	180	0.3
605	34	1.5	677	73	4.9	612	139	1.5	623	136	1.7
6-нитроурацил ($\nu(q_{NH})=3424, 3132-3248$; $\nu(\rho_{NH})=587, 665, 856-911$; $\nu(q_{C=O})=1700-1770$)											
3474	38	115	3472	153	145	3472	329	114	3472	357	150
3473	212	27	3176	2327	676	3224	2062	675	3187	2550	743
1790	634	15	1754	525	210	1754	898	151	1793	1159	28
1744	566	87	1739	2735	30	1737	1926	72	1705	1657	317
671	73	1.9	815	109	1.3	879	184	0.1	895	179	0.1
574	31	1.4	665	54	4.7	584	92	2.4	590	87	2.4

Таблица 5

Интерпретация колебаний нитрофрагмента в димерах нитроурацила

Форма колеб	$\nu_{жсн}$ [12,13]	7--8			8---9			9---10		
		$\nu_{анг}$	ИК	КР	$\nu_{анг}$	ИК	КР	$\nu_{анг}$	ИК	КР
		3-нитроурацил			1-нитроурацил					
q_{NO}	—	1707	673	7.9	1666	264	13	1666	373	12
q_{NO}	—	1284	686	25	1281	163	95	1282	186	129
β_{ONO}	—	832	344	11	830	280	22	831	270	27
β_{NNO}	—	578	0.0	6.5	458	36	10	723	28	6.5
5-нитроурацил										
q_{NO}	1525	1591	156	15	1570	199	19	1567	135	17
q_{NO}	1351	1352	234	140	1330	475	195	1328	601	218
β_{ONO}	852	852	53	4.0	842	59	3.1	842	89	4.0
β_{NNO}	—	456	71	4.3	449	51	5.9	446	45	7.5
6-нитроурацил										
q_{NO}	1617	1602	725	17	1599	564	28	1600	522	36
q_{NO}	1350	1341	425	161	1339	640	224	1337	802	236
β_{ONO}	841	793	70	23	793	51	26	794	49	27
β_{NNO}	—	447	4.4	13	453	17	15	452	32	14

Для спектральной идентификации димеров 6-нитроурацилов (табл. 3) можно использовать положение и интенсивность полос, отнесенные к деформационным колебаниям связей NH (диапазон 1300–1500 см^{-1}), полосы деформационных колебаний валентных углов пиримидинового цикла (γ) и связей C=O ($\beta_{\text{C=O}}$), полосы, отнесенные к неплоским деформационным колебаниям связей CH (ρ) и C=O ($\rho_{\text{C=O}}$), а также полосы, интерпретированные как неплоские деформационные колебания связей NH (табл. 4). К надежному признаку его идентификации следует отнести и дублет ($\Delta \sim 90 \text{ см}^{-1}$) в димере 9---10.

Положение и интенсивность полос валентных (ν_{NO}) и деформационных (γ_{ONO} , β_{CNO} , β_{NNO}) также можно использовать для идентификации типа замещения в нитроурацилах. Об этом свидетельствуют данные, приведенные в табл. 5.

Заключение

Результаты представленных модельных расчетов структуры и спектра димеров нитроурацилов дают основание утверждать, что метод функционала плотности DFT/B3LYP позволяет получить достоверные предсказательные оценки параметров адиабатического потенциала пиримидиновых оснований нуклеиновых кислот, выявить признаки спектральной идентификации в зависимости от положения заместителя и его электронной структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. – 436 с.
2. Структурно-динамические модели димеров моногидроксиурацила со слабой водородной связью / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. Н. Гречухина, О. М. Алыкова, А. Р. Гайсина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 2(22). – С. 56–63.
3. Системный анализ результатов модельных расчетов параметров адиабатического потенциала 5X-замещенных урацила в конденсированном состоянии / М. Д. Элькин, В. В. Смирнов, Е. А. Джалмухамбетова, О. Н. Гречухина, О. М. Алыкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3(23). – С. 78–85.
4. Элькин, П. М. Структурно-динамические модели и колебательные спектры нитробензола и нитропиримидинов / П. М. Элькин, Э. К. Костерина, В. Ф. Пулин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 72. – № 4. – С. 450–453.
5. Chang Z. G., Ting D.N., Tan Y.C., Ying B., Mo Y.J. A study of DFT and surface enhanced Raman scattering in silver colloids for thymine // J.Mol. Structure. – 2007. – V. 826. – P. 64–67.
6. Hernandez-River S.P., Castillo J. Ab initio and DFT calculation and vibrational analysis of 2,4,6-trinitrotoluene // Vibrational spectroscopy. – 2010. – V. 53. – N.2, P. 248–259.
7. Kleza V., Bekesiene S. Theoretical investigation of electronic structure and vibrational spectra of conformers of trinitrotoluene and trinitrophenol // Acta physica PoloniaA. – 2011. – V. 119. – N2. – P. 193–198.
8. Tabish R., Ahmad S. Computational studies of vibrational spectra and molecular properties of 6-methyluracil using HF, DFT and MP2 methods // Indian J. Phys. – 2011. – V. 85(2). – P. 239–260.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.451.56

В. И. Аверченков, В. К. Гулаков, А. О. Трубаков, Е. О. Трубаков, В. Н. Матюшин

АНАЛИЗ И НЕКОТОРАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ДОСТУПА К ДАННЫМ

Брянский государственный технический университет

aver@tu-bryansk.ru, gvk10@yandex.ru, TrubakovAO@mail.ru, TrubakovEO@gmail.com,
v.matyushin@gmail.com

Рассмотрены некоторые общие принципы классификации методов доступа к различным группам данных. В рамках каждой группы рассмотрены соответствующие структуры данных, позволяющие их эффективную обработку. Описаны отличительные особенности структур данных соответствующих различным методам доступа, достижения и проблемы в их применении.

Ключевые слова: одномерные, многомерные, метрические, пространственно-временные методы доступа, методы доступа к данным большой размерности, структуры данных, индексирование исторических, текущих и будущих данных, контекстно-зависимое хеширование.

V. I. Averchenkov, V. K. Gulakov, A. O. Trubakov, E. O. Trubakov, V. N. Matyushin

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF DATA ACCESS METHODS

Bryansk State Technical University

This article describes some general classification principles of access methods to different groups of data. Associated data structures were reviewed in each group, that allow their effective processing. Distinctive features of data structures been described also, that respective to the various access methods, achievements and problems in their application.

Keywords: one-dimensional, multi-dimensional, metric, spatio-temporal access methods, methods of data access high-dimensional, data structures, indexing historical, present and future data, context-sensitive hashing.

Введение

Процесс перехода к информационному обществу породил целый ряд новых проблем, связанных с наличием огромных и не всегда упорядоченных объемов информации. Эти проблемы ставят более остро вопрос поиска нужной информации и ее обработки, а соответственно и методов доступа к данным.

Различают физический и логический уровни доступа. Наиболее сложным в представлении является логический уровень, определяемый математическим и программным обеспечением. При этом особое внимание уделяется методам доступа и структуре хранения данных. В некоторых ситуациях, например системы реального времени, время доступа и обработки информации является особенно критичным.

На сегодняшний день не существует общепризнанной классификации методов доступа к данным и соответствующих структур. Это связано с тем, что данная область является достаточно молодой и не вся терминология и под-

ходы еще устоялись. В представленной работе сделана попытка предложить некоторую условную классификацию, которая была разработана авторами после анализа доступных в открытом виде источников литературы.

Общая классификация методов доступа

С учетом специфики информации и запросов пользователей необходимы эффективные инструменты для построения стратегии доступа к интересующей информации. Эта стратегия зависит от модели данных и методов доступа к ним. Методы доступа можно классифицировать следующим образом:

- одномерные методы доступа;
- многомерные методы доступа;
- метрические методы доступа;
- методы доступа к данным большой размерности;
- пространственно-временные методы доступа.

Одномерные методы доступа основаны на концепции «запись», которая связана с уникальным идентификатором («ключом»). Идентификатор предназначен для отличия одной последовательности от другой.

Существуют четыре основных типа одномерных методов доступа: последовательный метод доступа (*SAM*); индексно-последовательный метод доступа (*ISAM*); прямой метод доступа (*DAM*) и виртуально-последовательный метод доступа (*VSAM*). Эти методы часто называются контекстно-зависимыми [1].

Основная идея контекстного доступа состоит в зависимости методов доступа от ключа, который используется для принятия решения, где хранить записи и как их искать. Таким образом, содержание записи влияет на доступ к записи.

Исторически сложилось, что в 60-х годах прошлого века внимание уделялось главным образом этому типу методов. Современные СУБД строятся с использованием контекстно-зависимых методов, таких как последовательные отсортированные и несортированные файлы записей с ключами, статические или динамические хэш-файлы, индексные файлы,

кластерные индексированные таблицы [2].

Однако значительно чаще мы выбираем объект по нескольким параметрам, а это значит, что мы ведем многомерный поиск. Чтобы он был эффективен, необходимо использовать многомерные методы доступа, соответствующие структуры данных и алгоритмы. В основном они предназначены для обработки информации о пространственных объектах, которые представляются точками, отрезками, многоугольниками, многогранниками и т. д. [3].

Многомерные методы доступа

Многомерные методы являются одной из наиболее востребованных и бурно развивающихся категорий методов индексирования. Это связано с требованиями современного мира по многоключевому доступу, а также повсеместному распространению ГИС систем. При этом в процессе решения практических задач бывает очень сложно ориентироваться среди появившегося разнообразия алгоритмов и структур. В данной работе авторами сделана попытка систематизировать и классифицировать такие подходы (см. рис. 1).

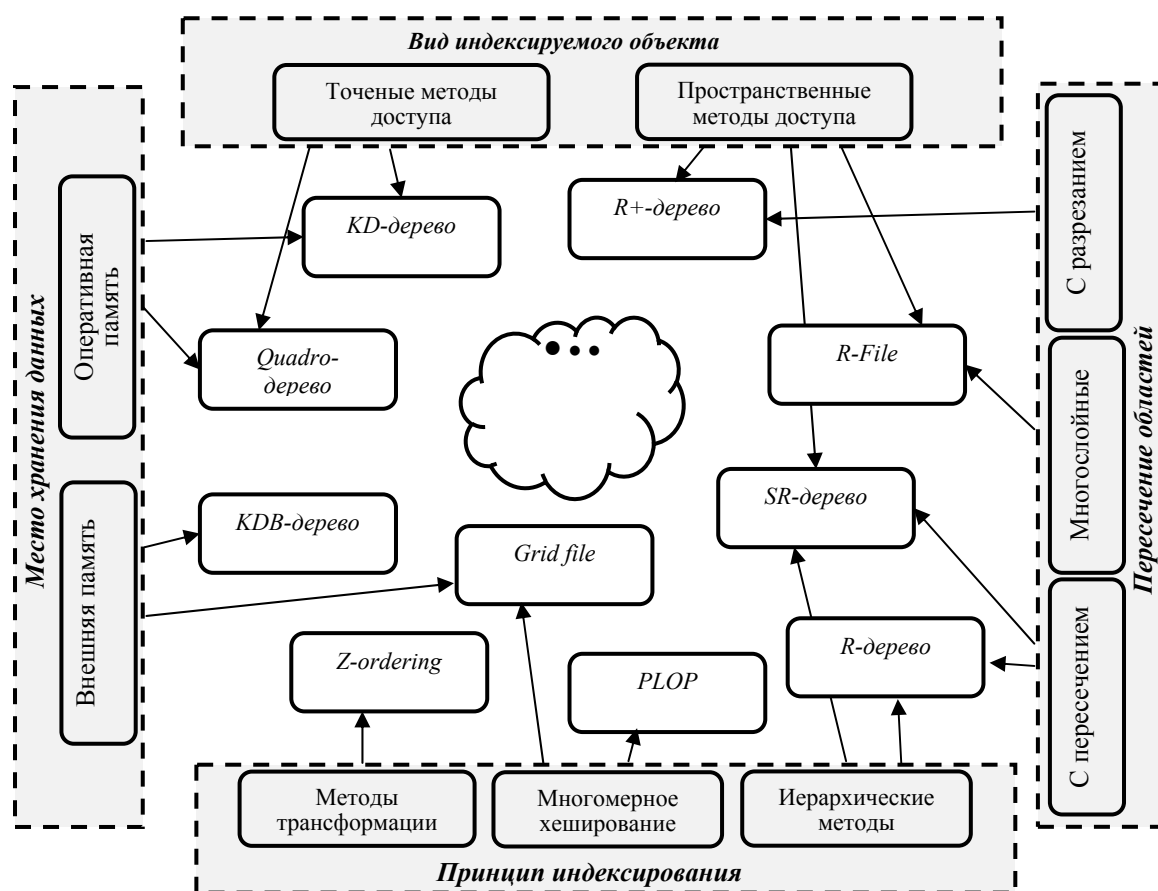


Рис. 1. Классификация многомерных методов доступа

Самым распространенным вариантом классификации является деление всех методов на две большие группы [3, 4]: точечные методы доступа (*PAM*) и пространственные (*SAM*). К первой категории можно отнести все методы, в которых объект воспринимается как точка многомерного пространства характеристик (*KD*-дерево [5], *KDB*-дерево [6, 7], *Quad*-дерево [3] и т. д.). Это очень востребованная категория для систем с многоключевыми запросами и интеллектуальных систем. Ко второй категории относятся методы, в которых объект имеет свои геометрические размеры в пространстве и его нельзя рассматривать как точку (*R*-дерево [8], *SR*-дерево [9], *Grid*-файл [10] и т. д.). Это более сложные методы, появление которых связано с ГИС. Однако эта категория является более универсальной, чем и объясняется ее популярность и разнообразие применений.

Классификация методов по типу индексируемого объекта отвечает на целый ряд вопросов, однако никак не отражает основополагающие принципы самого индексирования. Поэтому в дальнейшем, основываясь на трудах Г. Самита [11], был предложен другой вариант классификации, в котором все методы делятся на три категории: иерархические методы доступа (*KD*-дерево [5], *R*-дерево [8], *Quad*-дерево [3]), многомерное хеширование (*PLOP*-хеширование [12], *MOLPHE* [13], *Excel* [10]), методы трансформации (кривая *z*-порядка [14], кривая Пеано [15], кривая Гильберта [16]).

Наиболее популярна на сегодняшний день первая категория – методы на основе бинарных или сильноветвящихся деревьев (*KD*-дерево [5], *Quad*-дерево [3], *KDB*-дерево [6], *LSD*-дерево [17], *Buddy*-дерево [18], *BANG* файл, *G*-дерево, *HB*-дерево [19], *BV*-дерево, *SS*-дерево [20] и т. д.). Основной принцип этих методов заключается в объединении рядом находящихся объектов в одну общую область (называемую листом или узлом с данными), которые, в свою очередь, объединяются в большие области (называемые внутренними или индексными узлами). Внутренние узлы дерева предназначены только для разбиения пространства на подпространства и соответственно уменьшения области поиска. Причем вся область разбивается рекурсивно от корня к листу. Таким образом, процедура поиска, начавшаяся в корне и дошедшая до листа, проверяет на соответствие небольшой объем данных.

Альтернативой иерархическим структурам является хеширование. При правильном выборе

алгоритма хеширование может стать самым эффективным методом доступа. Однако гарантировать эффективность не всегда возможно. В работе [3] дается подробный анализ этих методов и областей их применения. К методам многомерного хеширования относятся файл решетка и его разновидности [10], *Excel* [10], *Twin Grid* файл [21], *MOLPHE* [13], квантильное хеширование, *PLOP*-хеширование [12], *Z*-хеширование и т. д.

Также представляют определенный интерес методы трансформации (кривая Пеано [15], *N*-деревья [22], *Z*-упорядочивание [14], кривая Гильберта [16], кривая на основе кода Грея [23]). Исторически именно эта группа алгоритмов была первой попыткой ускорить операции обработки многомерных данных. Однако назвать эти алгоритмы многомерными в полной мере нельзя. Основная суть этих методов сводится к преобразованию многомерной задачи в одномерную.

Однако даже подход на основе трудов Г. Самита отражает далеко не все особенности методов доступа. В частности, он характеризует класс алгоритмов, но никак не показывает область применимости, что также затрудняет правильный выбор структуры. Достаточно традиционным является деление на структуры данных для оперативной памяти, способные обрабатывать малые и средние объемы данных (к ним можно отнести *KD*-дерево [5], *BSP*-дерево, *Quad*-дерево [3], *BD*-дерево) и структуры данных, использующие внешнюю память (многомерное хеширование, *KDB*-дерево [6], *LSD*-дерево [17], *hB*-дерево [19]).

В структурах первой группы изначально минимизировалось количество процессорных операций. Чаще всего это бинарные деревья. Для оперативной памяти это приемлемо, так как при этом обеспечивается наиболее быстрый поиск элементов при небольшой нагрузке на процессор (логарифмическая скорость поиска). Однако если само дерево хранится в медленной внешней памяти, то структуры подобного класса демонстрируют не самые лучшие показатели. В этом случае лучше использовать сильноветвящиеся деревья и хеширование. В подобных структурах в каждой вершине размещен не один многомерный объект, а целый набор таких объектов. Такие структуры стараются оптимизировать не только по отношению к времени работы *CPU*, но и по числу обращений к жесткому диску, причем именно обращения

к жесткому диску считают приоритетной операцией.

Другим интересным вариантом классификации можно считать вариант, предложенный Б. Сигиром и Г. Крейгилом [18]. Они разделили все методы на группы в соответствии с тремя критериями: возможно ли пересечение внутренних индексных областей структуры, поддерживается ли интервальное разбиение, покрывает ли структура все пространство. Принимая во внимания эти три критерия и по-разному их комбинируя, можно выделить восемь групп алгоритмов (2^3). Однако не для всех комбинаций в настоящее время разработаны структуры. Да и не все группы представляют интерес на практике.

Еще одним вариантом классификации, заслуживающим особого внимания, можно считать классификацию пространственных структур О. Гюнтера. Согласно его анализу, деление пространственных методов доступа нужно производить согласно признаку оперирования внутренними индексными узлами (областями). При этом О. Гюнтер выделил три типа структур.

Первая группа допускает внутреннее перекрытие индексных регионов (R -дерево, R -Link-дерево, R -дерево Гильберта, R^* -дерево, SS -дерево, SR -дерево, TV -дерево, X -дерево, P -дерево Шиветса, SKD -дерево, GBD -дерево, $PLOP$ -хеширование и т. д.). В этом случае разные наборы данных могут занимать одинаковую часть пространства, но каждый пространственный объект ассоциируется только с одной из групп. Положительной стороной таких методов является то, что можно работать с данными в их первичном пространстве (без преобразований). Однако в дальнейших исследованиях показано, что в ряде случаев такое поведение может привести к значительному пересечению индексных узлов и уменьшению производительности.

Вторая группа методов основана на разделении одного объекта на несколько подобъектов (R^+ -дерево, $Cell$ -дерево, расширенное KD -дерево, $Quad$ -дерево и т. д.). Основная цель подхода – избежать перекрытия регионов. Но это преимущество может привести к разрыву объектов, увеличению ресурсных затрат и снижению производительности метода.

Третья группа методов доступа ориентирована на многослойные структуры. Этот подход может рассматриваться как вариант с пересекающимися областями, в котором пересечение возможно только на разных слоях. Представи-

телями этих методов являются многослойные файлы решетки, R -файлы и т. д.

Однако какой бы из рассмотренных вариантов классификации многомерных методов доступа не был бы выбран, он не может считаться абсолютно верным, так как в последнее время появляются структуры, в которых происходит скрещивание всех известных методов. Такие гибридные алгоритмы невозможно отнести ни к одной из классификационных групп. К тому же методы индексирования многомерного пространства бурно развиваются в последние десятилетия. Появляются алгоритмы, основанные на совершенно новых принципах и имеющие свойства, нехарактерные для всех предыдущих структур. Такие структуры и алгоритмы вообще могут не вписываться в общеизвестные классификации и правила.

Метрические методы доступа

В последнее время, с развитием интеллектуальных методов поиска и многокритериальных задач, все большую популярность набирают метрические методы доступа. Эти методы имеют дело с относительным расстоянием объектов до выбранных точек, названных опорными или точками зрения [24]. Во многих приложениях трудно задать определенные характеристики объекта. В этом случае единственной доступной информацией является функция расстояния, которая указывает на степень схожести (или различия) между всеми парами объектов. Таким образом, поиск облегчается с помощью индексации объектов по относительному расстоянию от других объектов. Представителями этих методов являются: *Vantage Point Tree* (VP -дерево и его разновидности), дерево бисектрис (BST -дерево), MB -дерево, $GNNAT$ [25], Gh -дерево [26], граф kNN , методы матрицы расстояний $AESA$ и $LAESA$, а также наиболее эффективные из этой группы – M -дерево (M -Tree) [27].

Метрические структуры данных обычно используют либо сферическое, либо гиперплоскостное разбиение пространства данных. При сферическом разбиении на каждом шаге построения метрического дерева выбирается заданный опорный объект p и рассчитывается среднее расстояние r от него до всех остальных объектов. Затем все остальные объекты разбиваются на два подмножества: объекты, расположенные внутри сферы с центром в опорном объекте p и радиусом r , и объекты, распо-

женные за пределами этой сферы. Далее процесс рекурсивно повторяется для обоих подмножеств. Для построения таким способом нужно знать лишь расстояния между объектами. Недостатком этого метода является неравномерность разбиения пространства данных: во внутренней части сферы находится гораздо больше объектов данных, чем во внешней части. Это приводит к увеличению времени выполнения поисковых запросов. Примером структуры данных, использующей сферическое разбиение, является *VP*-дерево.

Разбиение обобщенными гиперплоскостями является более равномерным. Обобщенным такое разбиение называется потому, что если объекты являются точками в n -мерном Евклидовом пространстве, то разбиение осуществляется гиперплоскостью размерностью $n-1$. Обобщенная гиперплоскость определяется точками p_1 и p_2 , $p_1 \neq p_2$ и состоит из множества точек q , удовлетворяющих условию $d(q, p_1) = d(q, p_2)$. Считается, что точка x принадлежит стороне плоскости, соответствующей p_1 , если $d(x, p_1) < d(x, p_2)$ [26]. Первой предложенной метрической структурой данных, использующей гиперплоскостное разбиение, является обобщенное гиперплоскостное дерево (*Gh*-дерево).

При выполнении поиска ближайшего соседа или диапазонного поиска гиперплоскости используются для исключения узлов из дерева поиска [28]. Левое поддереву посещается, если $d(q, p_1) - r < d(q, p_2) + r$. Правое поддереву посещается, если $d(q, p_2) - r \leq d(q, p_1) + r$. При этом нужно учитывать, что оба условия могут выполняться одновременно.

Преимуществом гиперплоскостного разбиения является его симметричность и сбалансированность, достигающаяся за счет того, что опорные точки выбираются случайным образом. При этом есть модификации и обобщения данного подхода для внешней памяти, основанные на сильноветвящихся деревьях и множественном гиперплоскостном разбиении (GNAT [25]).

Перечисленные выше деревья могут работать только с одной мерой подобия. Это значит, что поиск похожих объектов осуществляется с использованием той же функции расстояния, которая используется при построении дерева. Однако в ряде случаев возникает потребность для одного и того же набора данных производить поисковые запросы, используя различные меры подобия. В работе [28] вводится понятие

мультимодальности – поддержки различных метрик. Структура данных, обладающая поддержкой мультимодальности, позволяет производить поисковые запросы с использованием различных функций расстояния (например в multi-modality GNAT [29]).

Многомерные методы доступа большой размерности

Проведенные многочисленные исследования выявили одну неприятную особенность – увеличение размерности сильно ухудшает качество многомерных методов доступа. Как правило, эти методы исчерпывают свои возможности при количестве измерений около 15. Только *X*-дерево достигает границы 25. После того, как эти методы начинают давать плохие результаты, остается только последовательное сканирование [30]. Для выхода из этой ситуации предлагается новая группа методов доступа – методы доступа к данным большой размерности. К представителям этих методов можно отнести *VA*-файлы, *VA+*-файлы, *LPC*-файлы, *IQ*-дерево, *A*-дерево, *P+*-дерево и т. д. [31].

Учитывая, что методы доступа к данным большой размерности работают хуже, можно облегчить им работу за счет получения приближенного результата. Для приближенного запроса, как правило, могут быть использованы две различные стратегии. В первой из них рассматривается только та часть базы данных, которая с большей вероятностью содержит результат. Как правило, эти методы основаны на кластеризации; к ним относятся *DBIN*, *CLINDEX*, *PCURE* [30].

Вторая стратегия предполагает расщепление базы данных на несколько частей с меньшими размерами и поиска в каждой из них по отдельности. Здесь можно выделить два основных подхода:

- случайное линейное отображение (представителем такого подхода является *MedRank*, использующий *B+*-деревья для индексации каждого произвольного отображения базы данных, и *PvS*-индекс, который состоит из комбинации итерационных прогнозов и кластеризации);
- контекстно-зависимое хеширование, которое основано на множестве контекстно-зависимых функций хеширования [32].

Пространственно-временные методы доступа

Пространственно-временные структуры предназначены для работы с объектами, которые

меняют свою форму или положение во времени [24]. При этом, несмотря на то, что область зародилась совсем недавно, появилось уже достаточно большое количество публикаций и подходов [33]. Однако состояние самой области математического развития данной категории еще далеко до идеала [34].

Основным критерием классификации методов этой категории является отношение к параметру времени. В зависимости от этого параметра все методы можно разделить на следующие виды (см. рис. 2):

- индексирование прошлого, т. е. методы ориентированы на получение траектории изменения положения объекта;
- индексирование настоящего, т. е. методы, основная цель которых – поддержание актуального текущего положения;
- методы с возможностью прогнозирования будущего;
- индексирование прошлого, настоящего и с возможностью прогнозирования будущего (обобщенные структуры данных).

Проблема методов индексации траектории движения или изменения объектов заключается в постоянно увеличивающемся объеме информации. Такое поведение может привести к чрезмерной нагрузке и большим требованиям к внешним хранилищам. Для преодоления перепол-

нения используются два подхода – отбор проб потока данных на определенную позицию времени или обновление информации только тогда, когда данные изменены. Первая группа структур позволяет сохранить всю историю изменения пространственного положения объектов. Эти данные в дальнейшем могут использоваться для создания различного рода отчетов или сбора статистических данных, на основе которых могут создаваться долгосрочные планы. Это и является основным их достоинством и областью применения [35].

Пространственно-временные схемы для индексации исторических данных можно разделить на три категории:

- первая категория включает в себя методы, которые управляют пространственными и временными аспектами в уже существующих пространственных методах;
- вторая категория методов основана на фиксации пространственной информации в определенном интервале;
- третья категория ориентируется на запросы траекторий, в то время как пространственные изменения отодвинуты на второй план.

К представителям этой группы относятся: *RT*-дерево, *3DR*-дерево, *STR*-дерево, *MR*-дерево, *HR*-дерево, *HR+*-дерево, *MV3R*-дерево, *PPR*-дерево, *TB*-дерево, *SETI*, *SEB*-дерево.

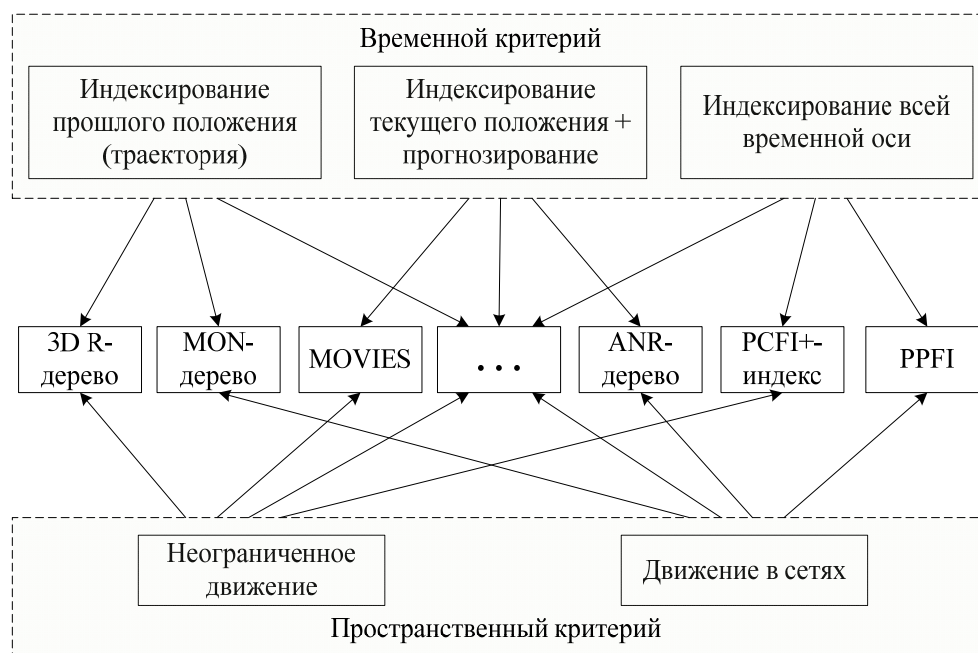


Рис. 2. Классификация пространственно-временных структур данных

В отличие от предыдущих методов, методы индексации данных, относящихся к текущему

времени, не сохраняют всю историю изменений. К таким методам относятся *2+3 R*-дерево,

2-3 *TR*-дерево, *LUR*-дерево и т. д. Основным назначением этой группы методов является предоставление инструментария для оперативного отслеживания и отображения текущих данных при любых нагрузках и скорости обновления. При этом на основании вспомогательной информации о характере движения (направления и скорости перемещения) эти методы могут позволять создавать кратковременные прогнозы на ближайшее будущее.

Решение подобных задач также сопряжено с рядом трудностей. Основная из них – это проблема увеличения скорости обработки поступающих запросов. В сфере практического применения может быть достаточно много объектов с часто меняющимися параметрами. Это приводит к тому, что индекс обновляется с задержками и предоставляет неактуальные результаты при поиске, что может привести к катастрофическим последствиям в некоторых случаях (например, при мониторинге движения поездов или самолетов запаздывание обновления информации крайне нежелательно, так как цена ошибки здесь очень большая).

Методы индексирования прошлого и настоящего с возможностью прогнозирования будущего (обобщенные структуры данных) должны ответить на вопросы о текущем и будущем положении движущихся объектов (*PMR-Quadtree* для движущихся объектов, двойственность трансформации, *SV*-модели, *PSI*, *PR*-дерево, *TPR*-дерево, *TPR**-дерева, *NSI*, *VCIR*-дерево, *STAR*-дерево, *REXP*-дерево). Эта группа структур включает в себя достоинства и недостатки структур остальных групп. Индексы этой категории являются наиболее актуальными для применения на сегодняшний день. Данные методы позволяют не только индексировать и обрабатывать траектории перемещения, но и оперативно реагировать на изменение положения объектов и строить кратковременные и долговременные прогнозы. Однако разработка этих методов сопряжена с максимальными трудностями и сталкивается с полным спектром проблем, присутствующим всем остальным категориям.

К настоящему моменту разработано более сотни различных структур и методов индексирования пространственно-временных данных. Все они имеют специфические инструменты для применения в различных сферах жизни людей, свои особенности и ограничения. Подробнее классификация и рекомендации описаны в работах авторов [33, 34, 36].

Заключение

В этой статье мы представили краткий обзор современного состояния в области развития методов доступа. Бурное развитие данной области и отсутствие на данный момент общепризнанной классификации и терминологии зачастую приводят к большим трудностям в правильном выборе нужного метода для решения той или задачи. Поэтому мы постарались систематизировать и привести в стройный вид те знания, которые доступны в открытом виде, а также показать узкие места и ограничения существующих подходов. При этом исследования проводились как на программном, так и на аппаратном уровне. Например, в работах [3, 37] технологии для хранения многомерных данных согласовывались с физической схемой хранения многомерных данных.

Рамки статьи не позволяют представить все методы доступа полностью с деталями и подробным анализом. Такое описание представлено в других работах авторов [2, 3, 26, 33]. Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении решения проблем, указанных выше.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. T. M. Connolly, C. E. Begg. Database Systems. A Practical Approach to Design, Implementation, and Management. Third Edition // Addison-Wesley Longman, Inc. – Pearson Education Ltd., 1995, 2002. – 1236 p.
2. В. К. Гулаков. Деревья: алгоритмы и программы. – М: Машиностроение-1, 2005. – 206 с.
3. В. К. Гулаков, А. О. Трубаков. Многомерные структуры данных: монография. – Брянск : БГТУ, 2010. – 387 с.
4. V. K. Vaishnavi. Multidimensional height-balanced trees / AEEE Trans. Connut. – 1984. – Vol. C-33, N 4. – P. 334–343.
5. V. Gaede, O. Günther. Multidimensional Access Methods // ACM Computing Surveys, Vol. 30, No. 2, 1998. – P. 170–231.
6. J. T. Robinson. The K-D-B-tree: A search structure for large multidimensional dynamic indexes // ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 1981. – P. 10–18.
7. R. Bayer. The universal B-tree for multidimensional indexing. Tech. Rep. 19639, Technische Universität München, Munich, Germany. 1996. – P. 198–209.
8. M. Kronacker, D. Banks. High-concurrency locking in R-trees // 21th International Conference on Very Large Data Bases, 1995. – P. 134–145.
9. N. Katayama, S. Satoh. The sr-tree: an index structure for highdimensional nearest neighbor queries // ACM SIGMOD international conference on Management of data, 1997. – P. 369–380.
10. J. Nievergelt, H. Hinterberger, K. C. Sevcik. The Grid File: An Adaptable, Symmetric Multikey File Structure // TODS, 1984. № 9(1). P. 38–71.

11. H. Samet. Applications of Spatial Data Structures. // Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
12. H.-P. Kriegel, B. Seeger. PLOP-hashing: A grid file without directory // In Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Data Engineering, 1988. – P. 369–376.
13. H.-P. Kriegel, B. Seeger. Multidimensional order preserving linear hashing with partial expansions // In Proceedings of the International Conference on Database Theory, LNCS 243, 1986. – P. 203–220.
14. J. Orenstein, T. H. Merrett. A class of data structures for associative searching // In Proc. 3rd ACM SIGACT-SIGMOD Symp. on Principles of Database Systems, 1984. – P. 181–190.
15. N. Bouteldja, V. Gouet-Brunet, M. Scholl. Back to the Curse of Dimensionality with Local Image Descriptors // CEDRIC Research Report no 1049, 2006. – 22 p.
16. D. Hilbert. Ueber die stetige Abbildung einer Linie auf ein Flächenstück // Mathematischen Annalen, 1891 – P. 459–460.
17. A. Henrich, H.-W. Six, P. Widmayer. The LSD tree: Spatial access to multidimensional point and non-point objects // Fifteenth International Conference on Very Large Data Bases, 1989. – P. 45–53.
18. B. Seeger, H.-P. Kriegel. The buddy-tree: An efficient and robust access method for spatial data base systems // 16th International Conference on Very Large Data Bases, 1990. – P. 590–601.
19. D.B. Lomet, B. Salzberg. The hB-tree: A robust multiattribute search structure // 5th IEEE International Conference on Data Engineering, 1989. – P. 296–304.
20. D. A. White, R. Jain. Similarity indexing with the ss-tree // Twelfth International Conference on Data Engineering, 1996. – P. 516–523.
21. A. Hutflesz, H.-W. Six, P. Widmayer. Twin grid files: Space optimizing access schemes // ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 1988. – P. 183–190.
22. M. White. N-trees: Large ordered indexes for multidimensional space // Technical report, Application Mathematics Research Staff, Statistical Research Division, US Bureau of the Census, 1981.
23. C. Faloutsos. Multiattribute hashing using Gray-codes // In Proc. ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data, 1986. – P. 227–238.
24. M. F. Mokbel, T. M. Ghanem, W. G. Aref. Spatio-temporal Access Methods // IEEE Data Engineering Bulletin, 2003. № 26(2). P. 40–49.
25. S. Brin. Near Neighbor Search in Large Metric Spaces // VLDB '95 Proceedings of the 21th International Conference on Very Large Data Bases. – 1995. – Pp. 574–584.
26. В. К. Гулаков, В. Н. Матюшин. Оценка эффективности использования метрических деревьев в приближенном поиске на основе обобщенного гиперплоскостного разбиения множества объектов // Вестник БГТУ. – 2013. – № 4(40). – С. 106–112.
27. E. Chavez, G. Navarro, R. Baeza-Yates, J. Marroquin. Searching in Metric Spaces // ACM Computing Surveys, 2001. № 33(3). P. 273–321.
28. B.-K. Yi, C. Faloutsos. Fast Time Sequence Indexing for Arbitrary L_p Norms // VLDB '00 Proceedings of the 26th International Conference on Very Large Data Bases. – 2000. – Pp. 385–394.
29. K. Onishi, M. Kobayakawa, M. Hoshi. mm-GNAT: Index Structure for Arbitrary L_p Norm // IPSJ Transactions on Database 3(3). – 2010. – Pp. 88–98.
30. K. Chakrabarti. Managing Large Multidimensional Datasets Inside a Database System. Phd Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign. Urbana, Illinois, 2001. – 239 p.
31. N. Moënné-Loccoz. High-Dimensional Access Methods for Efficient Similarity Queries. Technical Report N:0505, University of Geneva, Computer Vision and Multimedia Laboratory, 2005.
32. Kr. Markov. Multi-Domain Information Model. International Journal «Information Theories and Applications», ISSN 1310-0513. Vol. 11, 2004. № 4. – P. 303–308.
33. В. К. Гулаков, А. О. Трубаков, Е. О. Трубаков. Пространственно-временные структуры данных: монография. – Брянск : БГТУ, 2013. – 215 с.
34. В. К. Гулаков, Е. О. Трубаков, А. П. Болдырев, Б. Г. Кеглин. Моделирование пространственно-временных данных: достижения и проблемы // Вестник БГТУ. – 2013. – № 3. – С. 46–54.
35. J. K. Uhlmann. Satisfying general proximity/similarity queries with metric trees // Information Processing Letters 40 (1991). – 1991. – Pp. 175–179.
36. Averkhenkov, V. I. Gulakov, V. K. Mirochnikov, V. V. Potapov, L. A. Spasennikov, V. V. Trubakov A. O. Formation of the Color Palette for Content Based Image Retrieval Automated Systems World Applied Sciences Journal 24 (Information Technologies in Modern Industry, Education & Society): 01-06, 2013. P. 1–6.
37. S. W. Schlosser, J. Schindler, S. Papadomanolakis, M. Shao, A. Ailamaki, C. Faloutsos, G. R. Ganger. On Multidimensional Data and Modern Disks // Proceedings of the 4th USENIX Conference on File and Storage Technology (FAST '05). San Francisco, CA, 2005. – P. 13–16.

УДК 005.336+681.3

*Ю. М. Брумиштейн***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ РЕГИОНА: СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
КОМПОНЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ, ПОДХОДОВ К ОЦЕНКАМ, МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ*****Астраханский государственный университет**

brum2003@mail.ru

Проанализирована терминологическая база статьи, включая понятия «интеллектуальные ресурсы региона» (ИРР) и «интеллектуальный потенциал региона» (ИПР). Исследована номенклатура основных компонент ИРР/ИПР и их взаимодействие. Указаны возможные подходы к оценкам текущих и прогнозных величин ИРР/ИПР. Предложены модели оценки соответствия существующих ИПР/ИРР и потребностей в них социально-экономической сферы региона. Предложены математические модели изменения ИРР, учитывающие демографические и миграционные процессы, инвестиции в образование, процессы «самоподготовки» в сфере ИКТ и пр.

Ключевые слова: регион, интеллектуальные ресурсы, интеллектуальный потенциал, методы оценки, управление, моделирование, компонентная структура, человеческий капитал, объекты интеллектуальной собственности, информационно-коммуникационные технологии.

*Ju. M. Brumshteyn***REGIONAL INTELLECTUAL RESOURCES: SYSTEM ANALYSIS OF COMPONENT STRUCTURE,
APPROACHES TO ESTIMATES, METHODS OF MANAGEMENT, DYNAMIC MODELS****Astrakhan State University**

The terminology database of article, including the concepts «intellectual resources of the region» (IRR) and «intellectual potential of the region» (IPR) is analyzed. In article is investigated the nomenclature of main IRR/IEPER component and their interaction. Possible approaches to estimates of the current and expected IRR/IEPER sizes are specified. Author offered models of assessment for compliance existing IEPER/IRR and needs for them of regions social and economic sphere. Author offered mathematical models of IRR dynamics, considering demographic and migratory processes, investments into education, «self-preparation» processes in ICT- sphere and so forth.

Keywords: region, intellectual resources, intellectual potential, assessment methods, management, modeling, component structure, human capital, objects of intellectual property, information and communication technologies.

Введение

Развитие экономики, основанной на знаниях, делает все более актуальными вопросы управления «интеллектуальными ресурсами» (ИР) и «интеллектуальным потенциалом» (ИП) стран; «экономических кластеров» [17] (в том числе и на межрегиональном уровне); регионов [1, 2, 3]; организаций; отдельных людей. Управление ИП регионов (ИПР) должно базироваться на объективных оценках текущих ИР регионов (ИРР); обоснованных прогнозах их изменения в будущем – с учетом продолжительностей жизни людей, уровней их здоровья и пр.; наличии ИП управления регионами [16]. Хотя изучению ИРР и ИПР посвящено достаточно много публикаций ([1, 14, 15] и др.), ряд вопросов пока исследован недостаточно полно. Поэтому основной целью статьи был комплексный анализ проблематики, связанной с системным анализом, оценкой и моделированием ИРР.

**Анализ терминологической базы
по теме статьи**

Рассмотрим типичные варианты толкования терминов. В [4] «интеллектуальный капитал» (ИК) организации трактуется как представленный тремя компонентами: кадровой («человеческие» и «структурные» активы); интеллектуальной собственностью (нематериальные активы организации); маркетинговыми активами. При этом ИП организации рассматривается «как обобщенный показатель стоимости ее интеллектуального капитала».

По аналогии с [4] текущий ИК региона примем также трехкомпонентным: «человеческие ресурсы»; «интеллектуальная собственность организаций, зарегистрированных в регионе»; маркетинговые активы – включая «инновационный имидж» региона, оцениваемый потенциальными инвесторами, другими юридическими и физическими лицами (ЮиФЛ).

В [13] предлагается два определения для ИРР: короткое («совокупность трудовых ресурсов региональных предприятий с накопленным уровнем знаний, умений и профессиональных

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ. Грант № 14-06-00279 «Разработка методов исследования и моделирования объемов/структуры интеллектуальных ресурсов в регионах России».

навыков») и длинное («совокупность производственных, научных, организационно-управленческих, информационных, технологических, кадровых, маркетинговых, финансовых и прочих идей, технологий, методов, инструментов, разнообразных видов информации, имеющих коммерческую ценность и полученных как результат интеллектуального труда людей, работающих на предприятиях региона». Основной недостаток определений – неучет лиц, которые не работают на предприятиях, а также тех организаций, которые формально не являются «предприятиями» (например, органов государственного управления).

В [14] термин ИПР толкуется так «...потенциальные возможности региона создавать, накапливать и эффективно использовать интеллектуальные ресурсы для обеспечения высокого уровня его социально-экономического развития». При этом в [14] неявно предполагается, что эти возможности будут реализовываться при «максимально благоприятных» для региона условиях. Отказ от такого предположения делает целесообразным дифференциацию двух понятий: «максимальный ИПР» – для наиболее благоприятных условий; «реальный ИПР» – соответствует фактическим или прогнозируемым условиям, включая экономическое положение региона, уровень здоровья населения, безработицу и пр.

На динамику ИПР могут значительно влиять такие факторы: въезд-выезд из региона физических лиц (ФЛ) – «носителей» ИР, в том числе временный или постоянный выезд их за рубеж («утечка мозгов»); дистанционное использование ИПР, в том числе в рамках работы ФЛ в «виртуальных предприятиях»; внутрирегиональные инвестиции в высокотехнологичные сферы деятельности и т. п. Однако в существующих работах по моделированию (например, [10]) эти процессы, как правило, не учитываются. Объективно трудовая миграция, включая так называемую маятниковую, обеспечивает лучшее использование ИПР, в том числе в интересах «страны в целом». Как пример укажем ежедневные поездки сотен тысяч людей из Подмосковья и обратно для работы в Москве. Примеры «трансрегионального» использования ИПР без физического перемещения граждан: специалист в Астрахани осуществляет дистанционное администрирование сайта организации, находящейся в Москве; филиал зарубежной софтверной фирмы в Нижнем Новгороде осуществляет разработку специализированных программных средств (ПС).

Большинство трактовок ИПР и ИРР в «экономической литературе» – качественные, методы их количественной оценки не предлагаются.

Отметим также важность проблематики, связанной с ролью университетов в формировании ИПР [6, 9, 19]; формировании преподавательского корпуса вузов [7]; обеспечении интеллектуальной и информационной безопасности регионов [5, 8].

Анализ компонентной структуры ИПР

В большинстве источников ИПР связывают со знаниями и умениями (ЗиУ) работающих ФЛ. Однако целесообразно учитывать также ИПР обучающихся лиц, а также тех, кто временно не работает по различным причинам. При этом большинство ЗиУ имеют тенденцию к «моральному устареванию» со временем – особенно в наиболее быстро развивающихся отраслях (это приводит к снижению ИПР и ИПР). Для «объектов интеллектуальной собственности», имущественные права на которые принадлежат организациям и ФЛ, «базирующимся» в регионе, процессы «морального старения» также важны. Кроме того, по законодательству сроки действия имущественных прав на патенты достаточно ограничены.

В [14] как компоненты ИПР предлагаются следующие «потенциалы»: человеческий; образовательный; научный; инновационный; информационно-коммуникационный. Для каждого из них в [14] используется набор субкомпонент – «необходимость и достаточность» таких наборов, распределение элементов наборов между «потенциалами» никак не обосновываются.

В [15] описывается иной набор «компонент-потенциалов» ИПР: научно-технический; инновационный; образовательный; культурный. По [15] научно-технический потенциал региона включает в себя субкомпоненты: кадровую; организационную; финансовую; информационную; материально-техническую; правовую. Информационная субкомпонента по [15] – это «система научно-технических знаний и достижений (в виде открытий, изобретений и т. п.), завершенных научных исследований и опытно-конструкторских разработок, производственного опыта, технологий».

В [12] «человеческий капитал» регионов рассматривается «как приоритетный объект инвестиций», отмечается также важность «инвестиций в капитал здоровья» населения. Подчеркнем, что помимо бюджетных расходов на

здравоохранение целесообразно учитывать также затраты организаций на «оздоровление сотрудников»; расходы самих граждан; средства, направляемые на улучшение экологической обстановки территорий, мест непосредственного проживания ФЛ и пр.

Оценки величин ИПР и ИРР «в целом», их отдельных компонент

Оценки ИПР отдельных регионов возможны качественные и количественные – измеренные, рассчитанные, экспертные [18]. В большинстве русскоязычных работ «экономического направления» количественные оценки показателей ИПР и ИРР не приводятся, но иногда регионы ранжируются по этим показателям на «шкалах порядка». В силу влияния численности населения регионов на величины ИРР и ИПР, продуктивны относительные оценки ИРР/ИПР – с нормированием на число жителей.

По [14] определение ИПР включает в себя следующие аспекты: оценки ресурсов регионов; сравнение ИПР разных регионов; оценки «результатов» использования ИПР. При этом сравнительная оценка каждого из четырех «потенциалов» ИПР для регионов Украины осуществляется на основе «метода отклонений от эталонов» в несколько этапов:

А. Для каждой из субкомпонент выявляется «наилучшее» (эталонное) значение по всем регионам.

Б. Переход к безразмерным показателям (БП) субкомпонент. Для этого если субкомпонента «прямо пропорционально» влияет на ИПР, то делятся фактические показатели на их максимальные значения; если показатели субкомпонент влияют на ИПР обратно пропорционально, то делятся минимальные значения на фактические показатели.

В. По каждому из четырех «потенциалов» проводится взвешенное усреднение разностей «1 – БП» для величин субкомпонент. Весовые коэффициенты для субкомпонент предлагается оценивать экспертно или на основе значений коэффициентов парных корреляций (КПК) – детали в [14] не расшифровываются. Использование КПК потенциально позволяет исключить «частичное дублирование» информации субкомпонент, но не отражает их относительной важности в оценке «потенциалов». Кроме того, не учитываются КПК между субкомпонентами, относящимися к разным «потенциалам». Другие недостатки описанного подхода: возмож-

ность различного выбора «набора субкомпонент» для каждого потенциала; неучет синергетических эффектов взаимодействий между субкомпонентами и др.

Г. Далее в [14] «интегральный индекс» ИПР предлагается рассчитывать суммированием оценок для четырех выделенных «потенциалов». С нашей точки зрения, взвешенное усреднение по четырем «потенциалам» было бы более оправданным, хотя весовые коэффициенты также пришлось бы определять экспертно.

Продуктивна трактовка суммарного ИРР ($R^{(reg)}$) как суммы «стоимостных оценок» для совокупности объектов в регионе $\{R_n\}_{n=1...N}$. по

$$R^{(reg)} = \sum_{n=1}^N R_n. \quad (1)$$

В частности, для ФЛ величина их ИР может быть оценена как стоимость подготовки (по рыночным расценкам) до текущего уровня ЗиУ.

При дополнительном учете парных «синергетических эффектов» между рассматриваемыми объектами ИРР вместо (1) имеем

$$R^{(reg-s)} = \sum_{n=1}^N R_n + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1, m \neq n}^N (a_{n,m} R_n R_m). \quad (2)$$

Коэффициенты $a_{n,m}$ могут быть оценены экспертно.

Стоимостной подход к оценкам ИРР имеет следующие преимущества: позволяет соотнести затраты на поддержку (или наращивание) ИРР с получаемыми результатами; учесть деградацию (моральное старение) ИРР со временем; смерть людей как носителей ИРР; их миграцию в регион или из региона; изменение здоровья ФЛ (их работоспособности) и пр.

Оценки соответствия имеющихся ИРР и потребностей в них

Основные причины неполноты использования ИПР: а) безработица, в том числе «скрытая», ведущая к неполной загрузке ФЛ; б) несоответствие ЗиУ, трудовых возможностей ФЛ потребностям его экономики. Фактическую загрузженность «человеческих ресурсов» региона ($D^{(f)}$) представим как

$$D^{(f)} = (\sum_{i=1}^{I_0} A_i) / R_0, \quad (3)$$

где $0 < D^{(f)}$ и, как правило, $D^{(f)} < 1$; $\{A_i\}_{i=1...I}$ – коэффициент использования рабочего времени для i -го фактически работающего ФЛ (из общего числа I_0); R_0 – общее количество трудоспо-

собных ФЛ в регионе, в том числе желающих работать пенсионеров, учащихся и пр. Примем

$$\{A_i = (F_i / N_i) C_i\}_{i=1...I}, \quad (4)$$

где для i -го сотрудника F_i и N_i – фактический и нормативный годовые «фонды» рабочего времени; C_i – понижающий коэффициент (доля от «1»), определяемый «уровнем здоровья» i -го работника.

Основные причины того, что $I_0 < R_0$: «явная» безработица; большое количество учащихся вузов и ССУЗов в трудоспособном возрасте, которые не работают или работают менее чем на ставку; матери, воспитывающие маленьких детей и в связи с этим не имеющие возможности устроиться на работу; невозможность трудоустройства на работу при некоторых видах инвалидности и др. Скрытая безработица приводит к уменьшению коэффициентов $\{A_i\}$.

Некоторые из $\{A_i\}$ могут быть больше «1» (сверхурочная работа, работа по совместительству в «своей» или иных организациях и пр.).

Примем, что для момента времени t «фактически располагаемые трудовые ресурсы» (ТР), т. е. ФЛ, которые «хотят и могут» работать и «потребности в ИРР» задаются матрицами «специальность-квалификация».

$$[\Omega_{i,j}]_{i=1...I_s; k=1...K_s}; \quad [\Psi_{i,j}]_{i=1...I_s; k=1...K_s}, \quad (5)$$

где I_s – общее количество специальностей; K_s – количество выделяемых уровней (градаций) квалификации. Элементами матрицы $[\Omega]$ являются фактические количества работающих ФЛ; а матрицы $[\Psi]$ – потребности в рабочих местах (места с неполной занятостью пересчитываются на «полную занятость» с уменьшением их количества). Такой подход – упрощенный, так как не учитывается, что один и тот же человек может быть «носителем» нескольких специальностей. Суммарные ИРР по региону (φ) оценим с использованием матрицы «весовых коэффициентов» ($[\beta_{i,k}]_{i=1...I_s; k=1...K_s}$) для каждого сочетания «специальность – уровень квалификации». Для определенности примем, что коэффициенты $[\beta]$ обеспечивают пересчеты ИРР в денежные единицы (см. выше):

$$\varphi = \sum_{i=1}^{I_s} \sum_{k=1}^{K_s} (\Omega_{i,k} \beta_{i,k}) \quad (6)$$

«Профициты»/«дефициты» по сочетаниям «специальность – квалификация» определяются матрицей $[\Theta]$:

$$[\Theta_{i,j} = \Omega_{i,j} - \Psi_{i,j}]_{i=1...I_s; k=1...K_s} \quad (7)$$

В (7) положительные элементы соответствуют «профицитам», а отрицательные – «дефицитам». «Суммарный профицит» (Θ^+) определяется суммой всех положительных элементов матрицы $[\Theta]$, а «суммарный дефицит» (Θ^-) – модулем суммы всех отрицательных элементов $[\Theta]$.

В целом по региону для конкретного момента времени « t » «дисбаланс» фактически располагаемых ИРР и потребностей в них оценим по

$$Q_t = (\Omega_t^+ + \Omega_t^-) / ((I_0(t) + R_0(t)) / 2). \quad (8)$$

При сбалансированности потребностей и фактических ИРР $Q_t \approx 0$.

Если суммы «дефицитов» и «профицитов» по строке $[\Theta]$, т. е. по одной специальности, приблизительно одинаковы, то это обычно означает, что количество специалистов достаточно, но их средняя квалификация ниже требуемой для региона. Для конкретной специальности укажем следующее: новые специалисты появляются после завершения их подготовки или при их переезде в регион; «перетоки» из «клеток» с более низкой квалификацией в клетки с более высокой возможны за счет повышения квалификации ФЛ; обратные «перетоки» соответствуют моральному старению ЗиУ, потере квалификации при длительном отсутствии работы по специальности и пр. В общем случае возможны и внутрирегиональные «перетоки» ФЛ между специальностями – из-за изменений количеств рабочих мест, уровней оплаты труда и пр.

Среднее за период времени значение ($Q^{(per)}$), определяемое по совокупности $\{Q_t\}_{t=1...T}$ (фактических или прогнозных), вычислим по формуле

$$Q^{(per)} = \left(\sum_{t=1}^T ((\Omega_t^+ + \Omega_t^-) / ((I_0(t) + R_0(t)) / 2)) \right) / T. \quad (9)$$

Модели динамики ИРР, связанных с трудовыми ресурсами

Будем рассматривать динамику только суммарных ИРР (φ), связанных с ТР, так как дифференцированный учет ИРР по специальностям (включая «перетоки» ФЛ между ними) значительно усложняет задачу. В явном виде не будем учитывать затраты на «обеспечение здоровья», которые, в свою очередь, предотвращают снижение эффективности использования ТР.

В рамках рассматриваемой ниже детерминированной модели учтем «интенсивности» для таких процессов: деградация ИРР за счет морального старения ЗиУ ФЛ, перерывов в их трудовой деятельности ($I^{(D)}$); наращивание ИРР за счет обучения ($I^{(N1)}$) и самообучения ($I^{(N1)}$) ФЛ; «потери ИРР», связанные со смертью людей $I^{(P1)}$; утратой ими возможностей трудиться ($I^{(P2)}$); сменой специальности ($I^{(P3)}$); миграцией ФЛ, связанной с различием в «своем» регионе и вне его характеристик «общего характера»: уровня жизни; криминальной обстановки; экологии и пр. ($I^{(M)}$); «потерь» региона за счет выезда ФЛ, связанного с «профицитом» ИРР ($I^{(P4)}$); «приобретением» регионом ИРР за счет въезда в него ФЛ, являющихся носителями ИРР ($I^{(V)}$) – при «дефиците» ИРР. Последние две «компоненты» могут одновременно быть ненулевыми – при значительных несоответствиях структуры потребностей в ИРР и того, что фактически есть. Примем: необходимые для рассматриваемой ниже модели коэффициенты ($\{a_i\}$) могут быть оценены экспертно; модель является «марковской»; начальные значения (для $t=1$) известны; известен также шаг по времени для переходов « $t \rightarrow t+1$ ».

Тогда в общем виде модель динамики ИРР, связанных с ТР региона

$$d\phi/dt = -I^{(D)} + I^{(N1)} + I^{(N2)} - I^{(P1)} - I^{(P2)} - I^{(P3)} - I^{(M)} - I^{(P4)} + I^{(V)}. \quad (10)$$

Для интенсивности деградации ИРР примем

$$I^{(D)} = I^{(D)}(t) = a_1 \phi(t). \quad (11)$$

При этом может быть $\alpha_1 = \alpha_1(t)$ – например, из-за изменения уровня безработицы. Наращивание ИРР за счет обучения примем пропорциональным уровням затрат (Z), причем без учета количества обучаемых ФЛ:

$$I^{(N1)} = I^{(N1)}(t) = a_2 Z(t). \quad (12)$$

Коэффициент a_2 зависит от эффективности отбора ФЛ для обучения, их мотивации и пр. При этом (12) носит упрощенный характер, так как не учитываются запаздывания по времени результатов от затрат на обучение.

Наращивание ИРР за счет самообучения примем пропорциональным количеству ФЛ, составляющих потенциальные ТР региона (R_0):

$$I^{(N2)} = I^{(N2)}(t) = a_3 R_0(t). \quad (13)$$

В (13) коэффициент « a_3 » определяется способностью ФЛ к самообучению, их мотивацией

и пр. Для «потерь» ИРР, связанных со смертью ФЛ или прекращением ими трудовой деятельности, примем

$$I^{(P1)} = I^{(P1)}(t) = a_4 R_0(t); \\ I^{(P2)} = I^{(P2)}(t) = a_5 W. \quad (14)$$

В (14) a_4 , a_5 зависят от половозрастной структуры населения, его здоровья. Последнее, в свою очередь, определяется текущими и «прошлыми» расходами на здравоохранение. Для смены работающими ФЛ специальности

$$I^{(P3)} = I^{(P3)}(t) = a_6 I_0(t). \quad (15)$$

Для процессов миграции ФЛ, определяемых различиями в характеристиках «общего характера» своего региона (U_{reg}) и внешней для него среды (U_{vne}), примем

$$I^{(M)} = I^{(M)}(t) = a_7 R_0(t); \quad (16)$$

$$a_7 = \begin{cases} 0; & \text{при } |U_{vne} - U_{reg}| < \varepsilon \\ \frac{a_7^* (U_{vne} - U_{reg})}{a_7^* (U_{vne} - U_{reg})}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (17)$$

где параметр « ε » определяет «порог» начала миграции. При переезде семей из смены места работы мужа регион теряет ИРР всей семьи. Для времени « t » интенсивность отъездов из региона ФЛ из-за «профицита» ИРР

$$I^{(P4)} = a_8 \Theta_t^+. \quad (18)$$

При управлении регионами, если есть «профицит» ИРР, то для предотвращения отъездов ФЛ целесообразно привлечение инвестиций для создания рабочих мест, развития наукоемких производств и пр.

Для въездов ФЛ в регион, связанных с «дефицитом» ИРР, примем

$$I^{(V)} = I^{(V)}(t) = a_9 \Theta_t^-. \quad (19)$$

С позиций управления регионом при дефиците ИРР может быть эффективнее проводить дообучение (или переобучение) уже работающих (проживающих) в регионе ФЛ, так как приезд новых граждан увеличивает нагрузку на «социальную сферу» регионов. В общем случае $a_8 \neq a_9$, так как на решения ФЛ в отношении трудовой миграции, кроме «профицитов» и «дефицитов» ИРР, влияет еще и ряд иных факторов.

Собственно численное моделирование по (10)–(19) может быть выполнено по методу Эйлера с постоянным шагом по времени. Недостатки математической модели, описываемой формулами (10)–(19): учет только ИРР, связанных с ТР; «нечеткости» (неточности) оценок для значений коэффициентов $\{a_i\}$, а также иных параметров, входящих в модель; «линейный»

характер модели по (10) – без учета «сочетаний» факторов и пр.

При таких условиях рациональной альтернативой (10)–(19) может быть более общая (в отношении набора параметров) «когнитивная модель» [11]. Однако экспертная оценка взаимовлияний параметров для нее будет сложнее, чем для модели по (10)–(19) – из-за большего количества матрицы коэффициентов. Кроме того, математический аппарат когнитивного моделирования [11], по крайней мере в базовых вариантах, не рассчитан на учет нелинейных взаимозависимостей, «порогов» влияния и пр.

Итак, сделаем выводы:

1. Существующая терминологическая база по теме статьи ориентирована главным образом на качественные, а не количественные оценки ИРР/ИПР.

2. Оценка ИРР в денежных единицах обладает рядом преимуществ – в том числе с позиций анализа и прогнозирования процессов.

3. Отношение ИРР, связанных со ЗиУ персонала, к количеству «единиц» ТР может рассматриваться как «интегральная оценка» уровня квалифицированности персонала в регионе; объема индивидуальных ИР ФЛ.

4. Предложенная в статье математическая модель динамики ИРР для ТР должна рассматриваться как часть более общей модели (которую предполагается рассмотреть в последующих работах). Эта модель будет дополнительно учитывать создание/использование «объектов интеллектуальной собственности»; обеспечение здоровья населения; управление инвестициями, уровнем безработицы, миграционными процессами и пр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алякина, Л. А. Сущность интеллектуального потенциала как составляющей нематериальных активов региона / Л. А. Алякина // Вестник Чувашского университета. – 2012. – № 2. – С. 417–421.
2. Анисимова, Е. А. Интеллектуальный потенциал социально-экономической системы региона: сущность, методические подходы к оценке / Е. А. Анисимова // Экономика и предпринимательство. – 2011. – № 5. – С. 50–52.
3. Антоненко, И. В. Динамика и перспективы развития интеллектуального потенциала регионов южного федерального округа / И. В. Антоненко // Региональная экономика: теория и практика. – 2009. – № 41. – С. 12–16.
4. Багов, В. П. Управление интеллектуальным капиталом / В. П. Багов, Е. Н. Селезнев, В. С. Ступаков. – М. : Камерон, 2006. – 248 с.
5. Брумштейн Ю. М., Салхенов Т. Т., Чернов С. В., Боркова А. А. Анализ факторов информационной безопас-

ности региона и влияния на нее вузов // Известия ВолгГТУ (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 7). № 12(60), 2009 г. С. 99–102.

6. Брумштейн Ю. М., Каргина Д. А., Гуськова Н. И., Пугина Н. Н. Конкурентоспособность и интеллектуальный капитал вузов – анализ взаимосвязей и подходы к управлению структурой затрат // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах, 2009. – № 6(54). – С. 83–88.

7. Брумштейн Ю. М., Горюнова Т. А., Пугина Н. Н. Анализ методов и математических моделей обеспечения вуза кадрами высшей квалификации // Известия ВолгГТУ, № 11(71), 2010 г, С. 81–84.

8. Брумштейн, Ю. М. Комплексный анализ факторов информационной и интеллектуальной безопасности регионов / Ю. М. Брумштейн, А. Н. Подгорный // Информационная безопасность регионов. – Саратов. – 2011. – № 1(8). – С. 8–14.

9. Брумштейн, Ю. М. Анализ некоторых вопросов мотивации и управления интеллектуальной деятельностью в региональных вузах // Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011 (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 11). – С. 105–110.

10. Бушуев, В. Д. Моделирование динамики развития интеллектуального ресурса региона / В. Д. Бушуев, С. И. Шелобаев, А. С. Шелобаев // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 5. – С. 197–198.

11. Камаев, В. А. Когнитивное моделирование социально-экономических систем : учеб. пособие / В. А. Камаев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 136 с.

12. Камалтдинова, Р. М. Человеческий капитал как приоритетный объект инвестиций / Р. М. Камалтдинова // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 5. – С. 198–199.

13. Маценко, Ю. В. Управление интеллектуальными ресурсами в регионе / Ю. В. Маценко // Вестник УГАЭС. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. – 2012. – № 2(2). – С. 19–22.

14. Махомет, Ю. В. Оценка интеллектуального потенциала регионов Украины / Ю. В. Махомет // Вестник Академии знаний. – 2013. – № 2(5). – С. 48–55.

15. Мингалева, Ж. А. Управление интеллектуальным потенциалом региона / Ж. А. Мингалева, И. И. Максименко // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. – 2010. – № 1. – С. 54–60.

16. Хорошавин, И. А. Развитие интеллектуального потенциала управления регионом / И. А. Хорошавин // Власть и управление на Востоке России. – 2013. – № 4(65). – С. 27–32.

17. Jardon C. M., Martos M. S. Intellectual capital as competitive advantage in emerging clusters in Latin America // Journal of Intellectual Capital. – 2012. – V. 13. Iss. 4. – Pp. 462–481.

18. Michele Grimaldi, Livio Cricelli; Francesco Rogo. A theoretical framework for assessing managing and indexing the intellectual capital // Journal of Intellectual Capital, 2013-Volume 14, Iss. 4. – Pp. 501–521.

19. Ramírez Yolanda, Gordillo Silvia. Recognition and measurement of intellectual capital in Spanish universities // Journal of Intellectual Capital. – 2014. – Vol. 15, Iss. 1, pp. 173–188.

УДК 004.491.22

М. Е. Бурлаков

ВЫДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕГО И НИЖНЕГО ПРЕДЕЛОВ ЭНЕРГИИ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ОБЪЕКТОВ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ С МЕХАНИЗМОМ РЕАКЦИИ НА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Самарский государственный университет

knownwhat@gmail.com

В статье вводится критерий нахождения длины шаблона в зависимости от размерности анализируемого объекта, дается оценка нахождения верхнего и нижнего пределов энергии нейрона при распознавании объектов нейронной сетью с механизмом реакции на последовательности.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, верхний и нижний пределы энергии нейрона, механизм реакции на последовательности.

М. Е. Burlakov

FINDING UPPER AND LOWER LIMITS OF ENERGY IN OBJECT'S RECOGNITION USING NEURAL NETWORK WITH THE SEQUENCE REACTION MECHANISM

Samara State University

In article highlight the question of finding the length of neuron template during object recognition. There is getting the location upper and lower limits of energy in object's recognition using neural network with the sequence reaction mechanism.

Keywords: artificial neuron network, lower and upper limits of neuron energy, the mechanism of sequence reaction.

В настоящее время применение искусственных нейронных сетей в решении задач распознавания объектов находит все большее отражение в различных областях науки [1]. В данной статье будет рассмотрена техника оптимизации спроектированной искусственной нейронной сети (НС) с механизмом реакции на последовательности. Основные понятия и определения, а также общий принцип работы НС можно найти в работе автора [2].

Критерий нахождения длины шаблона

В ходе практической реализации автор столкнулся с проблемой нахождения длины шаблона нейрона, при которой конечный результат был бы наиболее оптимальным: как для процесса конечного анализа объектов полученной после процесса обучения нейронной сетью, так и по времени обучения и тренировки нейронной сети. Для определения критерия нахождения длины шаблона была выбрана задача распознавания двумерных объектов. В качестве объектов были выбраны изображения.

Пусть дано изображение на матрице размерности $n \times m$ ($n > 1, m > 1$). Представим изображение в виде бинарной матрицы $A(n \times m)$, где 0 – наиболее светлые участки изображения, а 1 – наиболее темные. Получим два бинарных вектора одинаковой размерности $n \times m$, путем объединения по горизонтали и по вертикали строк и столбцов соответственно. Пусть длина

выбираемого шаблона в нейроне равна p . Тогда множество всех возможных бинарных шаблонов содержит в точности 2^p элементов (обозначим как множество M). По логике, приведенной выше, количество циклов (количество сравнений) должно равняться величине $n \cdot m - p$. С одной стороны, вероятность нахождения i -го элемента из множества M бинарных векторов размерности 2^p равняется $\frac{1}{2^p}$. С другой стороны, должно выполняться соотношение (1):

$$n \cdot m - p \geq 2^p, \quad (1)$$

где $p \in N$.

При $p = 1$ получим следующее соотношение:

$$3 \leq 2^p + p \leq n \cdot m \quad (2)$$

при $n > 1, m > 1$. Таким образом, верхняя оценка должна отвечать соотношению (3):

$$2^p + p \leq n \cdot m. \quad (3)$$

Нижняя оценка (4):

$$2^p + p \geq 3. \quad (4)$$

Выделение верхнего и нижнего пределов энергии нейрона. Распознавание объектов

Рассмотрим механизм выделения верхнего и нижнего пределов при распознавании объектов нейронной сетью с механизмом реакции на последовательности.

В качестве объектов для распознавания будет использоваться набор изображений, разме-

щенных на матрице размерности 32×32 пикселя от 0 до 9 (см. рисунок).

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Изображения на матрице размерностью 32×32 пикселя

Используя соотношение (1), получим, что размерность p сравниваемых шаблонов в нейронах должна принимать значение в диапазоне $2 \leq p \leq 9, p \in N$.

Опишем алгоритм распознавания объектов:

1. Анализ изображения. На данном шаге изображения анализируются и переводятся из физической матрицы в математическую бинарную матрицу A эквивалентной размерности, что и исходная матрица.

2. Получение бинарного вертикального и горизонтального векторов размерностей 32×32 путем объединения векторов по вертикали и по горизонтали соответственно. Разбиение данных векторов на множество подмножеств U размерности p для дальнейшего использования в циклах сравнений.

3. Сравнение множества M веса 2^p и размер-

ности p с полученным множеством U . В случае если $M \cap U = M$, то увеличиваем размерность шаблона нейрона на единицу ($p+1$) и переходим к Шагу 2, в противном случае переходим к Шагу 4.

4. Передача шаблона в нейронную сеть с двумя нейронами с реакцией на последовательности.

5. Получение шаблонов и соответствующих им значений энергий на каждом из двух нейронов. В случае достижения данным шаблоном энергетического минимума (нуля энергии) работа алгоритма для данного шаблона не заканчивается. Работа алгоритма заканчивается в момент, когда шаблон произведет в точности $(32 \times 32 - p)$ сравнений. Энергия в систему подается порционно и детерминировано по одной единице энергии за каждый цикл сравнения [3]. Таким образом, получим набор подмножеств $C_{\{0,v\}}, C_{\{1,v\}}, \dots, C_{\{s,v\}}$ размерности $(32 \times 32 - p) \times \times (32 \times 32 - p)$, где s – выбранный символ, а v – вектор значений энергии соответствующей пары распознающих шаблонов.

Для случая распознавания объектов размерности 32×32 получим значения, приведенные в таблице:

Количество шаблонов при заданной размерности p

Символ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$ M , p=2$	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$ M , p=3$	63	62	63	64	-	-	-	-	-	-
$ M , p=4$	231	208	232	238	231	235	241	224	221	238

Так как при значении длины шаблона, равной 4, имеется полное покрытие множества шаблонами, считаем данное значение минимальной длиной шаблона. Максимальная длина шаблона равна 9. В имеющихся значениях будут получены не только оптимальные, но и дефектные шаблоны. Далее определим алгоритм выделения оптимальных шаблонов, которые наиболее адекватно описывают анализируемый объект. Для этого немного модифицируем метод реакции на последовательности. Зададим предел энергетического потолка равным плюс бесконечности. Начальное значение энергии каждого нейрона определим равным 1, в случае если один из нейронов на одном такте находит совпадение с подающей последовательностью со своей внутренней последовательностью – его энергия уменьшается на единицу, в против-

ном случае она не увеличивается. При следующем такте в систему из источника энергии подается 1 единица энергии и распределяется по следующему принципу – если энергия первого нейрона больше энергии второго, единица энергии отдается второму нейрону. При равном количестве энергии заряд произвольно отдается одному из нейронов. В качестве оценки поведения нейронов будем считать те значения нейронов, которые не входят в максимумы, но и не являются минимумами. В случае с максимумами это означает, что данные нейроны содержат последовательности, которые либо слишком редко, либо вообще не встречаются в данном шаблоне, в случае минимума – что последовательности встречаются слишком часто.

Используя полученное соотношение, при анализе объектов с размерностью $n \times m (n \leq 10^5,$

$m \leq 10^5$) была получена оценка верхней e_{max} и нижней e_{min} границы энергетического предела (4) и энергетического нуля e (5):

$$e_{min} = \frac{2}{5} n \cdot m + \varepsilon, e_{max} = n \cdot m + \varepsilon \quad (4)$$

$$e = \frac{4}{5} n \cdot m + \varepsilon, \quad (5)$$

где $\varepsilon \in (-(n+m); n+m)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Девярых Д. В., Гергет О. М., Михаленко И. В. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозиро-

вания развития перинатального поражения нервной системы. – Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 8(111) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2013. – С. 77.

2. Бурлаков, М. Е. Теоретическое обоснование реакционной модели нейрона на последовательности / М. Е. Бурлаков // Научная дискуссия: вопросы физики, математики: мат-лы VI Междунар. конф. – М., 2013. – С. 61–68.

3. Бурлаков, М. Е. Динамическая система на нейронах с реакцией на последовательности на примере распознавания изображений: демонстрация реализации / М. Е. Бурлаков // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XII Международной научно-практической конференции / под общ. ред. С. С. Чернова. – Новосибирск : СИБПРИНТ, 2013. – 215–219 с.

УДК 004.582

И. Ю. Королева, А. Д. Сорокина

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКРАННОЙ ЛУПЫ

Волгоградский государственный технический университет

artmd64@rambler.ru, logovo90@mail.ru

В статье рассмотрены аспекты реализации экранной лупы в программном обеспечении для слабовидящих людей. Для повышения эффективности применения данного инструмента необходимо использовать специальные фильтры. Авторами рассматриваются два фильтра: сглаживание изображения и преобразование его в черно-белую картинку.

Ключевые слова: экранная лупа, фильтры для экранной лупы, сглаживание изображения, биполярная фильтрация, преобразование изображения в черно-белое.

I. Y. Koroleva, A. D. Sorokina

APPLICATION FOR IMPLEMENTATION OF FILTERS MAGNIFIER

Volgograd State Technical University

The article discusses aspects of the implementation magnifier software for visually impaired people. To improve the efficiency of using this instrument is necessary to use special filters. The authors considered two filters smoothing image and convert it to black and white image.

Keywords: magnifier, magnifier filter, smoothing of the image, bipolar filtering, conversion of images to black and white.

На рынке программного обеспечения предлагается множество программных разработок, облегчающих восприятие информации людям с ограниченными возможностями (слабовидящим, слабослышащим и т. д.). Каждая из них обладает, в том числе, определенными недостатками. Например, программные приложения для людей со слабым зрением обычно реализуют перевод печатного текста в речь. В то же время необходимым инструментом для слабовидящих является и экранная лупа, которая чаще всего реализуется отдельным программным приложением.

Таким образом, актуальна разработка программного продукта для слабовидящих людей, включающего функции и экранной лупы, и речевого сопровождения процесса обработки тек-

стов, что позволит облегчить их работу за ЭВМ.

Такое программное приложение может использовать две технологии: TTS (перевод печатного текста в речь) и экранную лупу. Проектируемое приложение включает следующие модули [3]:

- озвучивание печатного текста из различных текстовых редакторов;
- озвучивание нажатых клавиш на клавиатуре;
- озвучивание различных системных сообщений;
- озвучивание происходящего под курсором;
- экранная лупа.

Структура проектируемого ПО выглядит следующим образом (рис. 1).



Рис. 1. Общая структура программного обеспечения для слабовидящих людей

Остановимся более подробно на технологии реализации экранной лупы. Экранная лупа – это специальная компьютерная программа, позволяющая увеличивать область на экране монитора. Обычно она используется слабовидящими людьми для облегчения восприятия выводимой информации.

Принцип действия основан на выводе на экран небольшой области (панели), в которой отображается увеличенная часть изображения, находящегося под ней. Передвигать эту панель можно при помощи мыши, т. е. она следует за курсором.

Для слабовидящих людей важную роль играет четкость увеличенной картинке. Экранная лупа позволяет не только увеличить изображение, но и применить фильтры сглаживания картинки и преобразование ее в черно-белое изображение.

Рассмотрим более подробно фильтры, используемые в разрабатываемом программном приложении (обозначены пунктиром на рис. 1).

Сглаживание – это процесс, позволяющий уменьшить появление зубчатых, а также ступенчатых диагональных границ. Такие границы придают тексту грубый цифровой вид. Существует несколько методов сглаживания (к примеру, метод билинейной фильтрации).

Билинейная фильтрация – процесс извлечения нескольких пикселей исходной текстуры с последующим усреднением их значений для получения окончательного значения пикселя [1].

В основном текстура, выводимая на экран, не отображается так, как хранится. Перед выводом ее необходимо обработать. Метод билинейной фильтрации основан на билинейной интерполяции между четырьмя текселями, расположенными вблизи точки, которая представляет собой пиксель (обычно в середине или верхней левой части).

С математической точки зрения билинейная интерполяция – это задача нахождения функции $F(x, y)$ вида:

$$f(x, y) = c_{11}xy + c_{10}x + c_{01}y + c_{00},$$

удовлетворяющей следующим значениям

$$f(x_1, y_1) = z_{11}, f(x_1, y_2) = z_{12}, f(x_2, y_1) = z_{21}, \\ f(x_2, y_2) = z_{22},$$

где x, y – координаты точки; z_{ij} – источник данных; $c_{00} = f(0,0), c_{01} = f(0,1) - f(0,0), c_{10} = f(1,0) - f(0,0), c_{11} = f(0,0) - f(1,0) - f(0,1) + f(1,1)$.

Чаще всего для упрощения вычисления $f(x, y)$ используется дважды линейная интерполяция, например, для функций f_1 и f_2 :

$$f_1(y_1) = z_{11}, f_1(y_2) = z_{12}, f_2(y_1) = z_{21},$$

и

$$f_2(y_2) = z_{22},$$

после чего эти функции объединяются в одну функцию f , при этом f_1 и f_2 являются линейными по y :

$$f(x_1, y) = f_1(y) \text{ и } f(x_2, y) = f_2(y).$$

В компьютерной графике билинейная фильтрация обычно используется при наложении текстур или изменении размеров. В этих случаях источником данных является двумерный массив z_{ij} . В случае полноцветных данных используются трех-, четырех- и более мерный массив. В билинейной фильтрации количество точек составляет 2×2 . Эти точки расположены вокруг места интерполирования.

Решение упрощает и то, что не нужно вычислять фактический коэффициент функции f . Достаточно вычислить значения $f(x, y)$.

На основе дробных частей координат текстуры x и y определяются интерполируемые тексели. В результате выясняются цвета четырех ближайших текселей. Благодаря этому цвет будет изменяться плавно.

Итак, обозначим наибольшее целое число, которое не больше x – $[x]$, а дробную часть – $\{x\}$. Тогда $x = [x] + \{x\}$, и $\{x\} < 1$. Получаем следующие координаты:

$$\begin{aligned} x_1 &= [x], \\ x_2 &= [x] + 1, \\ y_1 &= [y], \\ y_2 &= [y] + 1. \end{aligned}$$

Источник данных о точках, используемых для интерполяции, представляет собой двумерный массив и обозначается как z_{11} , z_{12} , z_{21} , z_{22} . Тогда $f_1(y_1) = z_{11}$; $f_1(y_2) = z_{12}$ – две точки для f_1 ; вычитая первую из второй, получаем:

$$f_1(y_2) - f_1(y_1) = z_{12} - z_{11}.$$

Так как функция f_1 является линейной, то ее производная постоянна и равна:

$$(z_{12} - z_{11}) / (y_2 - y_1) = z_{12} - z_{11}.$$

Так как $f_1(y_1) = z_{11}$, то

$$f_1(y_1 + \{y\}) = z_{11} + \{y\}(z_{12} - z_{11}),$$

аналогично

$$f_2(y_1 + \{y\}) = z_{21} + \{y\}(z_{22} - z_{21}).$$

Так как $y_1 + \{y\} = y$, то вычислены конечные точки $f_1(y)$ и $f_2(y)$, которые необходимы для второго шага интерполяции.

Во втором шаге интерполяции необходимо вычислить $f(x, y)$, что можно сделать по формуле, использованной для промежуточных значений:

$$f(x, y) = f_1(y) + \{x\}(f_2(y) - f_1(y)).$$

При масштабировании значение y остается постоянным в пределах той же линии изменения изображения, что соответственно приводит к значительной экономии при расчетах и сохранении промежуточного результата.

Формулу билинейной интерполяции можно записать в другом виде:

$$f(x, y) = (1 - \{x\})((1 - \{y\})z_{11} + \{y\}z_{12}) + \{x\}((1 - \{y\})z_{21} + \{y\}z_{22}).$$

На рис. 2 приведена схема алгоритма билинейной фильтрации, ниже – пример кода для квадратной текстуры. Так как все цветные текстуры имеют красный, зеленый и синий каналы (RGB), то необходимо сделать три расчета, по одному на каждый канал. Расположение UV-координаты находится в центре текселя. Например, $\{0.25, 0.25\}$, $\{0.75, 0.25\}$, $\{0.25, 0.75\}$, $\{0.75, 0.75\}$ является значением для текстуры 2×2 .

Входные параметры: Texturetex – текстура; doubleu; v – координаты центра текселя.



Рис. 2. Схема алгоритма билинейной фильтрации

DoublegetBilinearFilteredPixelColor(Texture tex, doubleu, double v)

```

{
    u*=tex.size;
    v*=tex.size;
    //Наибольшее целое число, которое не больше x
    intx = floor(u);
    //Наибольшее целое число, которое не больше y
    inty = floor(v);

```

```

// Находим дробную часть x и y
double u_ratio = u - x;
double v_ratio = v - y;
double u_opposite = 1 - u_ratio;
double v_opposite = 1 - v_ratio;
// Применяем формулу
double result = (tex[x][y] * u_opposite + tex[x+1][y] * u_ratio) * v_opposite +
(tex[x][y+1] * u_opposite + tex[x+1][y+1] * u_ratio) * v_ratio;
return result; // Возвращаем результат вычислений }[1]

```

Существует множество методов преобразования изображения из цветного в черно-белое. Метод, представленный ниже, является одним из самых быстрых. Его особенность состоит в том, что не обрабатывается сразу вся картинка, а используется каждый раз только небольшой

блок данных. Таким образом, берется часть картинки (блок данных), изменяется, и только после этого возвращается. На рис. 3 приведена схема алгоритма преобразования цветного изображения в черно-белое.

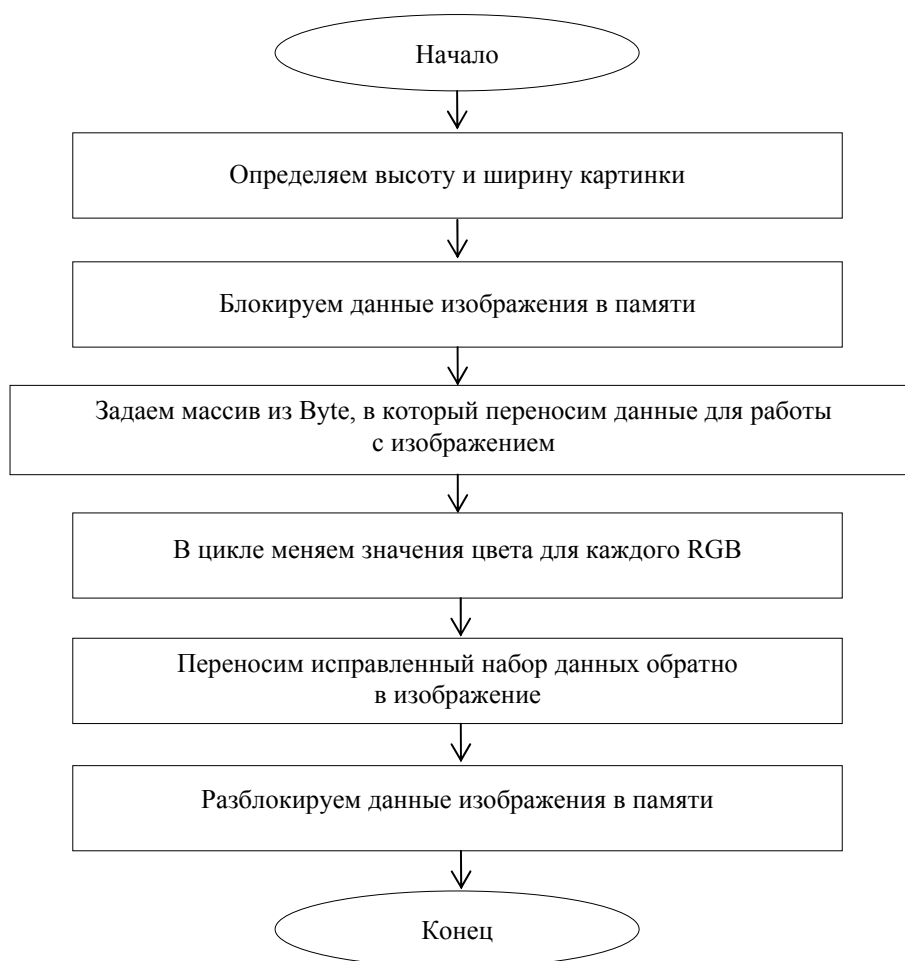


Рис. 3. Схема алгоритма преобразования цветного изображения в черно-белое

Приведенный ниже код позволяет преобразовать цветное изображение в черно-белое на основе алгоритма, рассмотренного выше.

```

private void MakeGray(Bitmap bmp)
{
    // формат пикселя
    PixelFormat pxf = PixelFormat.Format24bppRgb;
    // высота и ширина картинки
    Rectangle rect = new Rectangle(0, 0, bmp.Width, bmp.Height);

```



```

//блокируем данные изображения в памяти
BitmapData bmpData = bmp.LockBits(rect, ImageLockMode.ReadWrite, pxf);
// адрес первой линии
IntPtr ptr = bmpData.Scan0;
// два варианта задания массива из Byte, в который помещаем набор данных
//вариант 1:
// intnumBytes = bmp.Width * bmp.Height * 3; //умножение на 3 используется из-за того, что RGB кодиру-
//ется 3 байтами
//вариант 2: используем вместо Width - Stride
int numBytes = bmpData.Stride * bmp.Height;
int widthBytes = bmpData.Stride;
byte[] rgbValues = new byte[numBytes];
// переносим значения в массив
Marshal.Copy(ptr, rgbValues, 0, numBytes);
// цикл по перебору каждых 3 байтов, в котором меняется их значение
for (int counter = 0; counter < rgbValues.Length; counter += 3)
{
    int value = rgbValues[counter] + rgbValues[counter + 1] + rgbValues[counter + 2];
    byte color_b = 0;
    color_b = Convert.ToByte(value / 3);
    rgbValues[counter] = color_b;
    rgbValues[counter + 1] = color_b;
    rgbValues[counter + 2] = color_b;
}
// переносим исправленный набор данных обратно в изображение
Marshal.Copy(rgbValues, 0, ptr, numBytes);
// разблокируем набор данных в памяти
bmp.UnlockBits(bmpData);
} [2]

```

Так как каждый цветной пиксель кодируется тремя байтами (RGB), то перебор массива с данными осуществляется с шагом три. В цикле происходит следующее: составляющие R, G и B суммируются ($\text{intvalue} = \text{rgbValues}[\text{counter}] + \text{rgbValues}[\text{counter} + 1] + \text{rgbValues}[\text{counter} + 2]$);

после чего вычисляется среднее значение из этих трех составляющих ($\text{color_b} = \text{Convert.ToByte}(\text{value} / 3)$;) и далее это значение помещается в R, G и B. Так задается нужный тон серого. На рис. 4 представлен пример работы приведенного выше кода.



Рис. 4. Пример преобразования цветного изображения в черно-белое

В данной статье были рассмотрены некоторые аспекты формирования программных средств для людей с ограничением по зрению, детально проанализированы теория и практика применения фильтров для экранной лупы (сглаживание и преобразование цветного изображения в черно-белое). Использование таких фильтров в разрабатываемом программном приложении в совокупности с экранной лупой значительно облегчит работу слабовидящих людей за компьютером.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Билинейная фильтрация // Словари и энциклопедии на Академике [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : http://universal_ru_en.academic.ru/
2. Быстрое преобразование цветного изображения в черно-белое на C# // КБ СОФТ СТУДИЯ [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://kbss.ru/blog/lang_c_sharp/69.html
3. Королева, И. Ю. Структура программного обеспечения для слабовидящих людей / И. Ю. Королева, А. Д. Сорокина // Молодой ученый. – 2014. – № 1. – С. 68–71.

УДК 519.711.3

*С. В. Кручинин***САПР И АСУ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ:
ВЗАИМОСВЯЗЬ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ**

ООО «Вэлборн»

siblis@yandex.ru

В статье рассматриваются общность и различия САПР и АСУ телекоммуникационных систем. Описан цикл жизнедеятельности телекоммуникационных систем. Определены последовательность разработки и конфигурации системы в САПР, управления и реконфигурации системы в АСУ. Дается концепция САПР+АСУ как единого комплекса непрерывного функционирования процессов организации связи.

Ключевые слова: компьютерные сети, САПР, АСУ ТП, топология сети, программная архитектура, жизненный цикл.

*S. V. Kruchinin***NETWORKING CADD AND SCADA: CORRELATION AND INTERACTION**

Wellborn LLC.

The article presents the correlation and the difference between networking CADD and SCADA. The network life circle is been defined. The author has defined the network chain of development and configuration with CADD, control, management and reconfiguration with SCADA. Author has developed the CADD+SCADA conception as the unified complex of continuously functioning of network organization processes.

Keywords: networks, CADD, SCADA, network topology, software architecture, life cycle.

Жизненный цикл телекоммуникационной составляющей мобильных сетей транспортных средств [1], рассмотренных в совокупности на всем протяжении их функционирования, от проектирования до сопровождения и поддержания работоспособности, можно разбить на два основных этапа (в дальнейшем мы покажем, что этапов может быть больше): проектирование телекоммуникационной системы (далее ТС) и управление телекоммуникационной системой. Для выполнения задач обоих этапов нами было разработано специализированное программное обеспечение (например, САПР телекоммуникационных сетей [2]; протокол автоматизированного контроля и управления гетерогенными сетями [3]) и аппаратно-технические решения (телекоммуникационный модуль сопряжения абонентской и транспортной сетей [4] и на его базе блок «маршрутизатор абонентский» [5]). Соответственно, разрабатываемые комплексы программного обеспечения также можно отнести к одной из двух групп: программное обеспечение для проектирования ТС – САПР ТС, и программное обеспечение контроля и управления ТС – АСУ ТС. При этом в ряде случаев разработанные пакеты САПР ТС и АСУ ТС в определенной степени решают аналогичные задачи, так что можно с некоторой оговоркой рассуждать о конкуренции САПР ТС и АСУ ТС. Но в то же время, при более подробном анализе, становится ясно, что при правильном распределении задач между САПР ТС и АСУ ТС наблюдается не конкурен-

ция программных компонентов за задачи, а взаимное дополнение, потому как то, что нельзя или нецелесообразно решить с помощью АСУ ТС решается с помощью САПР ТС, и наоборот.

Прежде всего, речь идет о задачах настройки и перенастройки ТС. Первоначально в первых опытных образцах ТС изготовление настроечных данных и, собственно, настройка программного и аппаратного обеспечения осуществлялись вручную. Затем, в целях оптимизации труда, были разработаны программные пакеты для автоматизированного проектирования и последующей настройки устройств ТС. В конечном итоге был разработан инструмент САПР ТС [2]. Но подобный подход обладал значительным недостатком: при изменении конфигурации системы требовался в целом довольно трудоемкий процесс проектирования измененной системы в САПР ТС, который хотя и был более быстрым и удобным, чем выполнение тех же операций вручную, но все равно оставался времязатратным и трудоемким процессом, требующим квалификации оператора, его внимательности и длительного времени работы. Конечно, такая ситуация не удовлетворяла требованиям оперативной работы ТС.

Решение проблемы было найдено в создании самоконфигурируемой системы – в части случаев задача реконфигурации системы находила решение в применении автоматизированной перенастройки. Задача построения самонастраиваемой и реконфигурируемой системы

(хотя бы частично, по сравнению с первоначальным планированием, полностью проводимым в САПР ТС) стала одной из важных задач построения АСУ ТС. Помимо задач доставки и распределения данных, полученных от САПР ТС, а также визуального мониторинга состояния устройств ТС и каналов связи, АСУ ТС стала решать задачи автоматизированного изменения конфигурации, в частности перемещения пользователей без необходимости редактировать схему связи (очевидно, что вопрос миграции пользователей в транспортных средствах требует быстрого и оперативного решения и не может занимать несколько часов, а то и суток, что неизбежно с применением САПР ТС, или того хуже, ручной настройки).

В то же время, в ряде случаев система связи может быть настроена только в САПР ТС. Например, когда в системе используются преимущественно или полностью низкоскоростные каналы, например, с применением радиостанций в диапазоне УКВ и скоростями 1200, 2400, 4800, 9600 бит/с [6], так что передавать данные большого объема по каналам связи проблематично (а дублирующие высокоскоростные каналы отсутствуют, либо не доступны, либо имеются иные препятствия для их использования), а малый размер ТС (небольшое количество узлов) делает переход пользователей между транспортными средствами нецелесообразным. В таких случаях АСУ ТС ограничена в возможностях и является минимальной частью АСУ ТП, которую обслуживает сеть. В подобных ситуациях сеть проектируется в САПР ТС и является в целом неизменной системой, чего нельзя сказать о крупных системах, построенных с использованием большого количества гетерогенных устройств и каналов связей, в том числе и высокоскоростных, где уже требуется разгрузка задач САПР ТС и передача части функций по настройке и конфигурации в АСУ ТС для обеспечения гибкости и динамичности функционирования системы.

Общность области применения САПР ТС и АСУ ТС делает универсальным для обеих задач математический аппарат [7; 8] (изначально разработанный для описания моделей САПР ТС), а также ряд программных модулей, который использовался и для разработки САПР ТС и АСУ ТС (в частности, графическое ядро визуализации и анализа инженерных схем [9], применявшееся как для построения интерфейса проектирования САПР ТС, так и для разработки

интерфейса визуального мониторинга в АСУ ТС). Более того, были также использованы одни и те же языки: визуальная графическая нотация (NTDGL – Network Topology Description Graphic Language – язык графического описания сетевой топологии [10, 11]) и язык описания сетевой топологии (NTDML – Network Topology Description Markup Language – язык разметки описания сетевой топологии) [11].

С определенной долей условности можно считать, что САПР ТС предназначена для построения начальной топологии сети, АСУ ТС – для контроля работоспособности сети и ее реконфигурации уже в процессе функционирования. Данное утверждение верно для большого числа решаемых в процессе функционирования задач, но существуют случаи, когда, например, применяется только САПР ТС (как говорилось выше, в небольшой сети, построенной на базе УКВ-передатчиков), либо только АСУ ТС (в небольшой самонастраиваемой сети с оборудованием на базе стандарта IEEE 802.11 (WiFi)). Но это крайние варианты: в первом случае любое изменение системы требует перепроектирования САПР ТС, и напротив, автоматическое развертывание системы и функционирование ее только с помощью АСУ ТС – во втором случае. Таким образом, в определенной степени, теоретически задачи, выполняемые и САПР ТС, и АСУ ТС, взаимозаменяемы. Более того, возможны ситуации (и они наблюдались на практике), когда для объемных ТС использовалась САПР ТС. Это приводило к простоям техники, трудоемкости процесса, негибкости системы в целом. Точно так же и решение задач с помощью АСУ ТС может оказаться поверхностным, когда система настраивается и перенастраивается, но на уровне заранее заданных жестких данных (например, при привязке пользователей к IP-адресам), которые уже нельзя перенастроить. Потому, только САПР ТС, либо только АСУ ТС может использоваться по отдельности в небольших ТС, для ТС с большим числом телекоммуникационных устройств, транспортных средств и абонентов такое использование является системной, организационной и управленческой ошибкой, ведущей к потерям времени и неэффективному использованию, как технических средств, так и человеческих ресурсов (что, однако, не исключает вероятности именно такого применения). Для больших ТС необходимо применение и САПР ТС и АСУ ТС в связке, с распределением меж-

ду ними задач (учитывая, что есть задачи и схожие). При этом если существует ТС с небольшим числом абонентов, и она настраивается только с помощью САПР ТС, или автоматически конфигурируется с помощью АСУ ТС, при интеграции ее как составной части в более крупную ТС уже неизбежен обмен данных между САПР ТС/ АСУ ТС данной сети с САПР ТС и АСУ ТС той сети, в состав которой планируется/осуществляется вхождение.

Рассмотрим задачи САПР ТС и АСУ ТС, а также плюсы и минусы их использования.

Задачи САПР ТС:

- подготовка исходных учетных записей валидных пользователей с учетом защиты от несанкционированного доступа (НСД);
- заблаговременное построение топологии телекоммуникационной сети [2];
- возможность построения сложных топологий и проектирования узлов маршрутизации [2].

Плюсы:

- широкий набор возможностей по защите от НСД;
- возможность построения топологии для низкоскоростных ТС, где автонастройка невозможна;

Минусы:

- трудоемкость построения больших схем;
- отсутствие гибкости, в случае появления новых телекоммуникационных устройств, транспортных средств.

Задачи АСУ ТС:

- контроль работоспособности телекоммуникационной сети: сбор данных, анализ и визуализация оператору;
- обеспечение мобильности учетных записей валидных пользователей при переходе между транспортными средствами [12];
- обеспечение включения в сеть нового

оборудования, новых транспортных средств.

- контроль работоспособности устройств [13].

Плюсы:

- возможность гибкого реагирования на меняющуюся топологию сети и появление новых телекоммуникационных устройств и (с определенной долей вероятности) абонентов;
- отсутствие длительных затрат на планирование и прорисовывание в визуальной среде топологии сети (более того, существующая сеть на основе собранных данных строится в автоматическом режиме);
- возможность решения большего числа задач, чем настройка/перенастройка телекоммуникационной сети.

Минусы:

- невозможность без САПР ТС обеспечивать учетную политику, либо потребность использования доступа без верификации пользователей (по принципу – если пользователь пользуется системой – то он валидный);
- соответственно, зависимость от САПР ТС в сфере учетной политики аккаунтов пользователей;
- невозможность строить сложные топологии и топологии для низкоскоростных сетей.

Отметим, что и визуальный интерфейс проектирования в САПР ТС и визуальный интерфейс мониторинга в АСУ ТС реализуется с помощью одного и того же программного средства – графического ядра визуализации и анализа инженерных схем [9], реализующего язык NTDGL [10; 11].

Таким образом, мы отмечаем, что плюсы и минусы САПР ТС и АСУ ТС взаимно компенсируются при их совместном использовании.

Рассмотрим порядок использования САПР ТС на этапе проектирования и АСУ ТС на этапе функционирования ТС.

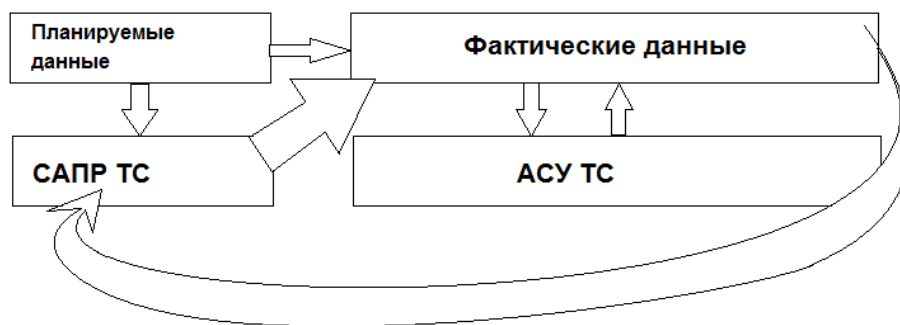


Рис. 1. САПР ТС И АСУ ТС на этапах планирования и работы

На рис. 1. Показан порядок настройки и управления ТС на разных этапах. Опишем взаи-

модействие программного обеспечения и состояния данных о сети в процессе ее функцио-

нирования по шагам подробно:

Изначально готовятся исходные данные (на рисунке – планируемые данные). Исходя из них, в САПР ТС строится топология сети и готовятся учетные записи пользователей. Подготовленные данные распространяются по техническим средствам ТС вручную, в заводских, реже – в полевых условиях (при первой настройке), либо автоматически (при наличии уже первоначально настроенной ТС – с помощью инструментов АСУ ТС).

Таким образом, планируемые данные становятся фактическими данными. Фактические данные могут отличаться от планируемых данных, во-первых, из-за фактических ограничений (несоответствие или расхождение ожидаемого и поставленного оборудования, в их числе и конфигурации, другие непредвиденные обстоятельства, что в конечном итоге ведет к некоторым ограничениям при настройке); во-вторых, из-за того, что функционирующая система меняется

в процессе работы и во времени (выход из строя технических средств, запланированное исключение или добавление новых технических средств, изменение конфигурации и топологии сети). АСУ ТС реагирует на подобные изменения, и, если возможно, производит изменение конфигурации системы. Происходит постоянное взаимодействие АСУ ТС и функционирующей сети. Возможна ситуация, когда сеть изменилась столь значительно, что необходимо ее перепроектирование уже в САПР ТС для целей последующей перенастройки. В таком случае собранные с помощью АСУ ТС анализируются и являются исходными для планирования новой версии топологии сети. Далее цикл начинается по уже описанным шагам с той разницей, что первичная ручная (заводская) настройка может уже и не быть затребована.

Попробуем теперь формализовать жизненный цикл ТС с точки зрения настройки и конфигурации (реконфигурации).



Рис. 2. Жизненный цикл ТС

На рис. 2 мы изобразили циклический процесс функционирования ТС. Первым этапом является уже описанное выше планирование. Планирование выполняется с помощью САПР ТС. Подготовленные в САПР ТС данные служат исходными для генерации настроечных данных и, соответственно, настройки. Настроечные утилиты являются компонентами САПР ТС, использующими API графического ядра визуализации и анализа инженерных схем [9] и язык хранения и обработки данных топологии сети NTDML [11]. В ряде случаев возможно распространение настроечных данных с помощью службы удаленной доставки, входящей в состав телекоммуникационного модуля сопряжения абонентской и транспортной сетей [4; 5], и, в общем-то, относящегося к АСУ ТС, хотя сами утилиты входят в состав САПР ТС.

Отметим, что САПР ТС может быть установлена на ЭВМ, не входящем в саму проектируемую сеть (офис, рабочее место промышленного предприятия и т. д.), либо быть оборудо-

вана на специальном автоматизированном рабочем месте в составе ТС (например, на базе транспортного средства).

Следующий важный этап – работа. Работа ТС является поддержкой выполнения ТС основных задач (исследовательских, промышленных, и т. д.), АСУ ТС может входить как компонент в состав АСУ ТП. Задачи АСУ ТП – мониторинг работоспособности телекоммуникационных устройств [13] (также с применением визуального монитора, использующего графическое ядро визуализации и анализа инженерных схем [9] и графической нотации NTDGL [10; 11]), обеспечение работоспособности системы при перемещении пользователей [12], сбор данных о меняющейся топологии. Для этого используются соответствующие протоколы, например, протокол автоматизированного управления и контроля гетерогенных телекоммуникационных устройств [3] и язык нотации топологии сети NTDML [11]. Данный этап, обозначенный на рис. 2 как «работа», может

продолжаться достаточно долго. Завершается он при сборе с помощью АСУ ТС необходимого числа информации об изменениях и при этом невозможности дальнейшего функционирования ТС в существующем виде. Тогда полученные от АСУ ТС собранные данные (отмечено на схеме как «Сбор данных») служат как исходные данные для последующего планирования новых версий топологии и конфигурации ТС. Цикл замыкается. Отметим, что этапы «1. Планирование» и «2. Настройка» относятся к сфере ответственности САПР ТС, этапы «3. Работа» и «4. Сбор данных» – к АСУ ТС. При этом полностью в САПР ТС выполняется только планирование, а в работе используется только АСУ ТС. Этапы настройки и сбора данных частично используют и САПР ТС и АСУ ТС, осуществляя между ними взаимодействие. Этому способствуют общие используемые математические модели и инструментарий (API графических библиотек, языки описания топологии).

Интересно отметить, что описанный нами жизненный цикл «1–2–3–4» (рис. 2) схож с применяемым в теории управления проектами циклом PDCA: «Plan-Do-Check-Act» [14, с. 4–5], и в целом можно считать его некоторой вариацией цикла PDCA. Более того, на наш взгляд, становится возможным применение карт Шухарта в соответствии с ГОСТ Р 50779.42-99 [15] для анализа жизненного цикла ТС, оценки его эффективности и принятия решений по модернизации ТС.

Итак, мы описали сходства и различия САПР ТС и АСУ ТС, их возможности, положительные и отрицательные стороны, отметили общность выполняемых ими задач, возможность как взаимозамены, так и взаимодополнения САПР ТС и АСУ ТС. Описали жизненный цикл полноценного функционирования крупных ТС, включающих большое число телекоммуникационных устройств, транспортных средств, пользователей и подсетей (в том числе автономных подсетей), с применением САПР ТС, АСУ ТС и унифицированным обменом между ними данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кручинин, С. В. К вопросу о терминологии в области мобильных сетей транспортных средств / С. В. Кручинин // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 1. – С. 117–120.
2. Опыт разработки архитектуры программного обеспечения САПР вычислительных сетей / А. В. Вишняков, С. В. Зотов, С. В. Кручинин, М. Ю. Кручинина // Теория и техника радиосвязи. – 2013. – № 1. – С. 98–104.
3. Кручинин, С. В. Синтез протокола автоматизированного управления и контроля гетерогенных телекоммуникационных устройств / С. В. Кручинин, С. В. Зотов // Научно-исследовательские публикации. – 2014. – № 3. – С. 55–68.
4. Кручинин, С. В. Телекоммуникационный модуль сопряжения абонентской и транспортной сетей / С. В. Кручинин // Патент на полезную модель RU 128 052 U1. Опубликовано 10.05.2013, бюл. № 13 ; заявка № 2012151805/08 ; заявл. 03.12.2012. – М. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
5. Кручинин, С. В. Маршрутизатор абонентский в децентрализованных одноранговых сетях транспортных средств / С. В. Кручинин, М. Ю. Кручинина // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2013. – № 11. – С. 136–139.
6. Акимов, В. Н. Радиомодемы диапазонов VHF/ UHF в задачах охраны и мониторинга объектов / В. Н. Акимов, А. И. Бабин, А. О. Шорин // Спецтехника и связь. – 2009. – № 1. – С. 50–58. – URL: <http://www.st-s.ru/sites/www.st-s.ru/files/pdf/articles/2009-01-akimov.pdf>
7. Кузнецов, А. М. Математическая модель мультиграфа телекоммуникационной сети и иерархия классов / А. М. Кузнецов // Научно-исследовательские публикации. – 2013. – № 1. – С. 87–93.
8. Кручинин С. В. Математическая модель контролируемых устройств // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 17. № 14 (117). С. 19–20.
9. Графическое ядро визуализации и анализа инженерных схем / С. В. Кручинин [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ № 2011618938 от 27.09.2011. – М. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
10. Кручинина, М. Ю. Описание базовых топологий с помощью графов в целях построения нотации компьютерных сетей / М. Ю. Кручинина // NB: Кибернетика и программирование. – 2014. – № 2. – С. 32–41. DOI: 10.7256/2306-4196.2014.2.11380. URL: http://e-notabene.ru/kp/article_11380.html
11. Вишняков А. В., Кручинин С. В., Кручинина М. Ю. Язык описания топологии вычислительных сетей NTDL // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. №15. С. 126–129.
12. Кручинин, С. В. Реализация службы имен в децентрализованных телекоммуникационных сетях / С. В. Кручинин, А. В. Вишняков // Научно-исследовательские публикации. – 2013. – № 2. – С. 132–147.
13. Зотов, С. В. Автоматизация тестирования устройств телекоммуникаций / С. В. Зотов // Научно-исследовательские публикации. – 2013. – № 1. – С. 49–55.
14. ГОСТ Р ИСО 9001–2008. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008.
15. ГОСТ Р 50779.42–99. Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2008.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004.8

А. В. Аникин, А. М. Дворянкин

АЛГОРИТМЫ И ВЫВОД НА ОНТОЛОГИЯХ ДЛЯ ПОИСКА И ИНТЕГРАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ОТКРЫТЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Волгоградский государственный технический университет
anton@anikin.name

В работе представлены алгоритмы и правила логического вывода на онтологиях для создания персонализированных электронных образовательных коллекций на основе поиска и интеграции образовательных ресурсов. Разработана архитектура автоматизированной системы построения таких коллекций. Предложенные алгоритмы, правила вывода на онтологиях и автоматизированная система позволяют повысить эффективность использования открытых электронных образовательных ресурсов в образовательном процессе.

Ключевые слова: Semantic Web, онтологии, OWL-DL, E-Learning, адаптивное обучение.

A. V. Anikin, A. M. Dvoryankin

THE ALGORITHMS AND ONTOLOGY REASONING FOR LEARNING RESOURCES RETRIEVAL AND INTEGRATION IN OPEN LEARNING NETWORK

Volgograd State Technical University

This paper presents an algorithm and ontology reasoning rules to create the personal collections of learning resources based on the learning resources retrieval and integration to increase the efficiency of usage of such resources in e-learning. In the framework of considered approach the software architecture for creating the personal collections of learning resources have been developed.

Keywords: Semantic Web, Ontology, OWL-DL, E-Learning, adaptive learning.

Ранее в работах [1–3] авторами был предложен подход для поиска электронных образовательных ресурсов (ЭОР) и их интеграции в персонализированные электронные образовательные коллекции (ЭОК) для поддержки образовательного процесса и управления им. Подход основан на использовании онтологий для моделирования предметной области учебной дисциплины, профиля обучаемого, ЭОР и персонализированной ЭОК.

Так, в рамках данного подхода, предметная область учебной дисциплины описывается компетенциями (знаниями, умениями, навыками), которые обучаемый должен получить в процессе изучения образовательного курса или его части. Описание выполняется на основе онтологии предметной области учебной дисциплины. Поле знаний предметной области учебной дисциплины представлено как множество концептов поля знаний и отношений между ними.

Профиль обучаемого описывается на основе онтологии профиля обучаемого с использованием текущих и целевых компетенций (знаний, умений, навыков различных уровней) обучаемого,

определенных на том же домене. Также он включает и другие индивидуальные характеристики обучаемого: предпочитаемый язык, текущий и целевой уровень овладения компетенциями и др.

ЭОР аннотируются на основе онтологии ЭОР с использованием компетенций (знаний, умений, навыков), которые обучаемый может получить, изучив данный ЭОР, и входных требований к компетенциям, которые необходимо получить до изучения данного ЭОР. Эти характеристики также определены на общем домене. Кроме того, в описание ЭОР включаются название ресурса, авторы, место хранения и тип ресурса, язык представления информации, уровень сложности, дидактическая роль и другие характеристики. Аннотированные таким образом ЭОР могут быть организованы в репозитории ЭОР для их дальнейшего использования.

Персонализированная электронная образовательная коллекция (ЭОК) создается на основе онтологии ЭОК в результате поиска и интеграции ЭОР и может быть использована непосредственно в образовательном процессе. Она пред-

ставляет собой множество ЭОР, отобранных в соответствии с профилем обучаемого, его текущими и целевыми компетенциями и другими требованиями. Также она включает множество отношений между ресурсами, задающих порядок изучения ЭОР, входящих в коллекцию, в процессе обучения. При этом онтология ЭОК, кроме концептов и отношений, включает также правила логического вывода на онтологиях для поиска ЭОР и их интеграции в ЭОК.

Для создания персонифицированных ЭОК необходимо выполнить поиск аннотированных ЭОР в репозитории. Множество полученных ЭОР должно удовлетворять параметрам обучаемого, таким как предпочитаемый язык представления информации, образовательные цели и текущее поле знаний. В некоторых случаях, когда не могут быть найдены ресурсы, удовлетворяющие одновременно и образовательным целям, и текущим компетенциям обучаемого (как входным требованиям для изучения ЭОР), необходимо провести поиск дополнительных ЭОР, позволяющих заполнить пробелы в текущем поле знаний обучаемого для изучения ЭОР с целевыми компетенциями.

Для реализации процесса поиска и интеграции ЭОР с использованием предложенных ранее онтологических моделей необходимо разработать алгоритмы и правила логического вывода на онтологиях, которые позволят последовательно выделить подмножества ЭОР в рамках репозитория ЭОР для наполнения коллекции, а также создать отношения между ресурсами коллекции, позволяющие управлять процессом обучения на данном множестве ЭОР.

Для описания правил логического вывода для поиска ЭОР и построения персонифицированных ЭОК выбран язык SWRL (Semantic Web

Rule Language). SWRL расширяет OWL-DL (Web Ontology Language – Description Logic) и основан на правилах логики предикатов первого порядка; позволяет описывать правила логического вывода в виде набора клауз Хорна.

Для построения персонифицированной ЭОК был предложен следующий алгоритм:

1. Построить множество ЭОР, которые необходимо изучить для получения компетенций, определенных целевым полем знаний обучаемого.

2. Построить множество дополнительных ЭОР, необходимых для изучения ЭОР, определенных в п. 1 алгоритма.

3. Построить связи между ЭОР коллекции.

4. Вывести информацию о полученном множестве ресурсов с возможностью навигации по ним в соответствии со связями, заданными в п. 3 алгоритма, с выделением дополнительных ЭОР, определенных в п. 2 алгоритма.

Для реализации 1 и 3 шагов алгоритма разработаны правила логического вывода, для реализации 2 шага – алгоритм поиска дополнительных и вспомогательных ЭОР.

Так, для построения множества ЭОР на первом шаге алгоритма последовательно применим правила вывода, описанные далее (для поиска ЭОР по языку представления информации, целевым компетенциям в соответствии с целевым полем знаний обучаемого, входным требованиям к изучению ЭОР в соответствии с текущим полем знаний обучаемого с учетом уровня владения компетенциями и уровнем сложности представления информации), для редуцирования множества ЭОР, определенных в репозитории ЭОР.

SWRL-правило для поиска ЭОР на основе языка представления информации имеет вид:

$$COL:hasStudent(?c,?u) \wedge L:hasLanguage(?u,?l) \wedge ELR:hasLanguage(?r,?l) \rightarrow COL:hasResourceByLanguage(?c,?r),$$

где $?c$, $?u$, $?l$, $?r$ – переменные SWRL-правила, $COL:hasStudent$, $L:hasLanguage$, $ELR:hasLanguage$, $COL:hasResourceByLanguage$ – отношения онтоло-

гий с соответствующими префиксами онтологий.

Правила вывода для поиска ЭОР по целевым компетенциям имеют вид:

$$COL:hasStudent(?c,?u) \wedge L:hasIntentionalDataDomain(?u,?d) \wedge DD:hasCompetence(?d,?cmp1) \wedge ELR:hasOutputCompetence(?r,?cmp2) \wedge DD:is(?cmp2, ?cmp) \wedge DD:is(?cmp1,?cmp) \rightarrow COL:hasResourceByIntentionalCompetences(?c,?r).$$

Таким образом, данные правила определяют подмножество ЭОР, соответствующих профилю обучаемого по языку представления ин-

формации и целевым компетенциям.

SWRL-правило для поиска ЭОР на основе целевого поля знаний обучаемого имеет вид:

$$\begin{aligned}
& COL:hasStudent(?c, ?u) \wedge COL:hasResourceByIntentionalCompetences(?c, ?r) \wedge \\
& L:hasIntentionalDataDomain(?u, ?d) \wedge DD:hasCompetence(?d, ?cmp1) \wedge \\
& ELR:hasOutputCompetence(?r, ?cmp2) \wedge DD:is(?cmp2, ?cmp) \wedge DD:is(?cmp1, ?cmp) \wedge \\
& L:hasIntentionalComplexity(?cmp1, ?level) \wedge ELR:hasOutputComplexity(?cmp2, ?level) \rightarrow \\
& COL:hasResourceByOutputDomain(?c, ?r).
\end{aligned}$$

Для ситуации, когда ЭОР с полным совпадением по уровню сложности компетенций недостаточно или они отсутствуют, аналогично определены два дополнительных правила, позволяющие включать ресурсы с уровнем сложности на один уровень ниже искомого. Данные правила позволяют определить подмножество ЭОР, удовлетворяющих целевым компетенциям обучаемого с учетом их уровня сложности.

Множество ЭОР, полученных с использованием отношения *COL:hasResourceByOutputDomain*, может покрывать (полностью или частично) множество целевых компетенций обучаемого. Данное множество необходимо проверить на соответствие входных компетенций входящих в него ЭОР текущим компетенциям обучаемого. В случае, если текущих компетенций обучаемого недостаточно для изучения ЭОР, необходимо провести поиск дополнительных ЭОР, используя следующий алгоритм:

1. Включить в ЭОК ресурсы, полученные ранее на этапе поиска: *COL:hasResourceByOutputDomain(?c, ?r) → COL:hasResource(?c, ?r)*.

2. Определить множество R_0 ЭОР как множество ресурсов, необходимых для получения целевых компетенций.

3. Определить множество целевых компетенций обучаемого $CMPr_0$ с соответствующими уровнями L_0 .

4. Пока имеются компетенции $?cmp$, для которых соответствующие компетенции $?cmp2$ текущего поля знаний обучаемого с уровнем овладения не ниже требуемого не найдены, выполнять не более $N = 3$ раз:

4.1. Определить множество входных компетенций $?cmp$, заданных отношением *ELR:hasOutputCompetence(?r, ?cmp1) ^ DD:is(?cmp1, ?cmp)* для каждого ЭОР, для которого выражение *COL:hasResource(?c, ?r)* истинно.

4.2. Для компетенций $?cmp2$, для которых соответствующие компетенции в текущем поле знаний обучаемого не найдены, с уровнем не ниже требуемого выполнять:

4.2.1. Добавить компетенцию $?cmp2$ в целевое поле знаний обучаемого с соответствующими отношениями, задающими уровень знаний:

$$\begin{aligned}
& DD:hasCompetence(?d1, ?cmp2), \\
& \text{где } L:hasIntentionalDataDomain(?u, ?d1) \\
& \text{и } L:hasIntentionalComplexity(?cmp2, ?level), \\
& \text{где } ELR:hasInputComplexity(?cmp1, ?level).
\end{aligned}$$

4.3. Применить правила логического вывода, рассмотренные выше, и правило, определенное на шаге 1 алгоритма, для поиска дополнительных ЭОР.

5. Найти разность R_1 множеств ЭОР, определенных отношением *COL:hasResource(?c, ?r)* и множества R_0 .

6. Определить подмножество R_2 множества R_1 вспомогательных ЭОР, для которых одновременно выполняются условия:

– входные компетенции отличны или имеют различный уровень с компетенциями текущего поля знаний обучаемого;

– входные компетенции не являются выходными компетенциями множеств ЭОР R_0 и R_1 .

Таким образом, с использованием разработанного алгоритма создается множество ЭОР R_0 , позволяющее обучаемому получить целевые компетенции. Также создается множество дополнительных ЭОР R_1 , позволяющее обучаемому получить компетенции, необходимые для изучения целевых ЭОР из множества R_0 . Кроме того, создается множество вспомогательных ЭОР R_2 , не включенных в множество R_1 из-за превышения длины цепочки дополнительных ресурсов $N = 3$ для использования обучаемым в случае недостаточности основных и дополнительных ресурсов коллекции.

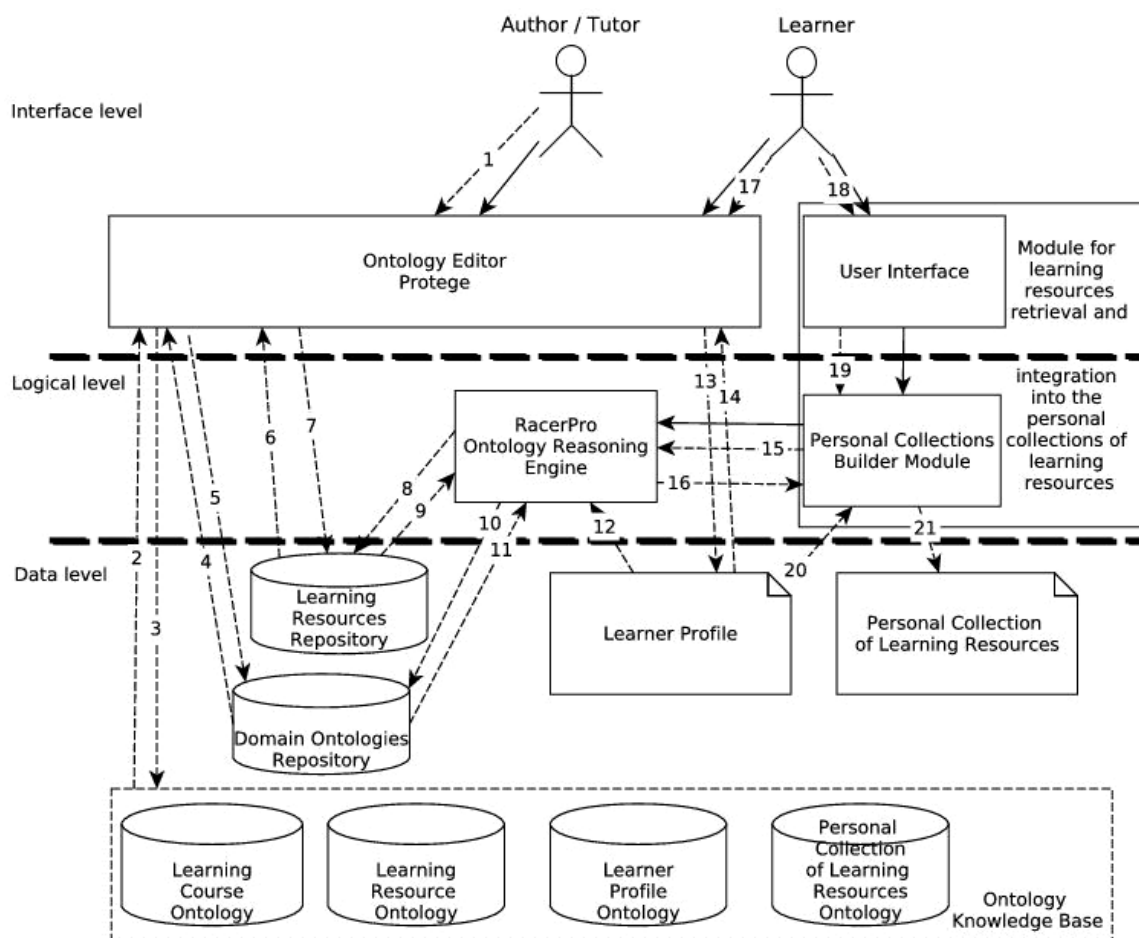
Персонафицированная ЭОК представляет собой множество ЭОР, образованных множествами целевых ЭОР R_0 , дополнительных ЭОР R_1 (оба множества ЭОР определены отношением *COL:hasResource*) и множеством вспомогательных ЭОР R_2 , а также множеством логических отношений между ЭОР, определенных правилом:

$$\begin{aligned}
& COL:hasResource(?c, ?r1) \wedge COL:hasResource(?c, ?r2) \wedge \\
& ELR:hasOutputCompetence(?r1, ?cmp1) \wedge ELR:hasInputCompetence(?r2, \\
& ?cmp2) \wedge DD:is(?cmp1, ?cmp) \wedge DD:is(?cmp2, ?cmp) \rightarrow \\
& COL:hasNextResource(?r1, ?r2).
\end{aligned}$$

Разработанные алгоритмы и набор правил логического вывода на онтологиях позволяют создавать персонифицированные ЭОК в соответствии с образовательными целями обучаемого, его текущим полем знаний, персональными характеристиками и предпочтениями. Коллекция включает в себя отобранные из репозитория ЭОР и отношения между ЭОР для навигации и управления процессом обучения на множестве ЭОР, включенных в коллекцию. Набор характеристик обучаемого и ЭОР, а так-

же множество правил вывода могут быть расширены путем модификации соответствующих онтологий без необходимости внесения изменений в программные средства.

Для автоматизации процесса создания персонифицированных ЭОК на основе разработанных онтологий, алгоритмов и правил логического вывода на онтологиях предложена архитектура автоматизированной системы (см. рисунок), включающая уровни интерфейса, логический уровень и уровень данных.



Архитектура системы построения персонифицированных ЭОК

Уровень интерфейса позволяет создавать предметные онтологии конкретных учебных дисциплин, аннотации ЭОР и описывать профиль обучаемого с использованием редактора онтологий. Логический уровень представлен обработкой данных с использованием разработанных правил вывода на онтологиях и алгоритмов и поддерживается машиной вывода RacerPro и модулем построения персонифицированных ЭОК. Уровень данных представлен четырьмя предметными онтологиями, репозиториями для хранения предметных онтологий

учебных дисциплин и аннотированных ЭОР, профиля обучаемого и создаваемой персонифицированной ЭОК.

На приведенном рисунке: 1 – знания автора о предметной области учебной дисциплины, образовательных ресурсах и обучаемом; 2, 3 – онтология предметной области конкретной дисциплины (OWL); 4, 5 – предметные онтологии учебной дисциплины, созданные или модифицированные автором/преподавателем; 6, 7 – аннотации ЭОР, созданные или модифицированные автором/преподавателем; 8 – запрос

RacerPro к репозиторию ЭОР; 9 – аннотации ЭОР (OWL); 10 – запрос RacerPro к репозиторию предметных онтологий; 11 – предметная онтология конкретной учебной дисциплины (OWL); 12 – профиль обучаемого для проведения логического вывода; 13, 14 – профиль обучаемого, созданный или модифицированный автором/преподавателем или обучаемым; 15 – запрос на логический вывод (nRQL); 16 – результаты логического вывода (ресурсы и отношения коллекции, nRQL); 17 – информация об обучаемом; 18 – информация о профиле обучаемого (URL); 19 – информация об URL профиля обучаемого и запрос на проведение логического вывода на онтологиях; 20 – профиль обучаемого (OWL); 21 – персонифицированная ЭОК (HTML).

Таким образом, представленная архитектура позволяет автоматизировать процесс построения персонифицированных ЭОК на основе поиска и интеграции открытых ЭОР с применением онтологических моделей, правил логического вывода на онтологиях и алгоритмов, с использованием машины вывода RacerPro и программного модуля построения персонифицированных ЭОК.

В работе разработаны алгоритмы и правила логического вывода на онтологиях для поиска аннотированных ЭОР и их интеграции в персонифицированные на основе онтологического

профиля обучаемого ЭОК. Предложена архитектура автоматизированной системы для поддержки процесса поиска ЭОР и создания ЭОК. Разработанные модели, алгоритмы, правила логического вывода и архитектура автоматизированной системы позволяют повысить эффективность использования открытых ЭОР в образовательном процессе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модели и инструментальные средства интеграции распределенных ресурсов в открытых образовательных сетях / А. В. Аникин, А. М. Дворянkin, И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова // Информационные технологии в образовании, технике и медицине : мат-лы междунар. конф., Волгоград, 21–24 сент. 2009 г. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2009. – С. 16.
2. Поиск и интеграция разнородных распределенных образовательных ресурсов на основе онтологических моделей / И. Г. Жукова, А. М. Дворянkin, М. Б. Сипливая, А. В. Аникин // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – Вып. 2, № 2. – С. 34–36.
3. Жукова, И. Г. Модели и инструментальные средства интеграции распределенных ресурсов в открытых образовательных сетях / И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова, А. В. Аникин // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 11. – С. 91–94.
4. RacerPro [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://racer.sts.tuhh.de/>
5. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML [Электронный ресурс] // Режим доступа : <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>

УДК 004.8

А. В. Аникин, И. Г. Жукова

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ПОИСКА И ИНТЕГРАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В ОТКРЫТЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Волгоградский государственный технический университет

anton@anikin.name

В работе представлен подход для создания персонифицированных коллекций образовательных ресурсов на основе онтологических моделей. Эти модели используются в образовательном процессе для поиска и интеграции образовательных ресурсов. Такой подход позволяет повысить эффективность использования открытых электронных образовательных ресурсов в образовательном процессе. В работе разработано множество онтологий (онтология предметной области учебной дисциплины, онтология электронных образовательных ресурсов, профиль обучаемого и онтология электронной образовательной коллекции). Предложена концепция поиска и интеграции образовательных ресурсов на основе онтологических моделей.

Ключевые слова: Semantic Web, онтологии, OWL-DL, E-Learning, адаптивное обучение.

A. V. Anikin, I. G. Zhukova

ONTOLOGY BASED MODELS FOR LEARNING RESOURCES RETRIEVAL AND INTEGRATION IN OPEN LEARNING NETWORK

Volgograd State Technical University

This paper presents an ontology-based approach to create the personal collections of learning resources. To manage the learning process the set of ontologies (ontologies of learning course domain, electronic learning resources, learner's profile and personal collections) is elaborated. The concept of ontology-based learning resources retrieval and integration is presented to increase the efficiency of usage of such resources in e-learning.

Keywords: Semantic Web, Ontology, OWL-DL, E-Learning, adaptive learning.

Современные образовательные технологии становятся все более ориентированными на обучаемого, его образовательные цели, текущие знания и другие требования. При этом встают задачи управления образовательным процессом и обеспечения его образовательными ресурсами с учетом таких требований. Так, понятие управления образовательным процессом (Learning management) определяется как возможность разработки педагогических стратегий для достижения образовательных целей конкретным обучаемым [1], при этом процесс разработки модели управления образованием (LMDP – Learning Management Design Process) включает в себя перечень вопросов управления образовательным процессом, объединенных в три фазы разработки – определение образовательных целей, определение образовательных стратегий и ресурсов, оценка достижений.

Известно множество систем управления обучением (LMS – Learning Management Systems), (Moodle, Edmodo, Blackboard и др.), поддерживающих данный подход. Такие системы обеспечивают возможность создания и использования содержания ученой дисциплины – специализированного образовательного контента, мониторинга участия студентов в образовательном процессе, возможность оценки их достижений и освоения учебного курса. Создание образовательного контента – достаточно трудоемкий процесс. Контент, создаваемый с использованием LMS, обычно ориентирован на группу обучаемых и не учитывает их индивидуальные особенности. При этом обеспечение персонификации и адаптивности образовательного процесса повышает трудоемкость создания образовательного контента. Также, после его создания, он обычно доступен для использования только в рамках данной LMS и недоступен для повторного использования авторами других курсов в других системах.

Для решения этих проблем возможно использование в процессе обучения открытых образовательных ресурсов (в том числе электронных образовательных ресурсов (ЭОР)). Такие ресурсы имеют различный уровень сложности изложения и широты охвата материала, используют различные формы его представления и могут удовлетворять требованиям различных учебных групп и конкретных обучаемых. Использование таких ресурсов может позволить сократить затраты на разработку учебных курсов. Создание нового образовательного контен-

та в виде открытых ЭОР, доступных для совместного и повторного использования, имеет те же преимущества. Подход, основанный на использовании таких ресурсов – открытые образовательные сети (Open Learning Network) [2] – объединяет преимущества систем управления обучением (LMS) и подхода персонального образовательного окружения (Personal Learning Environment), в котором обучаемый собирает и организует образовательный контент самостоятельно. Подход на основе открытой образовательной сети позволяет использовать открытые ЭОР для поддержки образовательного процесса и учесть как цели, определяемые учебным заведением, так и цели обучаемого, а также его персональные характеристики.

При реализации такого подхода основными задачами являются поиск ЭОР, удовлетворяющих образовательным целям и требованиям обучаемого, и дальнейшее использование ЭОР в образовательном процессе.

Для решения задачи поиска ЭОР в сети Интернет традиционно используются поисковые системы общего назначения. Однако они не разрабатывались для поиска ЭОР и не учитывают связи информационных ресурсов с образовательными целями, требования для их изучения и другие особенности предметной области.

Эффективность поиска ЭОР можно повысить за счет аннотирования ресурсов с использованием соответствующих стандартов метаданных (DCMI, LOM (и др.), ALOCOM Framework). Использование подходов Semantic Web, в частности, использование онтологии как модели представления знаний, является следующим шагом повышения эффективности поиска ЭОР. Использование связанных онтологий (посредством общего домена концептов и отношений между концептами) позволяет аннотировать существующие и создаваемые ресурсы таким образом, что программные агенты, основываясь на метаданных, могут решать задачи поиска и интеграции ЭОР. Также онтология, как модель представления знаний, позволяет использовать правила логического вывода для получения новых знаний, новых отношений между концептами. Эти данные могут использоваться для интерпретации семантики и поиска образовательного контента.

Так, модели на основе онтологии позволяют описывать предметную область, образовательные цели, образовательные объекты, характеристики обучаемого (работы S.Sosnovsky,

P.Dolog, N.Henze, P.Brusilovsky, W.Nejdl [3], N.Pukkhem [4], проекты ELENA, CREAM и др.) Таким образом, использование онтологических моделей является перспективным для описания и поиска ЭОР и позволяет описывать свойства объектов и субъектов образовательного процесса (обучаемого, предметной области учебной дисциплины, образовательных ресурсов). Также использование онтологий позволяет автоматизировать процесс поиска ЭОР за счет реализации логического вывода на онтологиях.

Предлагаемый авторами подход [5] основан на использовании онтологий для моделирования предметной области учебной дисциплины, профиля обучаемого, ЭОР и персонифицированной электронной образовательной коллекции (ЭОК) и позволяет повысить эффективность поиска ЭОР и их использования в образовательном процессе.

В данной работе рассматриваются онтологические модели представления знаний для реализации предложенного подхода и методика их использования для решения задачи построения персонифицированной ЭОК.

Для интеграции и управления предметными онтологиями разработана метаонтология поиска и интеграции ЭОР в персонифицированные ЭОК (рис. 1). Она определяет непосредственно предметные онтологии (онтологию предметной области учебной дисциплины, онтологию ЭОР, онтологию профиля обучаемого и онтологию ЭОК) и отношения между ними.

Рассмотрим онтологии, определенные в рамках метаонтологии.

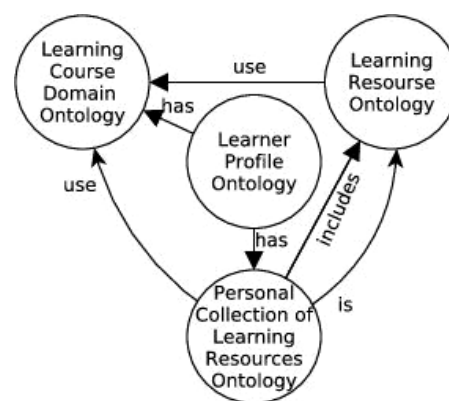


Рис. 1. Метаонтология поиска и интеграции ЭОР в персонифицированные ЭОК

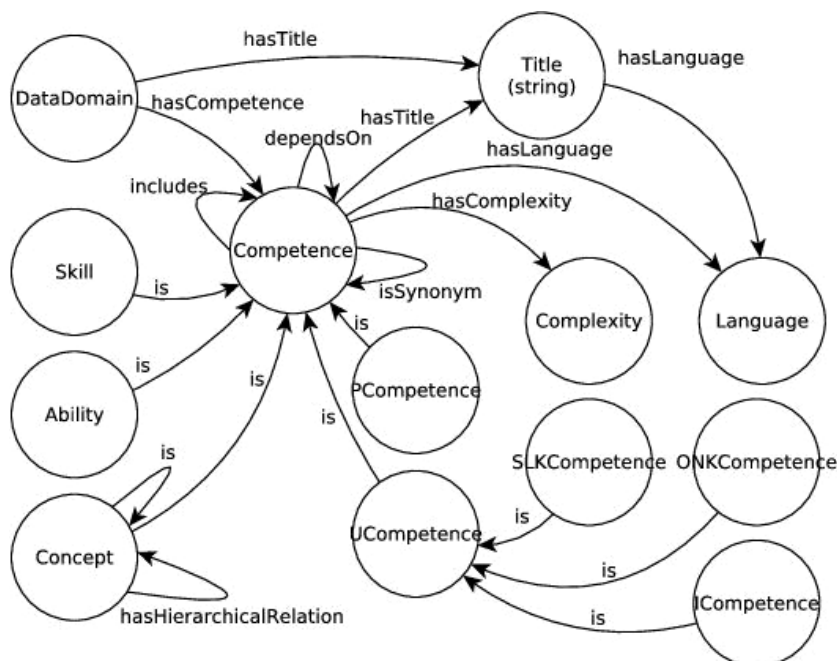


Рис. 2. Онтология предметной области учебной дисциплины

Онтология предметной области учебной дисциплины (рис. 2) определена как

$$O_{DD} = \langle C_{DD}, Inst_{DD}, R_{DD}, I_{DD} \rangle,$$

где C_{DD} – конечное множество концептов онтологии предметной области учебной дисциплины, $C_{DD} = \{C_{DD1}, C_{DD2}, C_{DD3}, C_{DD4}, C_{DD5}, C_{DD6},$

$C_{DD7}, C_{DD8}, C_{DD9}, C_{DD10}, C_{DD11}, C_{DD12}\}$; C_{DD1} – класс *DataDomain* для определения предметной области конкретной дисциплины; C_{DD2} – класс *Competence* для определения компетенций учебной дисциплины; C_{DD3} – класс *Concept* для определения концептов предметной области учебной дисциплины (подкласс C_{DD2}); C_{DD4} –

класс UCompetence для определения универсальных компетенций; C_{DD5} – класс PCompetence для определения профессиональных компетенций; C_{DD6} – класс ONKCompetence для определения общенаучных компетенций; C_{DD7} – класс ICompetence для определения инструментальных компетенций; C_{DD8} – класс SLKCompetence для определения социально-личностных/общекультурных компетенций; C_{DD9} – класс Skill для определения навыков, получаемых в рамках предметной области учебной дисциплины, являющихся подклассом класса C_{DD2} ; C_{DD10} – класс Ability для определения умений, получаемых в рамках предметной области учебной дисциплины, являющихся подклассом класса C_{DD2} ; C_{DD11} – класс Language, определяющий язык представления информации в предметной области учебной дисциплины; C_{DD12} – класс Complexity для определения уровня освоения компетенций учебной дисциплины;

$Inst_{DD}$ – множество компетенций, концептов

предметной области учебной дисциплины, умений и навыков, представленных на естественном языке – экземпляры классов C_{DD} ; $Inst_{DD} = \{i_{DD1}, i_{DD2}, \dots, i_{DDj}, \dots, i_{DDn}\}$;

R_{DD} – конечное множество отношений онтологии поля знаний учебной дисциплины; $R_{DD} = \{r_{DD1}, r_{DD2}, r_{DD3}, r_{DD4}, r_{DD5}, r_{DD6}, r_{DD7}, r_{DD8}, r_{DD9}\}$; r_{DD1} – отношение hasLanguage; r_{DD2} – отношение hasComplexity; r_{DD3} – отношение includes; r_{DD4} – отношение hasHierarchicalRelation; r_{DD5} – отношение dependsOn; r_{DD6} – отношение isSynonym; r_{DD7} – отношение is; r_{DD8} – отношение hasTitle; r_{DD9} – отношение hasCompetence;

$I_{DD} = \emptyset$ – пустое множество правил интерпретации.

Разработанная онтология предметной области учебной дисциплины позволяет описывать предметную область конкретных учебных дисциплин, учитывая компетенции различных видов и уровней, знания, умения, навыки, которые обучаемый может получить в данной предметной области.

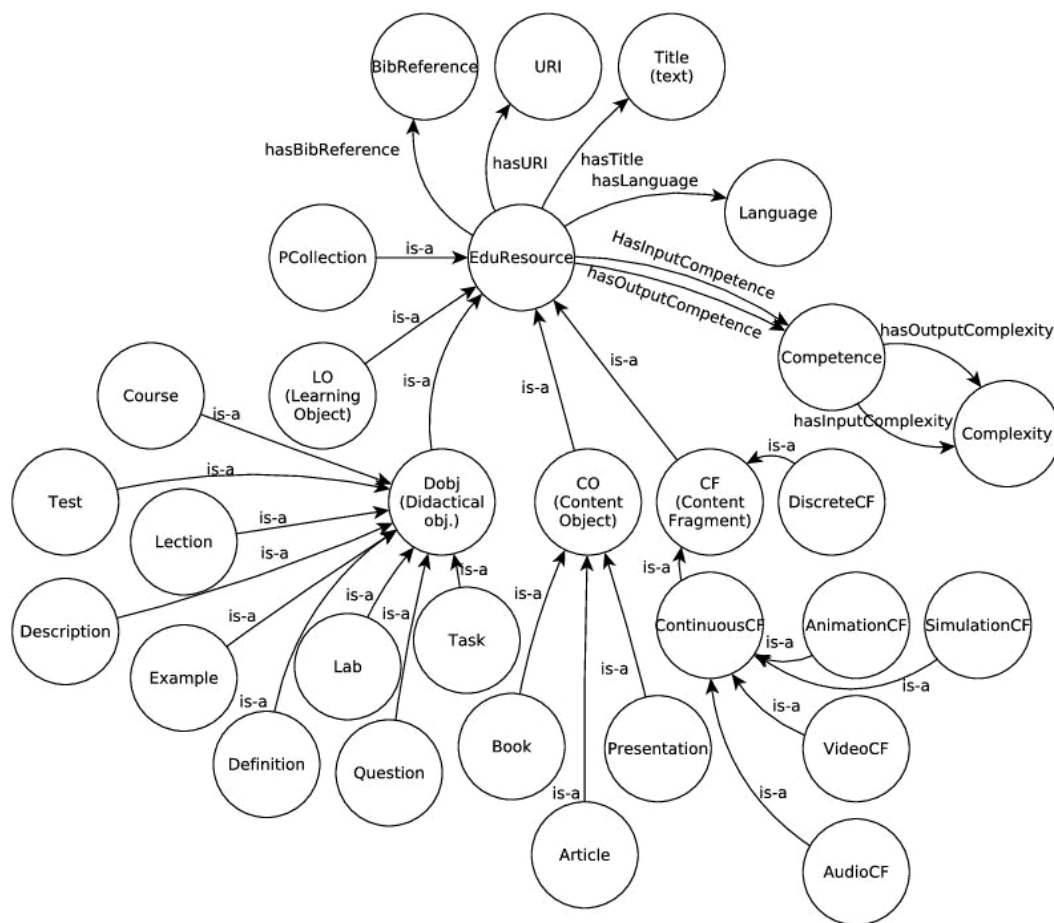


Рис. 3. Онтологическая модель ЭОР (фрагмент)

Онтология ЭОР имеет вид (рис. 3):

$$O_{ELR} = \langle C_{ELR}, Inst_{ELR}, R_{ELR}, I_{ELR} \rangle,$$

где C_{ELR} – конечное множество концептов он-

тологии электронных образовательных ресурсов; $C_{ELR} = \{c_{ELR1}, \dots, c_{ELR44}\}$; c_{ELRi} – концепт онтологической модели ЭОР;

$Inst_{ELR}$ – множество экземпляров классов онтологии ЭОР, аннотированных на онтологии электронных образовательных ресурсов, образующих репозиторий ЭОР; $Inst_{ELR} = \{i_{ELR1}, i_{ELR2}, \dots, i_{ELRj}, \dots, i_{ELRn}\}$;

R_{ELR} – множество отношений онтологии ЭОР; $R_{ELR} = \{r_{ELR1}, r_{ELR2}, r_{ELR3}, r_{ELR4}, r_{ELR5}, r_{ELR6}, r_{ELR7}, r_{ELR8}\}$; $I_{ELR} = \emptyset$.

Онтологическая модель ЭОР дает возможность описывать образовательные ресурсы независимо от их формы представления, расположения, дидактической роли. Такое описание позволяет создавать репозитории ЭОР на основе их аннотаций. Описание ЭОР, кроме перечисленных выше свойств, включает язык представления информации, образовательные цели в виде выходных компетенций, входные требования для изучения ресурса на основе компетенций, что позволяет создавать персонифицированные образовательные коллекции на основе таких ресурсов, а также задавать образовательные последовательности ресурсов в рамках коллекции для управления процессом обучения. Компетенции описываются на основе знаний, умений, навыков, определенных на общем домене онтологической модели поля знаний учебной дисциплины, с учетом сложности и уровня освоения соответствующих компетенций.

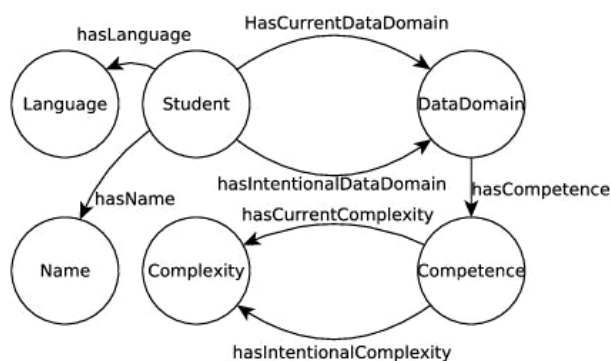


Рис. 4. Онтология профиля обучаемого

Онтологическая модель профиля обучаемого имеет вид (рис. 4):

$$O_L = \langle C_L, Inst_L, R_L, I_L \rangle,$$

где C_L – конечное множество концептов онтологии профиля обучаемого; $C_L = \{C_{L1}, C_{L2}, C_{L3}, C_{L4}\}$;

$Inst_L$ – множество экземпляров классов онтологии профиля обучаемого; $Inst_L = \{i_{L1}, i_{L2}, \dots, i_{Lj}, \dots, i_{Ln}\}$;

R_L – конечное множество отношений между концептами; $R_L = \{r_{L1}, r_{L2}, r_{L3}, r_{L4}, r_{L5}, r_{L6}\}$; $I_L = \emptyset$.

Таким образом, онтологическая модель профиля обучаемого позволяет описывать такие параметры обучаемого, как предпочитаемый язык, текущее поле знаний в рамках конкретной учебной дисциплины, включая уровень знаний для различных структурных элементов дисциплины, уровень освоения компетенций учебной дисциплины, образовательные цели (как набор компетенций в рамках учебной дисциплины).

В данной модели компетенции также определены на общем домене онтологии учебной дисциплины, что позволяет использовать описанный на онтологии профиль обучаемого для поиска ЭОР в соответствии с целями обучения и построения персонифицированных электронных образовательных коллекций.

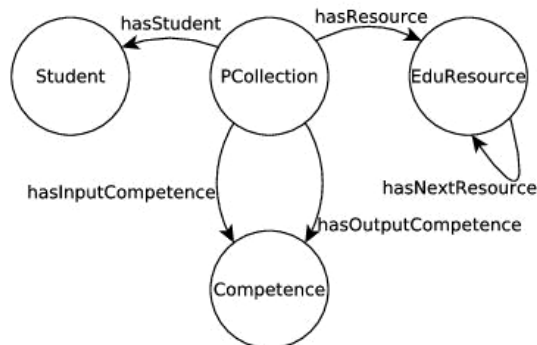


Рис. 5. Онтология персонифицированной ЭОК

Онтологическая модель персонифицированной ЭОК (рис. 5) имеет вид:

$$O_{COL} = \langle C_{COL}, Inst_{COL}, R_{COL}, I_{COL} \rangle,$$

где C_{COL} – конечное множество концептов онтологии персонифицированной электронной образовательной коллекции; $C_{COL} = \{C_{COL1}, C_{COL2}, C_{COL3}, C_{COL4}\}$;

$Inst_{COL}$ – множество экземпляров классов онтологии персонифицированных ЭОК (в том числе построенные персонифицированные ЭОК, образующие репозиторий ЭОК); $Inst_{COL} = \{inst_{COL1}, inst_{COL2}, \dots, inst_{COLj}, \dots, inst_{COLn}\}$;

R_{COL} – множество отношений онтологии персонифицированной ЭОК; $R_{COL} = \{r_{COL1}, r_{COL2}, r_{COL3}, r_{COL4}, r_{COL5}\}$;

I_{COL} – множество правил вывода онтологической модели ЭОК; $I_{COL} = \{i_{COL1}, i_{COL2}, \dots, i_{COLj}, \dots, i_{COLn}\}$.

Таким образом, онтологическая модель персонифицированной ЭОК позволяет описывать ЭОК как конечное множество ЭОР, отобранных среди ресурсов репозитория в соответствии с профилем обучаемого.

Также модель включает отношения между ресурсами коллекции, задающие возможный порядок изучения ресурсов, что позволяет управлять процессом обучения, и правила вывода, позволяющие проводить поиск ЭОР и их интеграцию непосредственно в персонифицированные ЭОК.

На основе разработанных моделей предложена концепция поиска ЭОР и интеграции их в персонифицированные ЭОК. Она включает в себя следующие этапы (рис. 6):

1. На основе разработанной онтологии учебной дисциплины (1) создать онтологию предметной области конкретной учебной дисциплины (2).

2. Сохранить созданную онтологию в репозитории предметных онтологий учебных дисциплин для совместного доступа и повторного использования.

3. На основе разработанной онтологии ЭОР (4) и созданной онтологии конкретной учебной дисциплины (3) проаннотировать электронные образовательные ресурсы.

4. Сохранить аннотации в репозиторий ЭОР (5).

5. На основе разработанной онтологии профиля обучаемого (7) и онтологии конкретной учебной дисциплины (6) создать профиль обучаемого (8). Текущие и целевые компетенции могут задаваться как самим обучаемым, так и на основе истории взаимодействия обучаемого с системой в процессе обучения и оценки результатов.

6. На основе разработанной онтологии ЭОК (12), созданных онтологий конкретной учебной дисциплины (9), репозитория ЭОР (10), профиля обучаемого (11) создать персонифицированную ЭОК (13).

7. Использовать созданную ЭОК (15), интегрирующую образовательные ресурсы (14), в учебном процессе.

Этапы 1–5 выполняются с использованием редактора онтологий или специализированного программного обеспечения. Этап 6 выполняется с использованием правил логического вывода на онтологиях и машины логического вывода.

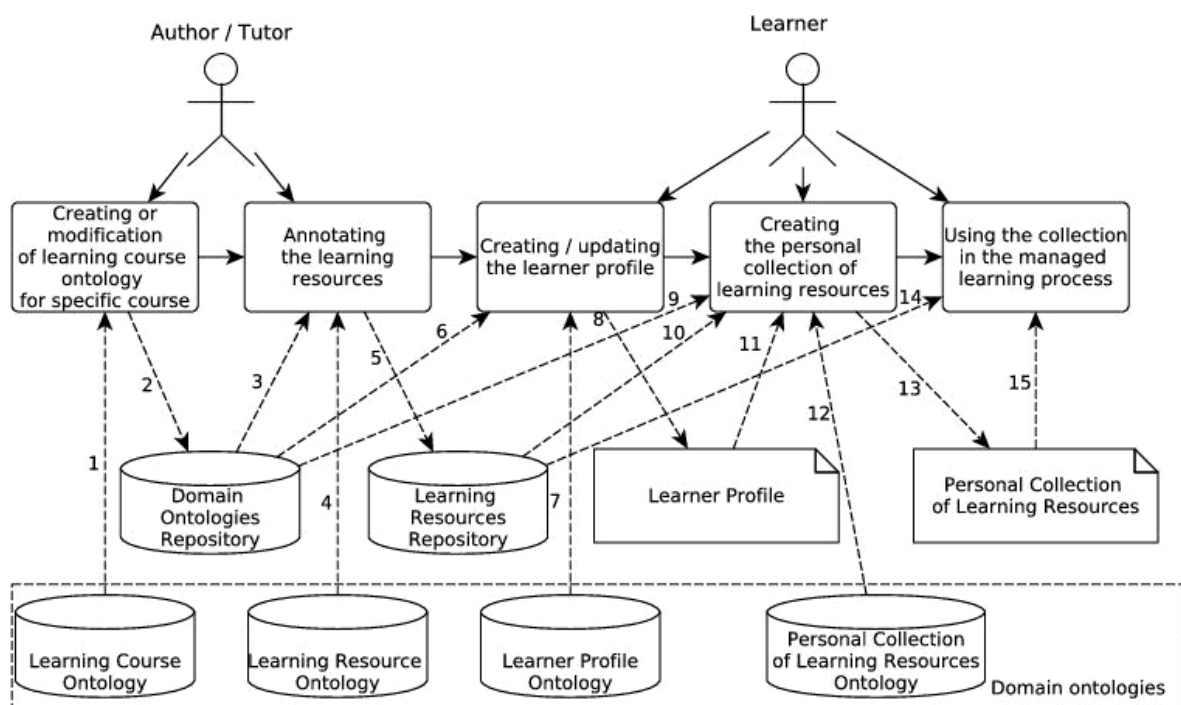


Рис. 6. Создание персонифицированных ЭОК с использованием онтологий

Предложенная концепция поиска и интеграции ЭОР в персонифицированные ЭОК позволяет повысить эффективность использования открытых электронных образовательных ресурсов в образовательном процессе за счет использования онтологических моделей представления знаний и логического вывода на онтологиях.

Таким образом, в рамках работы разработана модель представления знаний, включающая в себя предметные онтологии и метаонтологию, обеспечивающая консистентность и интеграцию описаний ЭОР, предметной области учебной дисциплины, профиля обучаемого и персонифицированной ЭОК. Это возможно за счет

использования общего домена для определения следующих компонент:

текущих и целевых компетенций, определенных как знания (в виде терминов – концептов предметной области учебной дисциплины), умения и навыки;

языка представления и восприятия информации;

уровня сложности ЭОР и уровня освоения компетенций обучаемым.

Онтологическая модель представления знаний является модульной и расширяемой, поддерживает накопление, совместное и повторное использование знаний о предметной области учебных дисциплин и электронных образовательных ресурсах. Онтологии реализованы с использованием языка OWL-DL.

Также в работе определена концепция поиска и интеграции ЭОР в персонифицированные ЭОК, включающая в себя набор действий, позволяющих использовать разработанные онтологии для решения задачи адаптивного поиска ЭОР и создания персонифицированных ЭОК для поддержки образовательного процесса и управления им. Для реализации процесса построения

ЭОК необходима разработка соответствующих правил логического вывода, включенных в онтологию ЭОК, и алгоритмов, что позволит повысить эффективность использования открытых ЭОР в образовательном процессе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Smith, R.* Rethinking Teacher Education: Teacher education in the knowledge age / R. Smith, D. Lynch. – Sydney: AACLM Press, 2010.
2. *Mott, J.* Envisioning the Post-LMS Era: The Open Learning Network / EDUCAUSE Quarterly. 33 (1) 2010. – Pp. 1–9.
3. *Sosnovsky, S.* Translation of overlay models of student knowledge for relative domains based on domain ontology mapping / S. Sosnovsky, P. Dolog, N. Henze, P. Brusilovsky, W. Nejdl – R. Luckin, K. R. Koedinger and J. Greer (eds.) Proceedings of 13th International Conference on Artificial Intelligence in Education, AI-ED 2007, Marina Del Rey, CA, July 9–13, 2007. IOS – 2007. – Pp. 289–296.
4. *Pukkhem, N.:* Ontology-based Semantic Approach for Learning Object Recommendation / International Journal on Information Technology; Dec 2013, Vol. 3 Issue 4, 2013. – P. 12.
5. *Жукова, И. Г.* Модели и инструментальные средства интеграции распределенных ресурсов в открытых образовательных сетях / И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова, А. В. Аникин // Изв. ВолГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2010. – № 11. – С. 91–94.

УДК 681.3.00: 621.396.6

О. А. Астафурова, Н. А. Сальникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МУНИЦИПАЛЬНЫМИ ФИНАНСАМИ

Российская академия народного хозяйства и государственной службы

Волгоградский филиал

olgast@vags.ru, ns3112@mail.ru

В статье описан подход к построению информационно-аналитической системы исполнения местных бюджетов, ориентированной на поддержку принятия управленческих решений. Представлена внедренная разработка. Описаны пути ее совершенствования. Система предназначена для выполнения анализа и оценки эффективности доходов и расходов местных бюджетов и предоставляет средства для управления показателями, влияющими на формирование доходной и расходной части бюджета.

Ключевые слова: информационно-аналитическая система, программирование, управленческие решения, исполнение местных бюджетов, доходная часть бюджета, расходная часть бюджета, прогноз.

О. А. Астафурова, Н. А. Сальникова

PROGNOSTIC COMPLEXES BUILDING TECHNOLOGY

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,

Volgograd branch

This article described the construction of the research and information system of execution of local budgets, oriented to support of acceptance of administrative decisions. The inculcated development is presented. The ways of her perfection are described. The system is intended for implementation of analysis and estimation of efficiency of acuestss and charges of local budgets and gives facilities for a management by indexes influencing on forming of profitable and expense part of budget.

Keywords: information-analytical system, programming, management decision-making, revenues of local budgets, expenditures of local budgets, forecast.

Повышение социально-экономической эффективности органов местного самоуправления напрямую зависит от созданной системы управ-

ления муниципальными финансами. На местном уровне участниками бюджетного процесса являются муниципальные, региональные и фе-

деральные органы власти. вопросы эффективного взаимодействия структур разных уровней в рамках принципа единства бюджетной системы РФ, а также прогнозирования социально-экономических параметров муниципальных образований актуальны и в настоящий момент [1].

Формирование государственных структур, выполняющих различные функции по управлению бюджетом на местном уровне, параллельно с федеральными и региональными представляет собой комплексную задачу. Для ее эффективного решения необходимо применять математические методы моделирования и прогнозирования.

Моделирование системы исполнения местных бюджетов преследует цель создания экономико-математической модели, позволяющей моделировать варианты развития системы местных бюджетов. Такая модель была разработана в 2010 году, на которую в дальнейшем было оформлено и получено авторское свидетельство о регистрации программного продукта [2, 3]. Модель основана на двух связанных алгоритмах. Первый алгоритм используется для управления исполнением доходной части бюджета. Второй – применяется для управления исполнением расходной частью бюджета. Программная реализация экономико-математической модели предназначена для выполнения анализа и оценки эффективности доходов и расходов местных бюджетов, применением в системе управления местными бюджетами в разрезе городских округов, муниципальных районов, городских и сельских поселений субъекта федерации.

На первом этапе построения динамической модели системы исполнения местных бюджетов было получено описание бизнес-процессов формирования доходов и расходов, определение показателей каждого процесса, подлежащих контролю, а также определение рычагов управления бюджетным процессом. Разработка данного описания осуществлялось в виде функциональной модели с использованием популярного программного продукта AllFusion Process Modeler (BPWin) [4].

На основе представленного перечня выполняемых в модели процессов становится возможным более точное определение структуры входных и выходных данных, определяется, какие из факторов и показателей являются полностью, или частично регулируемыми, а какие формируются в процессе обработки данных.

Далее производился полный сбор факторов и показателей, описывающих формирование доходной и расходной частей местных бюджетов за анализируемый промежуток времени, а также предварительный анализ данных с целью их подготовки к статистической обработке [5]. Обработка начиналась с построения гистограмм данных и определения их основных статистических характеристик: математического ожидания, дисперсии, коэффициента вариации. Далее, по рассчитанным параметрам, выдвигалось предположение о законе распределения, которому подчиняются данные. Выдвинутая гипотеза проверялась анализом коэффициента вариации и графическим методом.

Входные данные для модели формировались из таблиц Excel, получаемых экспортом из базы данных администрации области. Входными данными в модели являлись следующие параметры: доходы, расходы, дефицит, кредиторская задолженность на начало года, трансферты, муниципальный долг. Выходными – доходы, расходы, дефицит, кредиторская задолженность на конец года, трансферты, муниципальный долг.

Выходная информация формировалась в виде диаграмм, таблиц и могла быть распечатана или сохранена на любом носителе информации обычными средствами Excel. Пользователю предоставлялась возможность корректировать результаты, оперируя фактическими данными за прошедшие периоды, и вносить в систему прогнозируемые показатели, позволяющие формировать сценарии исполнения бюджетов в краткосрочном и среднесрочном периодах, с последующим выбором оптимального сценария управления финансовыми потоками бюджетной системы и устранением экстремальной помехи.

С помощью разработанной модели могут быть решены следующие задачи и исследованы следующие стратегии:

- стратегия изменения тарифов на ЖКХ-услуги для населения;
- стратегия изменения заработной платы работникам бюджетных учреждений;
- стратегия изменения заработной платы административно-управленческого персонала;
- стратегия изменения численности работников бюджетных учреждений;
- стратегия изменения численности административно-управленческого персонала;
- стратегия создания и упразднения нового бюджетного учреждения;

- стратегия предоставления субсидий, субвенций и дотаций;
- стратегия оценки доли софинансирования по субсидиям;
- задача определения устойчивости исполнения местных бюджетов на прогнозируемом периоде;
- задача расчета кредиторской задолженности;
- задача расчета муниципального долга;
- задача определения дефицита;
- задача прогнозирования расходной части бюджета на период до трех лет;
- задача прогнозирования доходной части бюджета на период до трех лет.

Моделирование исполнения местного бюджета осуществлялось в несколько этапов:

1. Внесение исходных данных за отчетный период.
2. Выбор муниципального образования.
3. Моделирование расходной и доходной частей бюджета:
 - a) расходы за отчетный год очищаются от межбюджетных трансфертов;
 - b) производится прогнозирование очищенных расходов на три года;
 - c) добавляются планируемые межбюджетные трансферты;
 - d) осуществляется моделирование различных сценариев развития в текущем году;
 - e) производится моделирование доходов по трем независимым методикам.
4. Отображение результатов моделирования.
5. Уточнение модели в момент появления новых данных за текущий период.

Каждому этапу обработки соответствует свой программный модуль.

В основу моделирования исполнения доходной части бюджета положен метод репрезентативной налоговой системы. Оценка ожидаемых налоговых и неналоговых поступлений в процессе исполнения бюджета производилась ежемесячно на каждую отчетную дату (1 февраля, 1 марта, 1 апреля и т. д.) для налога на доходы физических лиц, земельного налога, налога на доходы физических лиц, налогов на совокупный доход и прочих налогов, неналоговых доходов. Значения базовых показателей, характеризующих сумму налоговых поступлений, определялись на основании фактического исполнения доходной части местного бюджета за предыдущий финансовый год.

Оценка доходов бюджета производилась в два этапа. На первом этапе рассчитывались

значения ожидаемых поступлений для каждого месяца. На втором этапе оценивались суммарные поступления на отчетную дату с начала текущего финансового года.

На основе использования имеющихся и расчета основных показателей (индикаторов) развития экономики муниципалитета, формирования доходов и финансирования расходов, были разработаны реалистичный, оптимистический и консервативный варианты поступления доходов.

Расходная часть исполнения местных бюджетов в зависимости от необходимости представлялась по трем различным вариантам движения и учета расходов:

- по функциональной классификации;
- классификации по КОСГУ;
- принадлежности исполняемых расходных обязательств (собственных и делегированных).

Исходя из этого, модель состоит из трех модулей, позволяющих представлять расходы в трех вариантах.

В зависимости от цели моделирования можно выделить несколько алгоритмов построения систем местных бюджетов области.

I. Построение модели для консолидированного бюджета района осуществляется в несколько этапов. Для этого необходимо:

1. Провести моделирование собственно района.
2. Построить модели бюджета поселений данного района.
3. По полученным результатам в пунктах 1 и 2 составить консолидированный бюджет района.

II. Построение модели бюджета по всем районам можно осуществить следующим образом:

1. Вначале провести моделирование бюджета каждого района в отдельности.
2. По полученным результатам составить бюджет по всем районам.

III. Аналогично строятся модели бюджета по всем городским округам:

1. Провести моделирование бюджета каждого городского округа в отдельности.
2. По полученным результатам составить бюджет по всем городским округам.

IV. Построение модели консолидированного бюджета по всем муниципальным образованиям строится следующим образом:

1. Провести моделирование консолидированного бюджета района для каждого муниципального района.
2. Провести моделирование бюджета по каждому городскому округу.

3. По полученным результатам в пунктах 1 и 2 составить консолидированный бюджет муниципальных образований.

Тестирование модели показало адекватное отображение результатов разработанной модели исполнения местных бюджетов. Кроме того, при единичных управляющих факторах результаты на выходе равны входным данным.

Данная модель может быть применена в рамках горизонтальной адекватности для городского округа и для муниципального района. При этом учитывается то обстоятельство, что единство бюджетной классификации и параметры нормативов распределения налоговых доходов в межбюджетных отношениях для городских округов и муниципальным районам (в измерении консолидированных бюджетов последних) принципиально однозначны.

Несколько сложнее представляется отражение в модели исполнения местных бюджетов динамических процессов в звене бюджет муниципального района – бюджеты городских и сельских поселений. Здесь задача усложняется наличием потока встречных трансфертов по ряду делегируемых полномочий местного значения. И хотя суммы этих трансфертов относительно невелики, они несколько усложняют настройку

системы, что требует проведения дополнительной работы по корректировке предлагаемой модели в рамках следующего этапа исследования.

В целом же данная модель вполне адаптивна к ее применению ко всем местным бюджетам бюджетной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камаев, В. А. Разработка прогнозирования социально-экономических параметров муниципальных образований / В. А. Камаев, А. С. Аль-Катабери, М. В. Щербаков // Вестник Брянского технического университета. – 2012. – № 1. – С. 146–151.
2. Модель системы исполнения местных бюджетов : а. с. / Н. В. Лопухов, А. Н. Табаков, О. А. Астафурова, С. Б. Левинсон, В. М. Запругайло. – № 2010611102 ; заяв. 08.12.09. ; опубл. 05.02.10, Бюл. № 2 (71) Ч.1.
3. Астафурова, О. А. Моделирование системы исполнения местных бюджетов Волгоградской области / О. А. Астафурова, Н. В. Лопухов // Альманах современной науки и образования. – 2010. – № 5. – С. 147–151.
4. Запругайло, В. М. Анализ исполнения местных и региональных бюджетов на основе функционального моделирования / В. М. Запругайло, О. А. Астафурова // Актуальные проблемы совершенствования управления региональными финансами : сб. докл. Второй регион. науч.-практ. конф., 23–24 окт. 2008 г. / ред. А. В. Дорждеев [и др.]. – М. : Финансы, 2009.
5. Мединцева, И. П. Регрессионное моделирование экономических процессов в MS Excel / И. П. Мединцева // Альманах современной науки и образования. – 2010. – № 2–1. – С. 162–165.

УДК 004.9:324

Е. Е. Конкин, Д. В. Литовкин, О. Н. Ляпина

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ УЧЕБНЫХ ПЛАНОВ НА САЙТЕ КАФЕДРЫ ПОАС

Волгоградский государственный технический университет
kon-evg-evg@mail.ru, litd@mail.ru, lyapinaon@gmail.com

В статье описан начальный этап создания модуля представления учебных планов и дисциплин на вебсайте кафедры программного обеспечения автоматизированных систем (ПОАС) Волгоградского государственного технического университета. Представлена методика анкетирования абитуриентов и студентов для выяснения требований к разрабатываемому модулю. В статье приведены результаты проведенного анкетирования студентов и абитуриентов, а также результаты собеседований с сотрудниками кафедры. На основе этих результатов предложена информационная модель представления учебных планов. Рассмотрены решения, уже используемые учебными заведениями, с точки зрения визуального представления учебных планов и дисциплин. По результатам их анализа разработаны макеты визуального представления учебных планов. Полученные результаты позволяют перейти непосредственно к созданию модуля для представления учебных планов на сайте кафедры.

Ключевые слова: учебный план, дисциплина, сайт кафедры, анкетирование.

E. E. Konkin, D. V. Litovkin, O. N. Lyapina

ESTABLISHING REQUIREMENTS FOR REPRESENTATION OF CURRICULA ON THE POAS DEPARTMENT WEBSITE

Volgograd State Technical University

This article describes the initial phase of development of the module for representation of curricula and disciplines on the university department website. The procedure for student's surveying is presented to determine the requirements for developing module. The article describes the results of the student's survey and interviews with staff of the department. Based on these results information model of curriculum has been offered. Analysis of existing visual presentations of curricula and disciplines has been performed. Screens of visual representation of the curriculum have been designed. The results obtained allow to develop module for representation of curricula and disciplines on the website.

Keywords: curriculum, discipline, university department website, survey.

Введение

Учебные планы и рабочие программы дисциплин регламентируют проведение дисциплин в учебном процессе [1]. В течение учебного процесса к данным документам обращаются абитуриенты, студенты, преподаватели и другие сотрудники кафедры.

На рис. 1 представлены типовые варианты использования учебного плана и рабочей программы. Как показано на диаграмме, поиск учебных планов и рабочих программ является основополагающим действием для любой категории пользователей.

В настоящее время существуют следующие проблемы, связанные с использованием учебных планов и рабочих программ:

- у абитуриентов полностью отсутствует доступ к учебным планам и рабочим программам дисциплин;
- доступ преподавателей и студентов к учебным планам и рабочим программам дисциплин сопряжен с длительным поиском документов в архиве кафедры;
- данные документы сложны для восприятия студентами и абитуриентами.

ис

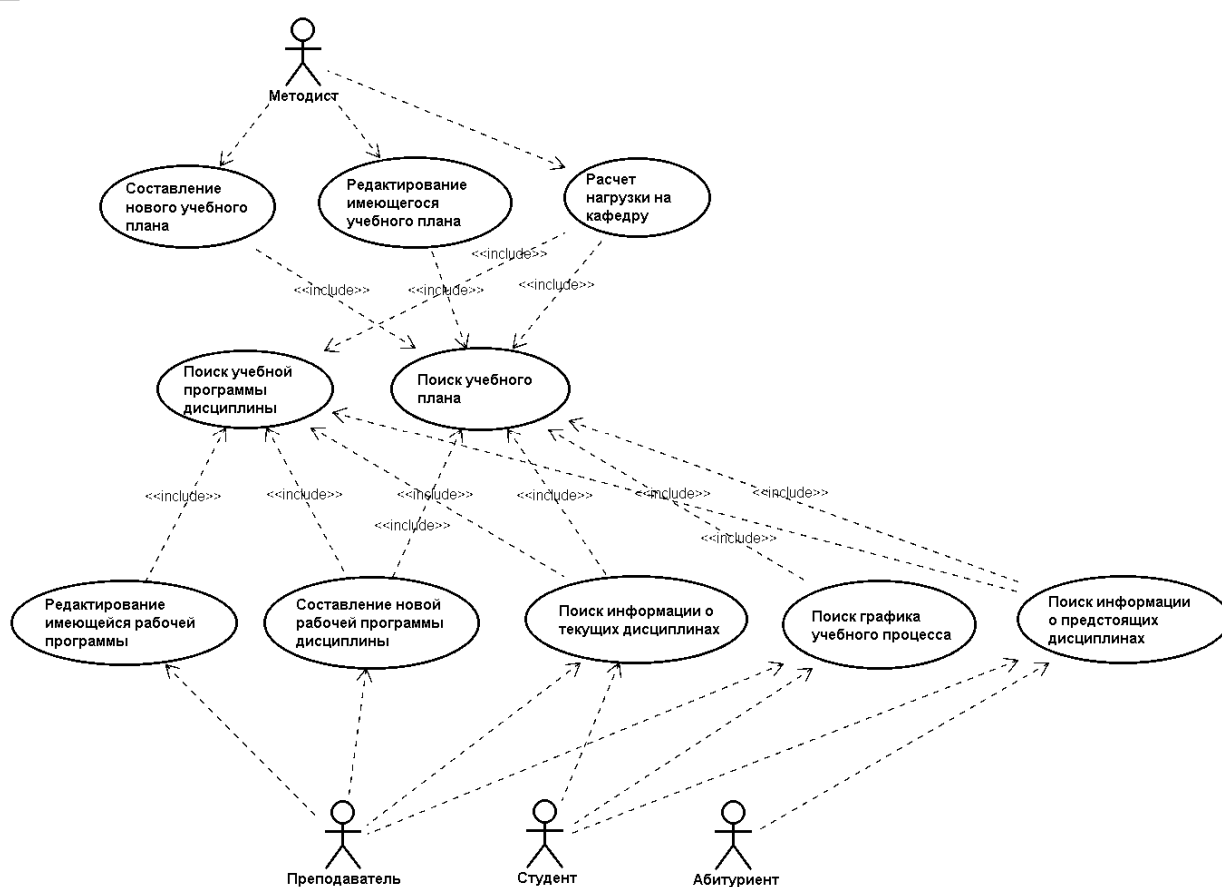


Рис. 1. Диаграмма использования учебных планов и рабочих программ дисциплин

Решить эти проблемы можно, создав централизованное хранилище учебных планов и рабочих программ и предоставив к ним доступ через сайт кафедры.

Для эффективного решения задачи поиска учебных планов и рабочих программ необходимо, чтобы сайт предоставлял следующие информационные сервисы:

- перечень направлений обучений и профилей подготовки;
- перечень учебных планов, действующих

по направлению (профилю) подготовки;

- перечень дисциплин, составляющих учебный план;
- поиск дисциплин;
- описание дисциплины.

С целью определения требований к перечисленным информационным сервисам было проведено анкетирование среди студентов и абитуриентов (в качестве абитуриентов выступали студенты первого курса) и собеседование с сотрудниками кафедры.

Выявление требований студентов и абитуриентов к представлению учебных планов

Для выявления требований со стороны абитуриентов и студентов проводилось анкетирование в режиме онлайн [2]. В качестве средства анкетирования использовалась система проведения социологических опросов Survio (www.survio.com).

Анкета включала 17 вопросов. В ней были представлены вопросы, позволяющие узнать

степень осведомленности студентов и абитуриентов о назначении учебных планов и рабочих программ, а также выяснить, какая информация, представляемая в этих документах, наиболее важна по их мнению.

В основном анкета состояла из поливариантных вопросов полузакрытого типа. Это позволило предложить респонденту готовые варианты ответов, т. е. дать ему подсказки. Пример такого типа вопроса представлен на рис. 2.

8. Какие из перечисленных видов информации по дисциплине Вы хотели бы видеть представленными на сайте?

- ☐ Форма контроля дисциплины (зачет, экзамен и т.д.)
- ☐ Направление подготовки (например "Программная инженерия")
- ☐ Вид ОргСРС (курсовой проект, курсовая работа и т.д.)
- ☐ Объем дисциплины в часах по каждому виду учебной работы (лекции, практики, СРС и др)
- ☐ Учебный цикл дисциплины (общенаучный, профессиональный, научно-исследовательский и т.д.)
- ☐ Обязательность дисциплины (базовая дисциплина, вариативная дисциплина, дисциплина по выбору)
- ☐ Временной отрезок (курс, семестр)

Рис. 2. Пример поливариантного вопроса полузакрытого типа из анкеты

Также использовались вопросы открытого типа, чтобы респондент мог выразить свои

предложения и замечания. Пример такого типа вопроса представлен на рис. 3.

17. Какую еще информацию по дисциплинам, вы хотели бы видеть на сайте кафедры?

Рис. 3. Пример вопроса открытого типа из анкеты

Всего было опрошено более 60 студентов, с первого по шестой курсы. Ответы первокурсников, число которых составило 23 % от числа всех респондентов, учитывались как ответы абитуриентов.

Значимыми требованиями к представлению учебных планов и дисциплин были определены только те, которые выбрали более 50 % респондентов. Примеры таких требований представлены на рис. 4 (варианты ответов подчеркнуты).

13 По каким критериям вы хотели бы осуществлять поиск дисциплины на сайте?		
# ▲	Ответ	Доля
●	Название дисциплины	56 <u>94,92 %</u>
●	Кафедра, реализующая дисциплину	42 <u>71,19 %</u>
●	Форма обучения (очная, заочная)	25 42,37 %
●	Направление обучения	36 <u>61,02 %</u>
●	Преподаватели, ведущие дисциплину	52 <u>88,14 %</u>
●	Временной отрезок дисциплины (курс, семестр)	35 <u>59,32 %</u>
●	Год поступления студента на учебу	22 37,29 %
●	Компетенции, реализуемые дисциплиной	14 23,73 %
●	Дидактические единицы (разделы дисциплины)	22 37,29 %

Рис. 4. Отчет о выявлении ожиданий студентов и абитуриентов (фрагмент)

Анкетирование показало, что большая часть опрошенных (59 человек из 60) знает, либо частично осведомлена, что такое учебный план и какую информацию он представляет, но при этом ровно половина опрошенных не знает, где его получить.

Большинству респондентов (около 81 % опрошенных) требовался перечень дисциплин, примерно в равной степени по текущим, будущим, либо же за все периоды обучения сразу.

Более половины опрошенных студентов и абитуриентов хотели бы видеть на сайте следующую информацию по дисциплине (расположено в порядке убывания важности):

- название дисциплины (100 % респондентов);
- форма контроля дисциплины (95 %);
- временной отрезок (курс, семестр) (90 %);
- оценочные средства контроля (экзаменационные вопросы, контрольные вопросы по темам) (90 %);
- вид ОргСРС (88,33 %);
- программа дисциплины, т. е. перечень теоретических и практических занятий (88,33 %);
- ссылка на курс в системе Moodle (84,75 %);
- аннотация к дисциплине (81,67 %);
- рекомендуемая литература (75 %);
- преподаватели, ведущие дисциплину (73 %);
- задачи дисциплины (70 %);
- место дисциплины в профессиональной подготовке выпускника (63,33 %);
- смежные дисциплины (63,33 %);
- цели дисциплины (60 %);
- требования к уровню освоения дисциплины (58,33 %);
- обязательность дисциплины (58,33 %);
- направление подготовки (55 %);
- объем дисциплины в часах (50 %).

Более половины опрошенных респондентов (около 55 %) считают, что на сайте должны быть представлены полная версия учебного плана в формате электронной таблицы, а также полные версии рабочих программ в формате PDF.

Почти всем опрошенным студентам и абитуриентам требуется доступ к таким ресурсам дисциплины, как расписание занятий по дисциплине и программное обеспечение, используемое в рамках дисциплины.

Согласно результатам анкетирования важными критериями поиска дисциплины были отмечены:

- название;
- кафедра, реализующая дисциплину;
- направление обучения;
- преподаватели, ведущие дисциплину;
- временной отрезок дисциплины.

Выявление требований сотрудников кафедры к представлению учебных планов

Требования к представлению учебных планов со стороны преподавателей и методиста, непосредственно разрабатывающего учебный план, выявлялись путем собеседования с ними.

В ходе собеседований было определено, что преподавателям и методисту в первую очередь требуется хранилище учебных планов и рабочих программ в электронной форме. Также они отметили необходимость разделения учебных планов по форме обучения, направлению и профилю подготовки.

Наиболее востребованной информацией по дисциплине с точки зрения преподавателей и методиста кафедры являются:

- объем дисциплины в часах и ЗЕТ по видам занятий;
- вид ОргСРС;
- форма итогового контроля по дисциплине.

По мнению преподавателей, на сайте кафедры дополнительно должны указываться те преподаватели, кто разрабатывал рабочую программу и другие методические материалы по дисциплине, т. е. внес значительный вклад в формирование учебно-методического комплекса дисциплины.

В результате собеседований дополнительно было выявлено требование к сопровождению модуля представления учебных планов кафедры – минимизация трудозатрат на поддержание информации в актуальном состоянии. Данное требование было отмечено как приоритетное.

Информационная модель представления учебных планов

По результатам анкетирования и собеседования с преподавателями предложена информационная модель, представленная на рис. 5.

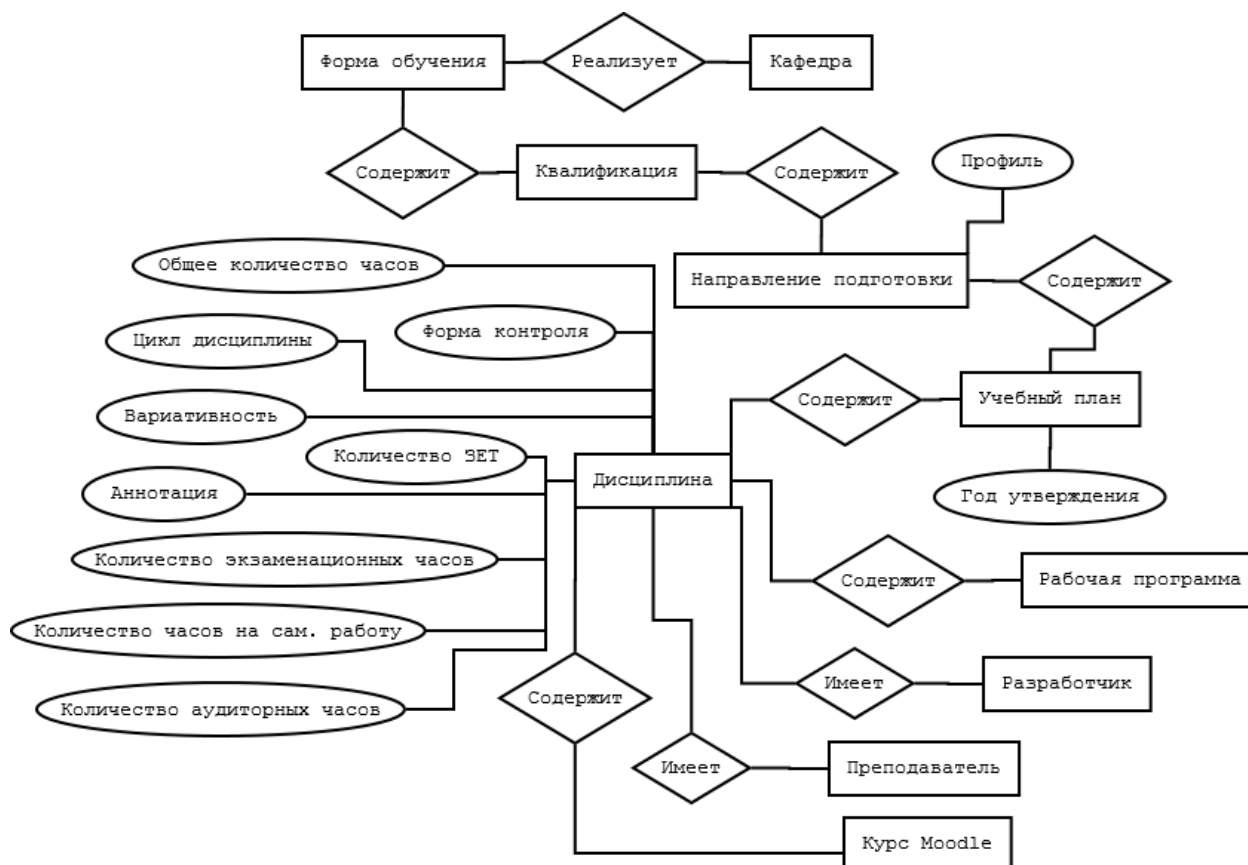


Рис. 5. Информационная модель представления учебных планов

Данная модель сочетает в себе наиболее важные аспекты представления учебного плана и входящих в него дисциплин. Некоторая информация (задачи дисциплины, место дисциплины в профессиональной подготовке выпускника, цели дисциплины, требования к уровню освоения дисциплины, смежные дисциплины, литература к дисциплине) была исключена из информационной модели в связи с требованием о минимизации вводимой и обновляемой вручную информации на сайте. Данную информацию пользователь сможет найти самостоятельно из рабочей программы дисциплины, представленной на сайте, а также в системе дистанционного обучения Moodle [3], следовательно, нет необходимости дублировать ее на сайте кафедры.

Визуальное представление учебных планов

С целью визуального представления учебных планов на сайте кафедры проанализированы существующие решения, используемые ведущими вузами и другими учебными заведениями:

- Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) [4];

- кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н. Э. Баумана [5];

- Новосибирский государственный технический университет [6];

- НП «Техникум экономики, бизнеса и рекламы» [7].

Каждое из представленных решений обладает своими достоинствами и недостатками. В частности, вебсайт НИУ ВШЭ предлагает довольно мощный инструмент поиска дисциплин и учебных курсов, позволяющий учесть год обучения, квалификационный уровень, направление обучения, временные рамки проведения дисциплины и другие критерии. Однако сами учебные планы представлены только формате Excel, что создает трудности для их восприятия студентами и абитуриентами.

Кафедра «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н. Э. Баумана представляет список дисциплин, реализуемых учебным планом, в виде удобной таблицы, но отсутствует представление отдельной дисциплины.

Система DiSpace, используемая Новосибирским государственным техническим универси-

тетом, позволяет представлять учебные дисциплины и указывать наиболее полную информацию о них, однако полностью отсутствует представление учебных планов.

Вебсайт НП «Техникум экономики, бизнеса и рекламы» интересен тем, что использует тиражируемое решение «1С-Битрикс: Сайт учебного заведения». На сайте имеются два подраздела: «Учебные планы» и «Учебные дисциплины». Учебные планы разделяются по факультетам и представлены в виде исходных файлов в формате Excel. В свою очередь, учебные дисциплины представлены в таблице, а из всей сопутствующей информации указан лишь преподаватель и семестр. Поиска и какой-либо навигации между дисциплинами и учебными планами не предусмотрено. В целом возможности стандартного пакета по представлению учебных планов не велики, а значит, модуль придется существенно дорабатывать.

Первые три решения не являются тиражируемыми, а последнее не позволяет решить все проблемы, связанные с представлением учебных планов.

На основе анализа этих решений и с учетом предложенной информационной модели учебных планов разработаны макеты экранов для представления учебных планов и дисциплин кафедры (см. рис. 6–9). Макеты экранов были согласованы с преподавателями кафедры.

ОЧНАЯ ФОРМА

Бакалавриат

– 231000.62 «Программная инженерия»

Программная инженерия — это область компьютерной науки и технологии, которая занимается созданием программных систем, настолько больших и сложных, что для этого требуется участие слаженных команд разработчиков различных специальностей и квалификаций.

По окончании обучения выпускник-бакалавр будет уметь разрабатывать программы/программное обеспечение и создавать проекты разработки программного продукта, программную документацию; управлять процессами жизненного цикла программ; работать в коллективе, управлять командой исполнителей в процессе производства программных продуктов в рамках технологической, производственной, организационно-управленческой и сервисно-эксплуатационной деятельности.

Действующие учебные планы:

Учебный план - профиль «Разработка программно-информационных систем» (дата утверждения - 2014 год)

Учебный план - профиль «Разработка программно-информационных систем» (дата утверждения - 2011 год) *

Недействующие учебные планы:

Учебный план - профиль «Разработка программно-информационных систем» (дата утверждения - 2003 год)

Магистратура

+ 231000.69 «Еще одно направление»

Аспирантура

+ 231000.72 «И еще одно направление»

ЗАОЧНАЯ ФОРМА

Бакалавриат

+ 231000.69 «Еще одно направление»

+ 231000.72 «И еще одно направление»

* - поступление на обучение по данному учебному плану прекращено

Рис. 6. Макет представления направлений обучения

Учебный план подготовки бакалавров по направлению 231000.62 «Программная инженерия» (дата утверждения - 2011 год)

- Форма обучения: очная
- Профиль: Разработка программно-информационных систем

1 курс - 1 семестр	1 курс - 2 семестр
Гуманитарный, социальный и экономический цикл	Гуманитарный, социальный и экономический цикл
История Философия Иностранный язык	Экономика Культура речи Логика Культурология
Математический и естественнонаучный цикл	Математический и естественнонаучный цикл
Линейная алгебра и аналитическая геометрия Математический анализ Информатика	Математический анализ Дискретная математика Физика
Профессиональный цикл	Профессиональный цикл
Введение в программную инженерию Машинная графика	Основы программирования
Физическая культура	Физическая культура
2 курс - 3 семестр	2 курс - 4 семестр
3 курс - 5 семестр	3 курс - 6 семестр
4 курс - 7 семестр	4 курс - 8 семестр



Скачать полную версию
учебного плана

Рис. 7. Макет представления учебного плана

Основы программирования

РЕАЛИЗУЕТ

Кафедра: Программное обеспечение автоматизированных систем
Преподаватели: Литовкин Д.В., Сычев О.А., Аникин А.В.
Разработчик: Литовкин Д.В., Сычев О.А.
Статус: Обязательная дисциплина

УЧЕБНЫЙ ПЛАН

Утвержден в 2013 году
Направление подготовки: 231000.62 «Программная инженерия»
Профиль: Разработка программно-информационных систем
Форма обучения: Очная
Уровень: Бакалавриат

Семестр	Форма контроля	Всего часов	Всего аудитор.	Лекц. часов	Лабор. часов	Практ. часов	Самостоят. работа	Экзаменац. часов	Всего ЗЕТ
2	Экзамен Курсовая работа	216	90	36	36	18	90	36	6
3	Экзамен Курсовая работа	180	54	18	18	18	90	36	5



Аннотация к дисциплине

Курс предназначен для обучения основам программирования. Рассматриваются основные понятия программирования - алгоритма, исполнителя, алгоритмического языка, переменной, основные типы данных, управляющие конструкции алгоритмического языка и т.п. Излагаются общие приемы программирования, основанные на применении математики, такие, как вычисление функций на последовательностях с помощью применения теории индуктивных функций и схема построения цикла с помощью инварианта.

Цель изучения дисциплины — дать студентам начальные знания и умения, необходимые для построения процедурно-ориентированных программ.



Рабочая программа дисциплины



Курс в системе Moodle

Рис. 8. Макет представления учебной дисциплины

ЗАДАЙТЕ ПАРАМЕТРЫ ПОИСКА

Название курса или слова, встречающиеся в названии: Кафедра, реализующая дисциплину: - не важно Преподаватель (указать через запятую, если несколько) Год поступления на учебу: - не важно Профиль подготовки: Разработка программно-информационн	Форма обучения: Очная Направление обучения: Бакалавриат - 231000.62 «Программная Курс/семестр: 1 курс - 2 семестр ☒ Искать среди «недействующих» учебных планов (только для преподавателей) Искать дисциплину
--	---

Результаты поиска:

1) Основы программирования

Кафедра: Программное обеспечение автоматизированных систем
Учебный план: подготовки бакалавров по направлению 231000.62 «Программная инженерия» (с 2013 года)

2) Основы программирования

Кафедра: Программное обеспечение автоматизированных систем
Учебный план: подготовки бакалавров по направлению 231000.62 «Программная инженерия» (с 2011 года)

3) Машинная графика

Кафедра: Начертательная геометрия и компьютерная графика
Учебный план: подготовки бакалавров по направлению 231000.62 «Программная инженерия» (с 2013 года)

Рис. 9. Макет представления поискового инструмента

Заключение

Таким образом, путем анкетирования и собеседований выявлены ожидания потенциальных пользователей модуля представления учебных планов на сайте кафедры. На их основе составлена информационная модель разрабатываемого модуля, которая содержит в себе минимальное количество необходимой информации из учебного плана, чтобы снизить трудозатраты на сопровождение модуля. На основе анализа существующих решений и рекомендаций преподавателей составлены макеты визуального представления учебных планов на сайте кафедры.

Полученные результаты позволяют перейти к проектированию и реализации модуля представления учебных планов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Система управления учебным процессом в университете: организационные вопросы и документация : учеб. пособие / И. А. Новаков [и др.] ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 280 с.
2. Анкета «Модуль дисциплин. Выявление ожиданий пользователей. Студенты» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.surveio.com/survey/d/M2C5P0P0L3B9G4V9J> (дата обраш. 28.04.2014).
3. Центр открытого образования ВолгГТУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://edu.vstu.ru/> (дата обраш. 01.04.2014).
4. Учебные курсы НИУ ВШЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.hse.ru/edu/courses/> (дата обраш. 01.04.2014).
5. Учебные планы кафедры МГТУ им. Н. Э. Баумана [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://iu7.bmstu.ru/bachelor> (дата обраш. 28.04.2014).
6. Учебные курсы, размещенные в системе DiSpace [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://edu.nstu.ru/education/educourses.php> (дата обраш. 01.04.2014).
7. Учебные планы НП «Техникум экономики, бизнеса и рекламы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://tebir.ru/students/curricula/> (дата обраш. 01.04.2014).

УДК 004.89

*М. А. Навроцкий, И. Г. Жукова, М. Ю. Дергачева***ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ
УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСОНАЛОМ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ И РАССУЖДЕНИЙ ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ*****Волгоградский государственный технический университет**

m.navrotskiy@gmail.com, zhukova.ir@gmail.com

В статье представлена концепция организации интеллектуальной поддержки принятия решений в области управления персоналом, на основе технологий, основанных на знаниях, что позволит повысить эффективность принимаемых в данной предметной области решений. Анализ области управления персоналом показал, что необходимая поддержка принятия решений может быть реализована с использованием современных технологий искусственного интеллекта (ИИ), таких как рассуждения по прецедентам и онтологии. В работе рассмотрена общая схема интеграции рассуждений по прецедентам и онтологии, а также разработаны структура прецедента и онтологическая модель представления знаний. Реализован прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области управления персоналом на основе рассуждений по прецедентам и онтологии.

Ключевые слова: управление персоналом (HRM), интеллектуальные системы поддержки принятия решений (IDSS), онтология, рассуждения по прецедентам.

*М. А. Navrotskiy, I. G. Zhukova, M. Y. Dergacheva***INTELLIGENT SUPPORT OF DECISION MAKING IN HUMAN RESOURCE
MANAGEMENT USING CASE BASED REASONING AND ONTOLOGY****Volgograd State Technical University**

In this paper a concept of intelligent support of decision making in human resource management using knowledge-based approach is presented, which is a promising way to increase efficiency of human resource management on the operational and managerial levels that HR occupies. Analysis of the domain of human resource management shows that the appropriate support of decision making can be implemented using contemporary technologies of artificial intelligent such as case based reasoning and ontology. In the paper the general scheme of the integration of this reasoning mechanism and ontology is suggested, as well the problems of knowledge and case representation are considered. Implementation of a prototype of intelligent decision support system in human resource management on the base of case based reasoning and ontology is described.

Keywords: human resource management (HRM), intelligent decision support system (IDSS), case-based reasoning, ontology.

Современная рыночная экономика ставит ряд принципиальных задач, важнейшей из которых является максимально эффективное использование кадрового потенциала. Управление персоналом занимает ведущее место в системе управления предприятием и считается одним из основных критериев его экономического успеха.

Различают стратегическое и оперативное управление персоналом. Одна из задач оперативного управления персоналом – задача анализа эффективности работы персонала и выработка стратегий ее повышения [1].

Для решения этой задачи руководитель предприятия должен проанализировать параметры работы персонала, выявить проблемы, возникающие при работе, определить методы

воздействия и принять решения, обеспечивающие повышение эффективности работы персонала. Необходимо отметить, что принимая решения по выработке рекомендаций для управления работой персонала, руководитель, как правило, учитывает не только объективные значения параметров работы персонала, но опыт и накопленные знания, используемые ранее при решении подобных задач.

Проблема повышения эффективности системы управления персоналом на предприятии, прежде всего, связана с внедрением современных методов анализа и оценки работы сотрудников, а также применением эффективных стратегий управления работой персонала, направленных на увеличение производительности труда. Возможным подходом к решению этой проблемы является разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области управления персоналом (HRDSS) на основе современных технологий искусственного интеллекта.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: проект 13-07-00219 – Интеллектуальная поддержка стратегического планирования на основе интеграции когнитивных и онтологических моделей.

Развитие современных информационных технологий предоставляет возможность автоматизации задач, характерных для процесса принятия решений в области управления персоналом. Так, в работе [2] рассмотрен ряд интеллектуальных систем, основанных на знаниях (Human Resources Decision Support Systems (HRDSS)), которые используются для управления человеческими ресурсами.

В системах такого класса применяются различные методы и технологии искусственного интеллекта (ИИ), например, рассуждения на основе правил (rule based reasoning), прецедентов (case based reasoning (CBR)), моделей (model based reasoning) и так далее, а также их комбинации.

Одна из проблем, которая имеет место при разработке HRDSS систем – это проблема приобретения и представления знаний, необходимых для организации таких рассуждений. Известно, что мощность интеллектуальной системы определяется, как правило, мощностью ее базы знаний. Эта проблема является особенно актуальной для систем, реализующих CBR-технологии, так как в этом случае модель представления знаний определяет все основные процессы CBR.

Перспективным подходом, позволяющим реализовать интеллектуальную поддержку процесса принятия решений в области управления работой персонала, является подход, основанный на интеграции онтологической модели представления знаний и логического вывода на основе рассуждений по прецедентам (CBR) [3]. Данный подход был успешно применен для организации интеллектуальной поддержки принятия решений в области инженерного анализа, управления водохозяйственной системой и управления отходам [3–5].

Анализ решаемой задачи показал, что применение такого подхода позволит не только решить проблему приобретения, представления, накопления и повторного использования экспертных знаний в процессе управления работой персонала, но и повысить качество принимаемых руководителем решений, за счет использования формализованных экспертных знаний.

В статье рассматривается реализация подхода, а также разработка моделей, методов и прототипа системы, обеспечивающих поддержку принятия решений для задачи анализа эффективности работы персонала и выдачи рекомендаций по

ее повышению (на примере сети магазинов розничной торговли Л'Этуаль, г. Волгоград).

Основная цель использования рассуждений по прецедентам заключается в выдаче лицу, принимающему решение (ЛПР), готового решения для текущей ситуации на основе прецедентов, которые уже имели место в прошлом при управлении данным объектом или процессом.

Процесс рассуждений по прецедентам может быть схематически представлен в виде цикла. В работе [6] приведено описание типового процесса рассуждений по прецедентам, который состоит из следующих этапов: формирование прецедента новой задачи (прецедента-запроса); поиск наиболее похожих прецедентов в БД прецедентов; повторное использование решений найденных прецедентов и их адаптация к новой задаче; проверка предлагаемого решения на адекватность и сохранение нового решения в БД прецедентов.

К основным преимуществам рассуждений по прецедентам можно отнести отсутствие необходимости полного и углубленного рассмотрения знаний о конкретной предметной области; возможность напрямую использовать опыт, накопленный системой, без интенсивного привлечения эксперта в той или иной предметной области; возможность применения эвристик, повышающих эффективность решения задач.

Использование онтологий в CBR-цикле позволит сделать рассуждения по прецедентам более точными и расширить круг решаемых задач. В общем случае БД прецедентов не содержит все необходимые знания для корректного решения новой задачи, однако онтологии позволяют формализовать общие знания предметной области и применить их для корректного решения новой задачи. Онтологии также позволят обеспечить семантическое взаимодействие между описаниями прецедентов из различных источников и задавать структуру описания прецедента, используемую для извлечения прецедентов. Знания, хранящиеся в онтологиях, могут быть использованы для адаптации прецедентов.

В работе используется подход к интеграции онтологии и рассуждений по прецедентам, представленный в работе [3]. В соответствии с данным подходом онтология описывает общие понятия и правила предметной области, модель представления прецедента, а также содержит БД прецедентов. Онтология применяется для поддержки всех этапов CBR-цикла. Схема интеграции онтологии и CBR представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема интеграции онтологии и CBR

Онтология как модель представления прецедента описывает прецедент как набор экземпляров классов и отношений между ними. Онтология как модель представления знаний предметной области описывает предметную область в виде DL (Description language) правил, используя процедуры вывода. Онтология как БД прецедентов хранит прецеденты как часть знаний предметной области.

Формальная модель системы вывода, основанного на прецедентах, может быть представлена в виде упорядоченной тройки:

$$CBR = \langle \text{Cases}, \text{Onto}, \text{Retr} \rangle, \quad (1)$$

где Cases – база прецедентов; Onto – онтология предметной области; Retr – алгоритм поиска прецедента.

Структуру прецедента можно представить в виде:

$$\text{Case} = \{P, S(P), \text{Eff}(S(P))\}, \quad (2)$$

где P – описание проблемы (индекс прецедента); $S(P)$ – описание решения проблемы; $\text{Eff}(S(P))$ – оценка эффективности принимаемых решений.

Описание проблемы состоит из трех дескрипторов, которые отражают главные аспекты описания проблемы:

$$P = \{d1, d2, d3\}, \quad (3)$$

где $d1$ – класс «финансовые параметры»; $d2$ – класс «персональные параметры»; $d3$ – класс «дополнительные параметры».

Описание решения проблемы состоит из двух дескрипторов:

$$S(P) = \{IP, R\}, \quad (4)$$

где IP – идентификатор проблемы; R – методы управления (набор рекомендаций), устраняющие выявленные проблемы.

Идентификатор проблемы может быть представлен в виде:

$$IP = \{p1, p2, p3\}, \quad (5)$$

где p – дескриптор, который описывает одну из проблем, входящую в решение прецедента. Описание проблемы может иметь как простую, так и комплексную структуру; $p1$ – класс «Финансовые проблемы»; $p2$ – класс «Организационные проблемы»; $p3$ – класс «Проблемы работы с клиентами»;

Методы управления (набор рекомендаций) можно представить в виде:

$$R = \{r1, r2, r3, r4\}, \quad (6)$$

где r – дескриптор, который описывает один из методов управления персоналом для решения прецедента. Методы управления (набор рекомендаций) могут иметь как простую, так и комплексную структуру; $r1$ – класс «Поощрения персонала»; $r2$ – класс «Обучение персонала»; $r3$ – класс «Аттестация персонала»; $r4$ – класс «Дисциплинарные взыскания».

Оценка эффективности принимаемого решения определяется по шкале Харрингтона:

$Eff = \{\text{очень высокая, высокая, средняя, низкая, очень низкая}\}$.

В работе используется структурная объектно-ориентированная модель представления прецедента, что обусловлено особенностями исследуемой предметной области и ре-

шаемой задачи. Структура индекса прецедента представлена на рис. 2. Были выделены три основных аспекта описания прецедента. Пользователь имеет возможность определить важность каждого аспекта на этапе извлечения знаний.

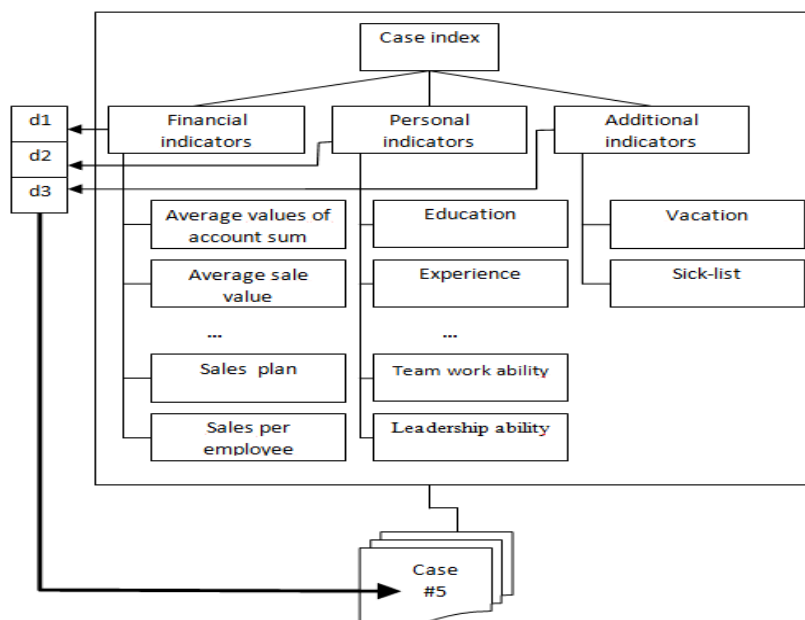


Рис. 2. Структура индекса прецедента

На рис. 3 представлена структура решения прецедента.

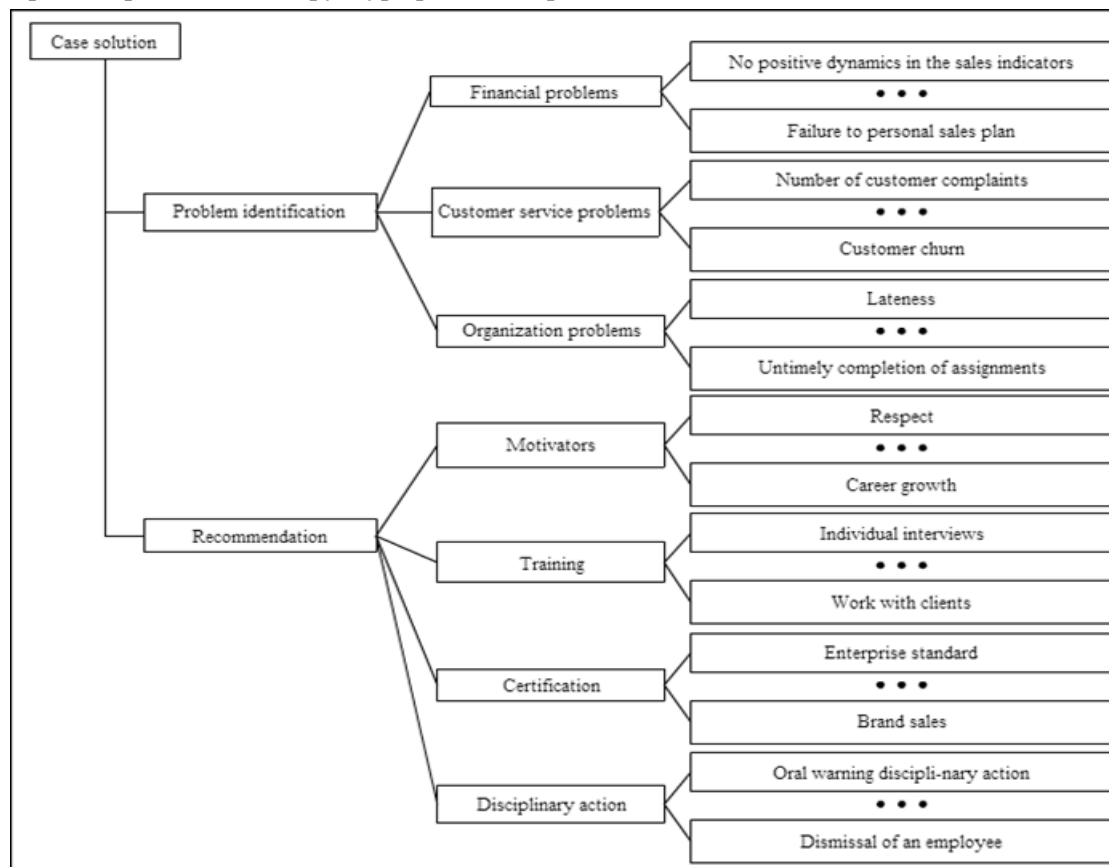


Рис. 3. Структура решения прецедента

На основе проведенного анализа предметной области была разработана онтологическая модель представления знаний для решаемой задачи. Верхний уровень онтологии можно представить в виде:

1. Идентификатор прецедента
2. Индекс прецедента
 - 2.1. Финансовые параметры
 - 2.1.1. Средний чек по сумме.
 - 2.1.2. Средний чек по количеству продаж.
 - 2.1.3. Среднее значение продаж.
 - 2.1.4. Общий план продаж.
 - 2.1.5. Объем продаж на одного сотрудника.
 - 2.2. Персональные параметры
 - 2.2.1. Образование.
 - 2.2.2. Опыт работы.
 - 2.2.3. Компетентность.
 - 2.2.4. Способности к коммуникации.
 - 2.2.5. Способность работать в команде.
 - 2.2.6. Лидерские качества.
 - 2.3. Дополнительные параметры
 - 2.3.1. Нахождение в отпуске.
 - 2.3.2. Нахождение на больничном листе.
3. Решение прецедента
 - 3.1. Идентификатор проблемы
 - 3.1.1.1. Финансовые проблемы
 - 3.1.1.1.1. Невыполнение индивидуального плана продаж.
 - 3.1.1.1.2. Невыполнение индивидуальных показателей продаж.
 - 3.1.1.1.3. Отсутствие положительной динамики в плане продаж.
 - 3.1.1.1.4. Отсутствие положительной динамики в индивидуальных показателях продаж.
 - 3.1.1.2. Проблемы работы с клиентами
 - 3.1.1.2.1. Количество жалоб клиентов.
 - 3.1.1.2.2. Отток клиентов.
 - 3.1.1.3. Организационные проблемы

- 3.1.1.3.1. Опоздания;
- 3.1.1.3.2. Несвоевременное выполнение видов работ.
4. Методы управления (рекомендации)
 - 4.1. Поощрение персонала
 - 4.1.1. Объявление благодарности.
 - 4.1.2. Денежная премия.
 - 4.1.3. Дополнительный отпуск.
 - 4.1.4. Дополнительные бонусы в области страхования.
 - 4.1.5. Дополнительные бонусы в области здравоохранения.
 - 4.1.6. Увеличение зарплаты.
 - 4.1.7. Карьерный рост.
 - 4.2. Обучение персонала
 - 4.2.1. Индивидуальная беседа.
 - 4.2.2. Участие в тренингах.
 - 4.2.3. Участие в семинарах.
 - 4.2.4. Работа с напарником.
 - 4.2.5. Работа с наставником.
 - 4.2.6. Применение обучающего материала.
 - 4.2.7. Обучение работы с клиентами.
 - 4.3. Аттестация персонала
 - 4.3.1. По стандартам сети.
 - 4.3.2. По группе продуктов.
 - 4.3.3. По марке продаж.
 - 4.4. Дисциплинарные взыскания
 - 4.4.1. Устное предупреждение.
 - 4.4.2. Письменное предупреждение.
 - 4.4.3. Штраф.
 - 4.4.4. Выговор.
 - 4.4.5. Увольнение.
5. Эффективность решения

В случае необходимости онтология предметной области может быть расширена. Для описания онтологии используется язык OWL (Web Ontology Language), в качестве инструментального средства разработки – онтологический редактор Protégé 3.5. Онтологическая модель представления знаний содержит: классов – 45, экземпляров – 235, свойств и отношений – 32, прецедентов – 42.

Онтологическая модель представления знаний также определяет структуру (шаблон) для описания прецедента. На рис. 4 показана структура прецедента, использующая онтологическое представление. Описание прецедента является набором экземпляров классов онтологии. Каждому дескриптору описания прецедента соот-

ветствует один или несколько экземпляров. Экземпляры соединены объектными свойствами. Таким образом, описание прецедента представляет собой полностью соединенный граф, в котором описание конкретного прецедента задается положением вершин графа в иерархии классов онтологии. Кроме общих концептов предметной области онтология содержит набор правил, используемых при решении задач.

Разработанные онтологическая модель знаний и модель представления прецедента на основе онтологии позволяют эффективно реализовать процесс рассуждений по прецедентам.

Далее в работе рассмотрена поддержка процесса поиска наиболее близкого прецедента на основе онтологии.

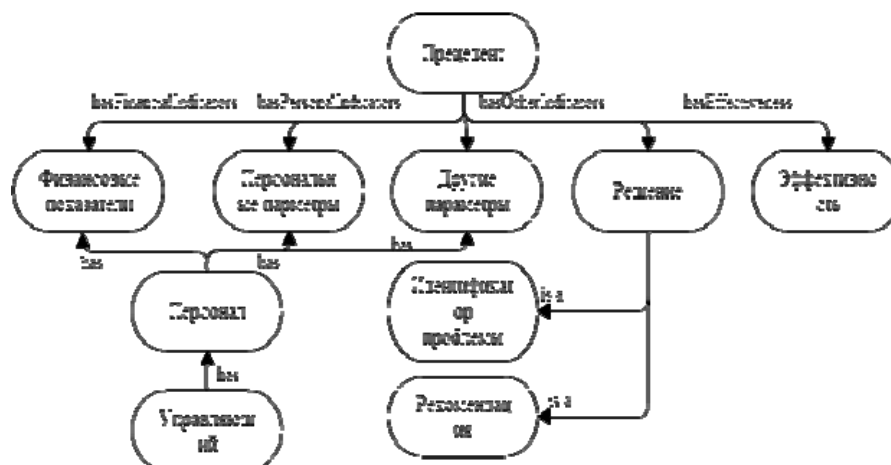


Рис. 4. Представление структуры прецедента на основе онтологии

Главной задачей процесса рассуждений по прецедентам является поиск прецедента, наиболее близкого к заданному запросу (текущей проблемной ситуации). Задача выбора прецедента, наиболее близкого к заданному запросу Query, может быть сведена к задаче оценки близости фрагментов онтологии, представляющих прецедент и запрос, и решается в работе методом ближайшего соседа (NN – Nearest Neighbor). Выбор метода обусловлен простотой его реализации и универсальностью.

Для реализации метода был разработан алгоритм поиска наиболее близкого прецедента. Входными данными для работы алгоритма являются: $Query = \langle p_1, p_2, \dots, p_n \rangle$ – запрос, описывающий текущую ситуацию, где p_i – параметр работы сотрудника, относящийся к определенному классу. $Cases = \langle Case_1, Case_2, \dots, Case_n \rangle$ – множество прецедентов. $Case$ – прецедент, $Case \in Cases$. Выходными данными работы алгоритма является $Result$ – ближайший к запросу $Query$ прецедент, $Result \in Cases$.

Алгоритм поиска наиболее близкого прецедента включает в себя следующие шаги:

Шаг 1. Провести процедуру классификации прецедентов, хранящихся в БД прецедентов.

Шаг 2. Сформировать запрос Query к системе поиска прецедентов.

Шаг 3. Для каждого прецедента Case множества Cases выполнять:

Шаг 3.1. Вычислить локальные значения мер близости Sim каждого параметра.

Шаг 3.2. Вычислить глобальную меру близости G прецедента Case.

Шаг 4. Выбрать прецедент Result с наибольшим значением меры близости G.

Результатом работы алгоритма является прецедент, наиболее близкий к запросу, либо сообщение, что аналогичных прецедентов не обнаружено.

Для вычисления локальных мер близости Sim была разработана гибридная мера сходства, учитывающая семантическую и атрибутивную близость между прецедентами, и использующая интервальные оценки и метрику сходства Хэмминга. Также была разработана функция сравнения прецедентов G, учитывающая меры сходства параметров прецедентов и коэффициенты, определяющие важность параметров. Реализованный алгоритм отличается от известных тем, что перед поиском решения проводится процедура классификации прецедентов.

Результаты эксперимента

Условия эксперимента	Эксперимент 1	Эксперимент 2
Метод поиска	Метод ближайшего соседа	
Используемые метрики	Интервальная оценка и мера близости Хэмминга	
Классификация прецедентов перед поиском решения	нет	да
Количество прецедентов в базе	42	
Количество прецедентов в тестовой выборке	20	
Количество верно найденных решений	32	38
Количество верно найденных решений (%)	76	90

Была проведена проверка разработанных моделей и алгоритмов (см. таблицу). Результаты эксперимента показали, что количество верно найденных решений увеличилось на 14 % в случае, если перед поиском решения проводится процедура классификации прецедентов.

В данной работе были разработаны алгоритмы формирования прецедента-запроса, поиска прецедентов, сохранения прецедента в БД прецедентов. Реализация CBR-цикла осуществлялась с помощью программы CBR Framework jColibri [7]. В дальнейшем планируется реализация алгоритмов адаптации прецедентов и оценки результатов адаптации.

Представленные модели и алгоритмы были реализованы в прототипе автоматизированной системы интеллектуальной поддержки принятия решений в области управления работой персонала. Система производит анализ пара-

метров работы персонала и выдает рекомендации, направленные на повышение ее эффективности. Система работает в следующих режимах: ввод (загрузка) данных; анализ параметров работы персонала; поиск проблем в работе персонала и выдача рекомендаций по повышению эффективности работы персонала; статистика; формирование отчетов; редактирование онтологии. Архитектура прототипа системы представлена на рис. 5.

Процесс оценки эффективности работы персонала в системе состоит из двух этапов. На первом этапе руководитель, на основе имеющихся параметров работы персонала, определяет перечень проблем, существующих в работе персонала. На втором этапе руководитель получает набор рекомендаций, необходимый для устранения выявленных проблем и повышения эффективности работы персонала.

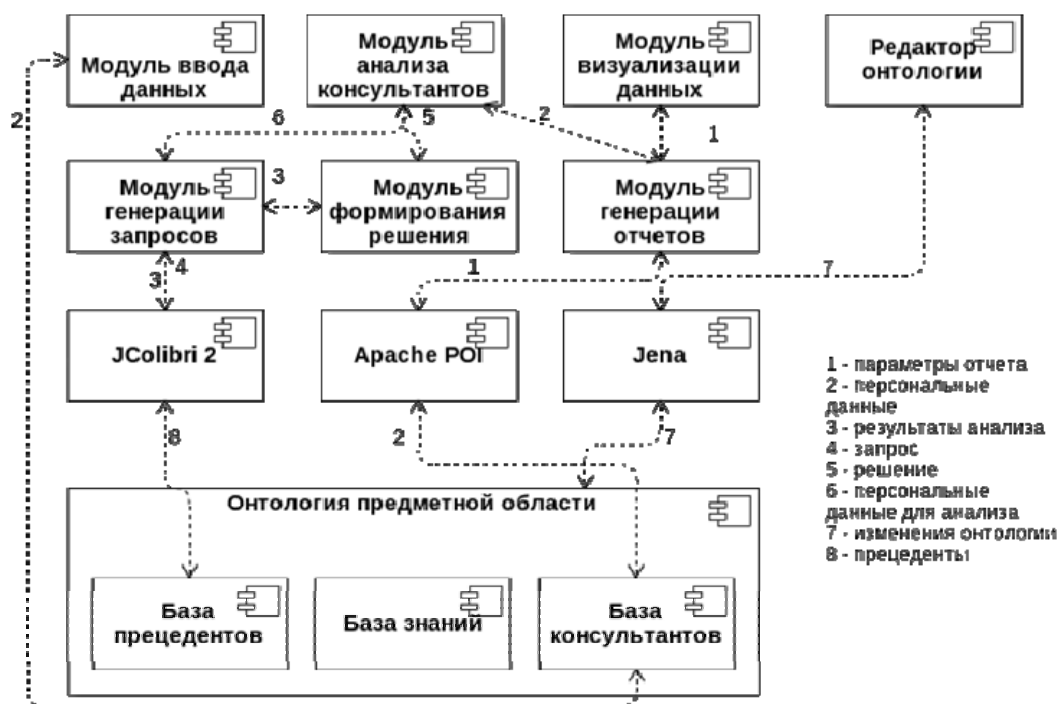


Рис. 5. Архитектура прототипа системы

На рис. 5 пунктирными стрелками указаны информационные связи между модулями; цифры над стрелками – параметры, которые передаются.

Система реализована на языке Java, с использованием библиотек: QtJambi (для создания интерфейса пользователя), JENA (для взаимодействия с онтологией), jColibri2 (для реализации рассуждений по прецедентам), Apache POI (для формирования отчета в xls формате). Онтологическая модель реализована на языке OWL

в редакторе онтологий Protégé [7, 8]. Прототип системы реализован в виде сетевого приложения и позволяет обеспечить доступ к базе знаний системы через Интернет. Разработанный программный продукт планируется использовать как часть системы «АРМ управляющего», реализуемой для сети розничной торговли магазинов Л'Этуаль, г. Волгоград.

В работе реализован подход к организации интеллектуальной поддержки принятия решений в области управления работой персонала

на основе интеграции онтологической модели представления знаний и рассуждений по прецедентам. Применение моделей и методов искусственного интеллекта позволит сократить трудоемкость и повысить эффективность решений, принимаемых руководителем, за счет формализации и использования знаний и опыта, используемых ранее при решении подобных задач. Для реализации данного подхода разработаны необходимые модели и алгоритмы, а также создан прототип интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области управления работой персонала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щекин, Г. В. Теория и практика управления персоналом / Г. В. Щекин. – 2-е изд., стер. – Киев : МАУП. – 2003. – 280 с.
2. Ramli, R., Noah, S.A., Yusof, M.M. Ontological-Based Model for Human Resource Decision Support System (HRDSS). On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2010 Workshops, Lecture Notes in Computer Science, Volume 6428, 2010, pp 585–594.
3. P. Wriggers, M. Siplivaya, I. Zhukova, A. Kapyshev, A. Kultsov. Integration of a case-based reasoning and an ontological knowledge base in the system of intelligent support of finite element analysis, Computer Assisted Mechanics and Engineering Science, 2007, № 14.
4. Дворянкин А. М., Кульцова М. Б., Жукова И. Г., Кульцов А. Е., Капыш А. С. Разработка онтологической базы знаний для интеллектуальной системы поддержки принятия решений в сфере управления водохозяйственной системой // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в тех. системах». Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 6.
5. Kultsova M. B., Sadovnikova N. P., Zhukova I. G., Navrotsky M. A., Ryaskov A. S. Intelligent support of decision making in waste management using case based reasoning and ontology. Materials of the III International Scientific – Practical Conference «Innovate information technologies» (I2T-2014) PART3, April 23-27, Prague, 2014.
6. Aamodt, E. Plaza. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. AI Communications. IOS Press, 1994, Vol. 7: 1.
7. jColibri: CBR Framework jColibri 2.1 Tutorial, available at: [http://gaia.fdi.ucm.es/research/colibri/jcolibri/ documentation](http://gaia.fdi.ucm.es/research/colibri/jcolibri/documentation).
8. Protégé 3.5 Tutorial, available at: <http://protege.stanford.edu/doc/users.html#tutorials>.

УДК 004:37

А. А. Синицын, Д. В. Литовкин

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕСТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ АДАПТАЦИИ В СДО MOODLE

Волгоградский государственный технический университет
sinicin2008@gmail.com, litd@mail.ru

Представлен подход к снижению трудоемкости реализации методов адаптивного тестирования в СДО Moodle за счет реализации в отдельном модуле элементов, присущих всем методам адаптивного тестирования. Представлена модель адаптивного тестирования, которая явно разделена на элементы, зависящие от метода тестирования, и элементы, общие для всех методов адаптивного тестирования. Предложена архитектура системы адаптивного тестирования применительно к СДО Moodle, основанная на представленной модели адаптивного тестирования.

Ключевые слова: адаптивное тестирование, модель адаптивного тестирования, СДО Moodle.

A. A. Sinitsyn, D. V. Litovkin

DEVELOPMENT OF MODELS AND ALGORITHMS FOR GENERATING TESTS WITH DIFFERENT METHODS OF ADAPTATION IN LMS MOODLE

Volgograd State Technical University

Proposed approach to reduce the complexity of the implementation of adaptive testing in LMS Moodle due to implementation in a separate module of common elements of adaptive testing. Proposed the model of adaptive testing, divided into elements, depending on the test method, and the elements that are common to all methods of adaptive testing. Proposed system architecture of adaptive testing in relation to LMS Moodle, based on the presented model of adaptive testing.

Keywords: adaptive testing, generalized model, LMS Moodle.

Введение

Тестирование является одной из форм оценки знаний и важным элементом образовательного процесса [1]. Адаптивное тестирование (АТ) – последовательная форма тестирования, при которой последующие пункты (за-

дания) теста выбираются в зависимости от ответов на предыдущие пункты (задания). Адаптивное тестирование имеет ряд преимуществ перед обычным, таких как снижение времени тестирования, увеличение точности оценивания [2].

Существует большое количество методов адаптивного тестирования, различающихся между собой способом представления модели студента, алгоритмом выбора очередного вопроса, критерием завершения теста и другими элементами [2, 3, 4, 5]. Однако эти методы имеют общую часть – они реализуют итерационный алгоритм адаптивного тестирования [2].

Поэтому актуальной задачей является создание модели адаптивного теста, в которой явно выделены элементы, зависящие от конкретного метода адаптивного тестирования, и элементы, не зависящие от него. Элементы, не зависящие от конкретного метода адаптивного тестирования, имеет смысл реализовать в виде программного модуля, на основе которого можно создавать тесты с различными методами адаптации. Создание модуля предполагается выполнить на базе СДО Moodle [6]. СДО Moodle имеет богатый набор средств организации образовательного процесса, но в нем отсутствуют развитые средства адаптивного тестирования.

Обобщенный процесс подготовки и проведения тестирования

Входными данными для процесса подготовки и проведения тестирования являются общий банк вопросов QB и множество стратегий адаптивного тестирования STR . Банк вопросов QB содержит множество вопросов для разных предметных областей и не зависящих от методов тестирования. Стратегия AT (STR_z) инкапсулирует в себе все особенности конкретного метода адаптивного тестирования.

Процесс подготовки и проведения тестирования представлен на рис. 1.

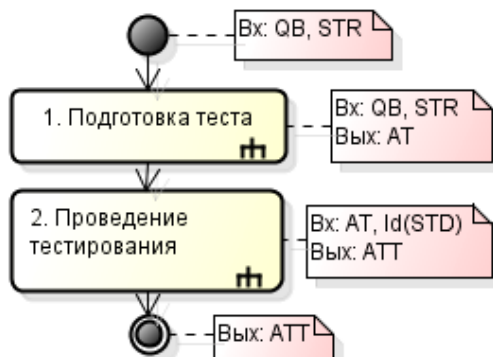


Рис. 1. Алгоритм подготовки и проведения тестирования

Подготовка адаптивного теста AT заключается в выборе стратегии тестирования STR_z из

множества STR , выборе из банка QB вопросов для теста и задания данных, специфичных для конкретного метода тестирования, например, сети знаний и умений предметной области, сети переходов между вопросами и т. д. В результате формируется тест AT , позволяющий оценивать знания и умения в некоторой предметной области и с заданным методом адаптации.

Согласно полученному тесту AT выполняется тестирование знаний и умений конкретного тестируемого STD . Процесс тестирования является итеративным: на каждой итерации осуществляется выбор и предъявление очередного вопроса, проверка полученного ответа, обновление модели студента и модели данных стратегии тестирования, а также проверка завершения теста.

Реализация этих действий определяется конкретным методом адаптивного тестирования STR_z . По окончании тестирования полученная последовательность предъявленных тестовых вопросов, различных состояний модели тестируемого и модели данных самого теста формируют попытку прохождения теста ATT .

Далее рассмотрены модели и алгоритмы, используемые в процессе подготовки и проведения тестирования.

Модель банка вопросов

Банк вопросов QB содержит заранее созданные вопросы Q_i для последующего их использования в различных тестах, т. е. $Q_i \in QB$. Банк вопросов не зависит от методов тестирования, которые его используют, и поэтому вопросы в банке создаются в наиболее общем виде. Для каждого вопроса задаются формулировка, варианты правильных ответов и другие характеристики, зависящие от типа вопроса в системе тестирования [6].

Модель стратегии адаптивного тестирования

Стратегия AT STR_z ($STR_z \in STR$) определяет ключевые алгоритмы (выбор очередного вопроса, проверка завершения теста и т. д.) и специфические данные, необходимые для реализации конкретного метода AT и имеет следующее описание:

$$STR_z = \{QP, DM, STD, PRCS\},$$

где QP – параметры вопросов, необходимые для организации AT в рамках данной стратегии STR_z ; DM – модель данных, используемая стратегией тестирования STR_z ; STD – модель сту-

дента, используемая стратегией тестирования STR_z ; $PRCS$ – множество процедур, реализуемых стратегией АТ.

Параметры вопросов QP используются главным образом при выборе очередного вопроса (например, выбор вопроса определенной сложности или тематики), но также могут использоваться в других процедурах. Примерами параметров вопроса могут служить его сложность, тематическая принадлежность, лимит времени на ответ и др. Параметр вопроса задается следующим образом:

$$QP_i = \{Id(QP_i), NM, PRC_{QP}\},$$

где $Id(QP_i)$ – идентификатор параметра вопроса; NM – название параметра; PRC_{QP} – процедура получения значения параметра, например, запрос к преподавателю, создающему тест, или вычисление значения параметра на основе статистических данных.

Модель студента STD используется для представления данных о тестируемом, которые необходимы для проведения тестирования и/или последующего анализа прохождения теста, например, его текущий уровень знаний, знания и умения, которыми он владеет/не владеет, уровень усвоения учебного материала и т. д.

Модель данных DM используется для представления данных, не относящихся напрямую к тестируемому, но необходимых для корректного проведения и/или анализа прохождения теста, например, сеть знаний и умений предметной области и их связь с вопросами теста.

Модель студента STD и модель данных DM определяются стратегией АТ. Данные модели обновляются после каждого ответа тестируемого.

Стратегия АТ реализует набор ключевых процедур подготовки и проведения тестирования: $PRC_DM_ST^{init}$ – процедура получения состояния DM_ST^{init} модели данных стратегии до начала тестирования; $PRC_STD_ST^0$ – процедура получения начального состояния STD_ST^0 модели данных тестируемого; $PRC_DM_ST^0$ – процедура получения состояния DM_ST^0 модели данных стратегии сразу после начала тестирования; PRC_Q^k – процедура выбора очередного вопроса; PRC_Q^1 – процедура выбора первого вопроса; PRC_FINISH – процедура проверки завершения теста; $PRC_STD_ST^k$ – процедура получения очередного состояния модели тестируемого STD_ST^k после ответа на вопрос; $PRC_DM_ST^k$ – процедура получения очередного состояния DM_ST^k модели данных стратегии после ответа на вопрос.

Модель адаптивного теста

В результате подготовки теста формируется адаптивный тест AT , представляющий собой совокупность данных и процедур, необходимых для проведения тестирования по выбранной стратегии АТ. Адаптивный тест имеет следующее описание:

$$AT = \{AT_{QB}, DM_{ST}^{init}, STR_z\},$$

где AT_{QB} – выборка вопросов, используемых в данном тесте; DM_{ST}^{init} – состояние модели данных стратегии до начала тестирования; STR_z – стратегия АТ, используемая в данном тесте.

Выборка вопросов AT_{QB} есть подмножество банка вопросов QB , но для каждого вопроса из AT_{QB} ($AT_Q_i \in AT_{QB}$) дополнительно задаются значения параметров, определяемых стратегией АТ:

$$AT_{Q_i} = \{Q_i, QP_{V_j}\},$$

где QP_{V_j} – значение параметра QP_j для данного вопроса Q_i .

Модель попытки прохождения теста

Совокупность информации о сеансе прохождения конкретного теста конкретным тестируемым составляет попытку прохождения адаптивного теста (ATT). Попытка прохождения адаптивного теста имеет следующее описание:

$$ATT = \{Id(AT), DM_{ST}^0, STD_{ST}^0, TR\},$$

где $Id(AT)$ – уникальный идентификатор адаптивного теста в системе тестирования; DM_{ST}^0 – состояние модели данных стратегии АТ на момент начала тестирования, т. е. когда известен тестируемый; STD_{ST}^0 – состояние модели тестируемого на момент начала тестирования; TR – траектория прохождения теста.

Траектория прохождения теста TR состоит из элементов траектории TR_k , которые содержат как ответы тестируемого, так и историю изменений модели данных стратегии и модели тестируемого, т. е. $TR_k \in TR$. Элементы траектории формируются и фиксируются после ответа на очередной (k -й) вопрос теста. Элемент траектории имеет следующее описание:

$$TR_k = \{QA_k, DM_{ST}^k, STD_{ST}^k\},$$

где QA_k – попытка ответа на вопрос; DM_{ST}^k – состояние модели данных стратегии после ответа на очередной вопрос; STD_{ST}^k – состояние модели тестируемого после ответа на очередной вопрос.

Попытка ответа QA_k на вопрос содержит информацию об ответе тестируемого на конкретный вопрос AT_{Q_i} , т. е.

$$QA_k = \{Id(AT_{Q_i}), ANSW, GRD\},$$

где $Id(AT_{Q_i})$ – идентификатор вопроса; $ANSW$ – ответ на вопрос; GRD – оценка правильности ответа (от 0 до 1).

Алгоритм подготовки адаптивного теста

Входными данными для алгоритма являются общий банк вопросов QB и множество стратегий адаптивного тестирования STR .

Шаги алгоритма подготовки теста представлены на рис. 2.

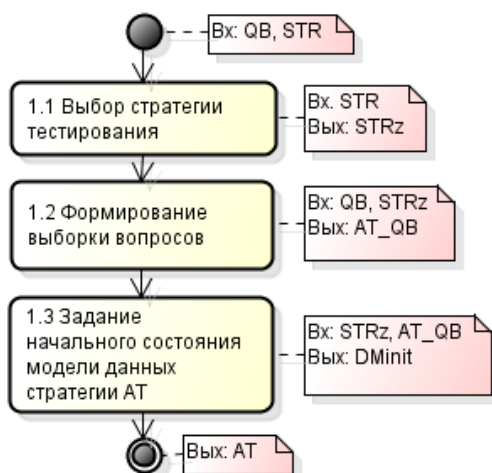


Рис. 2. Алгоритм подготовки теста

На шаге 1.1 происходит выбор одной стратегии STR_z из списка доступных стратегий STR .

На шаге 1.2 формируется выборка вопросов адаптивного теста AT_QB . Дополнительно для каждого вопроса задаются значения параметров QPs использованием процедуры PRC_QP .

На шаге 1.3 с помощью процедуры $PRC_{DM_{ST}}^{init}$ задается начальное состояние модели данных стратегии DM_{ST}^{init} .

В результате формируется адаптивный тест AT .

Алгоритм проведения адаптивного тестирования

Входными данными для алгоритма являются адаптивный тест AT и идентификатор тестируемого $Id(STD)$, в роли которого может выступать идентификатор учетной записи в системе тестирования, ФИО тестируемого и т. д.

Алгоритм проведения тестирования представлен на рис. 3.

На отдельных шагах алгоритма используются процедуры, определяемые выбранной стратегией тестирования STR_z , а именно:

на шаге 2.1 при инициализации попытки прохождения АТ формируются начальные состояния модели тестируемого STD_ST^0 и модели данных стратегии DM_ST^0 . Для этого используются процедуры получения начального состояния модели данных тестируемого $PRC_{STD_{ST}}^0 \rightarrow STD_{ST}^0$ и процедура получения начального состояния модели данных стратегии $PRC_{DM_{ST}}^0 \rightarrow DM_{ST}^0$;

на шаге 2.2 используется процедура выбора первого вопроса:

$$PRC_Q^1(AT_{QB}, DM_{ST}^0, STD_{ST}^0) \rightarrow AT_{Q_1};$$

на шаге 2.3 используется процедура выбора очередного вопроса:

$$PRC_Q^k(AT_{QB}, DM_{ST}^k, STD_{ST}^k) \rightarrow AT_{Q_k};$$

на шаге 2.6 используется процедура обновления модели тестируемого:

$$PRC_{STD_{ST}}^k(QA_k, STD_{ST}^{k-1}) \rightarrow STD_{ST}^k;$$

на шаге 2.7 используется процедура обновления модели данных стратегии:

$$PRC_{DM_{ST}}^k(QA_k, DM_{ST}^{k-1}) \rightarrow DM_{ST}^k;$$

на шаге 2.8 используется процедура проверки завершения теста:

$$PRC_{FINISH}(ATT_k) \rightarrow \begin{pmatrix} \text{да} \\ \text{нет} \end{pmatrix}.$$

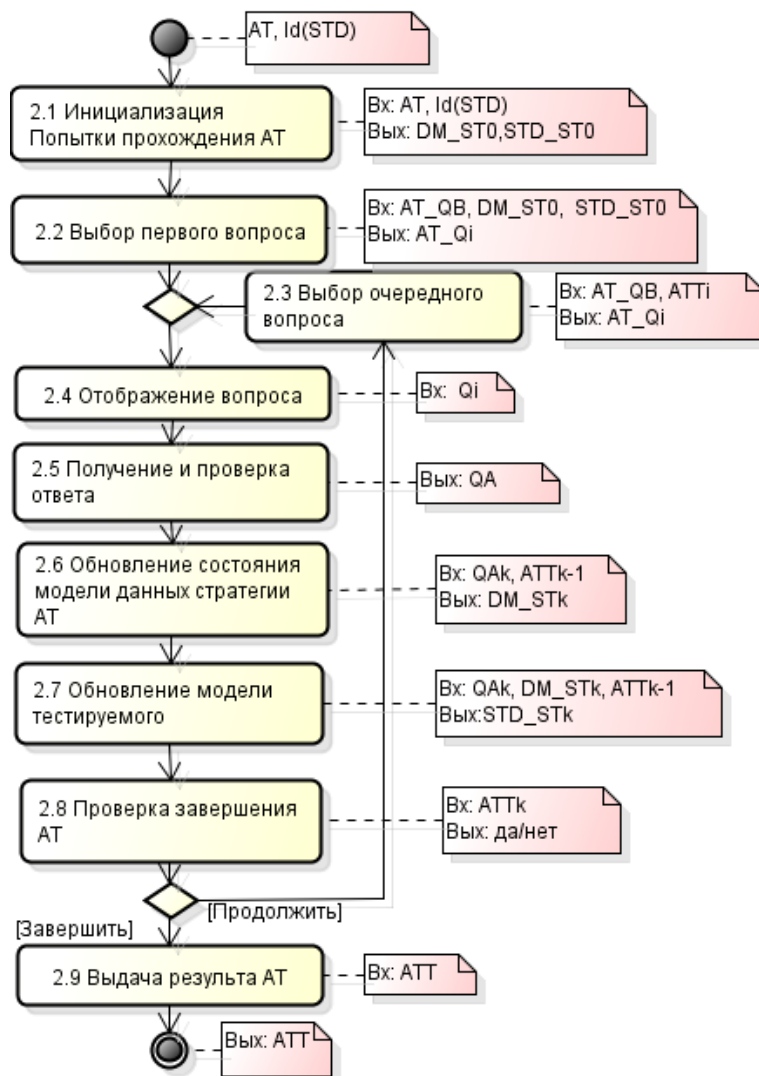


Рис. 3. Алгоритм проведение тестирования

Как результат после выполнения всех итераций формируется попытка прохождения теста ATT , которая в том числе содержит финальные состояния модели данных стратегии и тестируемого. По этим данным формируется и выдается результат прохождения теста.

Архитектура модуля адаптивного тестирования в СДО Moodle

На рис. 4 представлена архитектура модуля АТ в СДО Moodle, использующего описанную выше модель адаптивного тестирования.

Модуль адаптивного тестирования является универсальным для всех методов адаптивного тестирования и реализует следующие компо-

ненты модели: адаптивный тест AT , выборка вопросов AT_QB , вопрос AT_Qi , параметр вопроса QP , попытка прохождения ATT , траектория прохождения TR , шаг траектории TR_k . Модуль адаптивного тестирования реализует обобщенные алгоритмы подготовки и проведения тестирования.

Реализация конкретного метода адаптивного тестирования осуществляется через плагин стратегии АТ. Плагин конкретизирует способы задания модели данных стратегии и тестируемого, а также процедуры, используемые в процессе тестирования, т. е. реализует STR_z . Количество плагинов может быть произвольным.

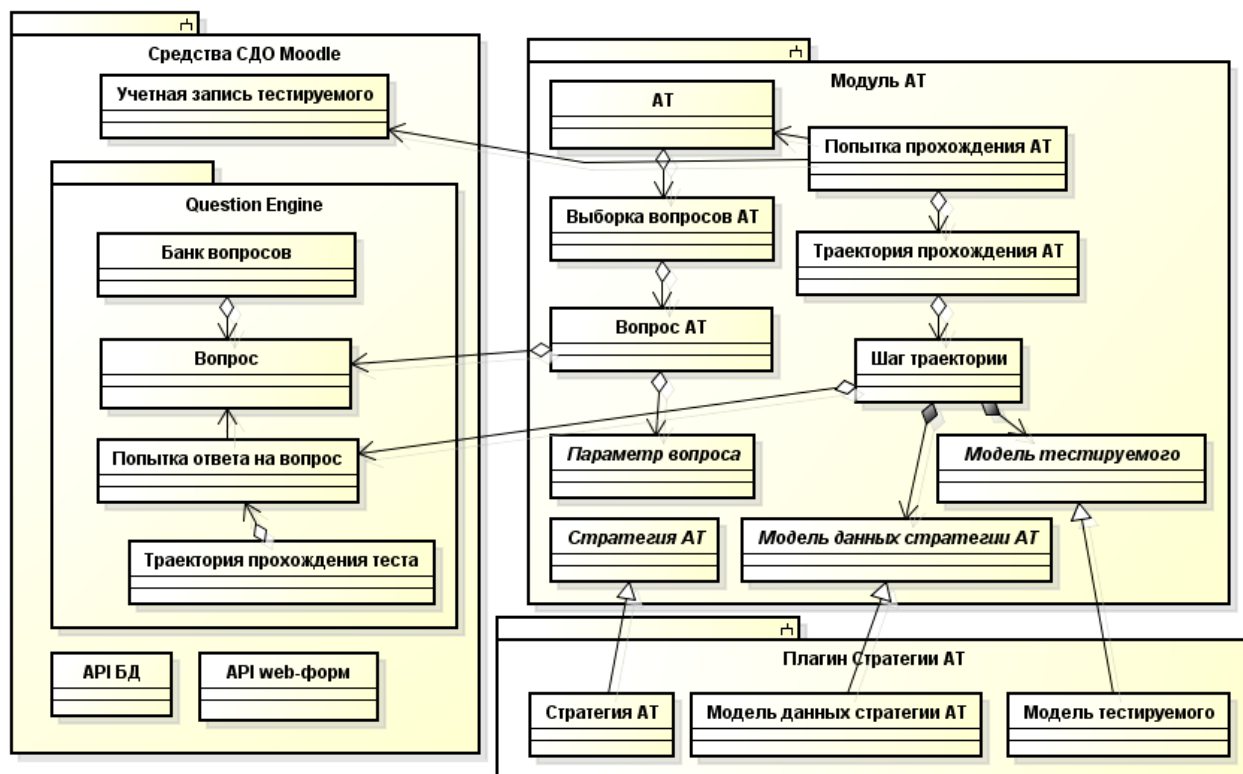


Рис. 4. Архитектура модуля АТ в СДО Moodle

Для своей работы модуль адаптивного тестирования использует существующие средства СДО Moodle, а именно: банк вопросов QB , вопрос Q_i , попытка ответа на вопрос QA , отображение вопроса, получение и проверка ответа.

Заключение

Представлена модель адаптивного тестирования, которая явно разделена на элементы, зависящие от стратегии тестирования, и элементы, общие для всех методов АТ. Представлены алгоритмы подготовки и проведения адаптивного тестирования, использующие данную модель. Разработана архитектура системы адаптивного тестирования применительно к СДО Moodle, которая позволяет сократить трудоемкость реализации новой стратегии АТ за счет того, что необходимо реализовывать только те сущности и процедуры, которые специфичны для стратегии АТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ким, В. С. Тестирование учебных достижений : монография / В. С. Ким. – Уссурийск : Издательство УГПИ, 2007. – 214 с.
2. Данг, Х. Ф. Метод разработки алгоритмов адаптивного тестирования / Х. Ф. Данг, В. А. Камаев, О. А. Шабалина // Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 4 (91) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – (Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Вып. 13). – С. 107–112.
3. Зайцева, Л. В. Модели и методы адаптивного контроля знаний / Л. В. Зайцева, Н. О. Прокофьева // Educational Technology & Society 7(4) 2004.
4. Luecht R. M. A Review of Models for Computer-Based Testing/ Richard M. Luecht, Stephen G. Sireci / College-Board, 2011.
5. Карпенко, А. П. Модельное обеспечение автоматизированных обучающих систем. Обзор / А. П. Карпенко // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 7.
6. Официальный сайт СДО Moodle [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://moodle.org/>

УДК 004.4

*А. Ф. Ушаков, О. Н. Ляпина***СОЗДАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ВЕБ-САЙТА ПРОФИЛИРУЮЩЕЙ КАФЕДРЫ ВУЗА****Волгоградский государственный технический университет**

andrey200964@yandex.ru, lyapinaon@gmail.com

В статье представлена концепция веб-сайта профилирующей кафедры вуза. Авторами проанализированы обобщенные методики создания веб-сайтов, а также описания процессов создания веб-сайтов кафедр. На основании анализа выделены 11 составляющих концепции веб-сайта профилирующей кафедры вуза. Приведены описания каждой составляющей, ее ограничения и методика применения для веб-сайта.

Ключевые слова: разработка сайта кафедры, концепция веб-сайта, веб-сайт кафедры.

*A. F. Ushakov, O. N. Lyapina***CONCEPT DESIGN OF THE UNIVERSITY DEPARTMENT WEBSITE****Volgograd State Technical University**

The article describes the conception of university department website. Authors analyzed general website design methodologies and processes of creating existing university department websites. Based on the analysis authors highlighted 11 components of the website conception, described each component, their limitations and methods to apply them in a website design process.

Keywords: creation of a university department website, website conception, university department website.

Анализ внутривузовских информационных ресурсов показывает, что наиболее объемными по содержанию и востребованными являются ресурсы, формируемые на уровне кафедр. Они могут составлять до 75 % объема всей информации портала университета [1].

Кафедры делятся на общеобразовательные и профилирующие (выпускающие). Основная цель профилирующей кафедры – подготовка специалистов с высшим профессиональным образованием по образовательной программе одного или нескольких близких направлений и специальностей. Профилирующая кафедра несет ответственность за качество обучения студентов, аспирантов, докторантов и слушателей по закрепленным за кафедрой направлениям подготовки и специальностям [2].

Сайт кафедры – важный инструмент для решения вопросов нового набора студентов, повышения качества образования и привлечения партнеров [3].

Основной задачей на начальном этапе разработки сайта является создание концепции будущего сайта. Под концепцией понимается описание требований верхнего уровня к разрабатываемому вебсайту. Это довольно гибкий перечень требований, который может меняться в различных проектах [4], поэтому четкого перечня составляющих концепции не существует.

В ходе анализа методик создания сайтов [5, 6], а также описания процессов создания веб-сайтов кафедр [1, 3, 7, 8] выделен набор состав-

ляющих концепции сайта профилирующей кафедры, включающей следующие элементы:

КС = <ПС, ЦС, ЦА, ПЦА, ИС, Л,
ПО, ДС, П, ИСС, СП>,

где ПС – стейкхолдеры проекта и их потребности; ЦС – цели создания сайта; ЦА – целевая аудитория сайта; ПЦА – потребности целевой аудитории сайта; ИС – информационная структура сайта; Л – требования к локализации сайта; ПО – перечень основных процессов по обслуживанию сайта с указанием исполнителей; ДС – дизайн страниц сайта; П – персонализация информационных ресурсов; ИСС – интеграция сайта с существующими системами и базами данных; СП – схема продвижения сайта.

Рассмотрим, что подразумевается под каждой составляющей, а также накладываемые на них ограничения.

Стейкхолдеры проекта и их потребности (ПС). Стейкхолдерами считаются лица, от которых зависит развитие проекта. Эти лица задают направление развития проекта. Такими лицами могут быть заведующий кафедрой, преподаватели, другие сотрудники кафедры. Стейкхолдеры должны обозначить потребности в создании сайта, т. е. в чем по их мнению сайт должен помочь в деятельности кафедры. Потребности при этом должны формулироваться как можно конкретнее. Опрос стейкхолдеров может осуществляться путем анкетирования или собеседования [5].

Цели создания сайта (ЦС). На основе определенных потребностей стейкхолдеров необходимо сформулировать цели создания сайта. Цель при этом может объединять в себе несколько потребностей. Так, например, цель улучшения оперативного взаимодействия между сотрудниками и студентами кафедры может включать в себя потребности в удаленной проверке работ студентов, а также в автоматизированной раздаче заданий по лабораторным работам.

Целевая аудитория сайта (ЦА). Необходимо определить основные категории пользователей сайта, чьи задачи он будет решать. Под категорией пользователей понимается группа лиц, имеющих сходные задачи и потребности, решаемые с помощью разрабатываемого сайта (например, студенты, преподаватели, деканат, заведующий кафедрой).

Выделение пользователей может осуществляться с помощью экспертного опроса стейкхолдеров проекта. При большом количестве категорий, их необходимо разделить на две группы: первичную – это пользователи, на которых следует ориентироваться в первую очередь при разработке сайта, и вторичную – те, которые являются важными, но чья поддержка менее критична [5].

Потребности целевой аудитории сайта (ПЦА). Необходимо определить потребности выделенных категорий пользователей. Потребность может заключаться в решении пользователем какой-либо задачи (удаленная проверка работ, получение онлайн-консультации и др.) или в наличии на сайте необходимой информации, раздела (расписание преподавателей, раздел новостей и др.). Задачи пользователей должны быть сформулированы в виде задач, решаемых сайтом, а перечень разделов – в виде информационной структуры сайта (см. «Информационная структура сайта»). Некоторые потребности пользователей могут быть не учтены при разработке сайта; конечный перечень утверждается стейкхолдерами проекта. Методика создания сайтов, разработанная Принстонским Университетом, предлагает производить выявление потребностей через проведение серии опросов целевых категорий пользователей [5].

Информационная структура сайта (ИС). Под информационной структурой понимается перечень разделов сайта, их группировка и связи между разделами [3]. Необходимо использовать разделы сайта, выделенные пользователя-

ми на этапе выявления потребностей (см. «Потребности целевой аудитории сайта»). Некоторые разделы могут быть добавлены или удалены, конечный перечень утверждается стейкхолдерами проекта. Группировка разделов может осуществляться по различным критериям: по типам пользователей (для студентов, преподавателей, абитуриентов), направлениям деятельности кафедры (информация о научной и учебной деятельности), виду информации (официальные документы, методические указания). В концепции необходимо описать, какая информация будет размещена в каждом разделе и источник, откуда она будет получена. Необходимо также сформулировать правила, по которым составлена информационная структура, опираясь на которые в нее можно будет вносить новые разделы в случае их появления в процессе развития сайта.

Требования к локализации сайта (Л). Под локализацией сайта понимается его адаптация под конечного пользователя путем перевода публикуемого материала на иностранные языки. Стейкхолдеры проекта должны задать языки, на которых представлен сайт, а также перечень материалов сайта, подлежащих переводу. Некоторые публикуемые материалы могут быть представлены только на одном языке.

Перечень основных процессов по обслуживанию сайта с указанием исполнителей (ПО). К таким процессам могут относиться:

- наполнение сайта информационным контентом;
- периодическое создание резервной копии базы данных;
- слежение за технической работоспособностью;
- исправление обнаруженных ошибок в функционале;
- работа с хостингом и доменом (продление хостинга и домена, решение проблем с размещением сайта, коммуникация с хостинг-провайдером);
- работа с пользователями сайта (например, при наличии сервиса удаленной проверки работ студентов необходимо обрабатывать поступающие заявки);
- продвижение сайта (см. «Схема продвижения сайта»);
- другие.

Процессы по обслуживанию сайта должны быть согласованы с исполнителями. На данном этапе может выясниться, что часть функций

выполнить невозможно вследствие нехватки людей. В таком случае стоит сократить функциональность сайта [4].

Дизайн страниц сайта (ДС). Для реализации всех страниц сайта в едином стиле и последующем развитии сайта (например, при добавлении страниц другими разработчиками), необходимо определить единую концепцию дизайна сайта. Такая концепция может быть представлена в виде набора модульных сеток типовых страниц сайта и дополнена принципами размещения информации на страницах. Под модульной сеткой понимается набор направляющих, вдоль которых располагаются элементы веб-страницы [9, 10].

Персонализация информационных ресурсов (П). На основании различий в потребностях между категориями пользователей интерфейс сайта может адаптироваться под конкретного пользователя. Тип пользователя определяется при его входе в систему. Различие в отображении может заключаться в скрытии некоторой несущественной для данного типа пользователя информации (например, условия поступления в магистратуру не часто нужны аспирантам) и отображении «на переднем плане» более важной информации (например, методические указания для студентов или примеры вступительных экзаменов для абитуриентов). Для каждого типа пользователя составляется перечень отличий в отображении сайта по сравнению с версией, которую видит незарегистрированный пользователь.

Интеграция сайта с существующими системами и базами данных (ИСС). В случае использования кафедрой внешних систем (например, системы дистанционного обучения, БД публикаций студентов и сотрудников), для устаревания дублирования информации, может потребоваться их интеграция с разрабатываемым сайтом. Необходимо составить перечень таких систем, определив для каждой, какая конкретно информация будет использована на сайте и место ее использования. Для информации, которая должна быть непосредственно внедрена на сайт, необходимо определить способ передачи или импорта из внешних систем.

Схема продвижения сайта (СП). После внедрения сайта может быть выбрана схема его продвижения. Необходимо описать основные виды работ, а также назначить исполнителей.

Минимальный набор составляющих такой схемы может включать индексацию сайта в поисковых системах и специализированных каталогах.

Таким образом, проанализированы обобщенные методики создания веб-сайтов, а также описание процессов создания веб-сайтов кафедр. На основе данного анализа выделены составляющие концепции сайта профилирующей кафедры вуза, их ограничения и методика применения для веб-сайта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гляненько, В. В. Сайт кафедры вуза как информационно-образовательный ресурс / В. В. Гляненько, М. И. Потеев // XIV Всероссийская научно-методическая конференция Телематика'2007. Том 4. Секция D. 18–21 июня 2007 года, Санкт-Петербург. – С. 60–61.
2. Типовое положение о кафедре Государственного образовательного учреждения Высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана». – М., 2009. – 15 с.
3. Веряева, Ю. А. Разработка информационной структуры веб-сайта кафедры вуза / Ю. А. Веряева, А. В. Максимов, М. А. Рязанов // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 1(69).
4. Акопянц, А. В. Что такое концепция сайта и зачем она нужна [Электронный ресурс] / А. В. Акопянц. – Режим доступа : <http://akop.ru/personal/539475>.
5. Sharlin, M. Guide to Creating Website Information Architecture and Content / M. Sharlin, E. Tu, T. Bartus // Office of Communications, Princeton University, 2008. – 43 p.
6. Овчинников, С. А. Управление проектом по разработке программного обеспечения с целью повышения качества на основе анализа проектных рисков / Овчинников С. А. // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 8 (111). – С. 67–71.
7. Баканова, М. В. Интеграция образовательных ресурсов в процессе разработки web-сайта выпускающей кафедры вуза / М. В. Баканова // Известия ПГПУ им. В. Г. Белинского. – 2009. – № 13 (17). – С. 70–74.
8. Сугак, Д. Б. Роль веб-сайта в научно-образовательной деятельности вуза / Д. Б. Сугак // Высшее образование сегодня. – 2011. – № 5. – С. 27–30.
9. Мержевич, В. А. Модульная сетка [Электронный ресурс] / В. А. Мержевич // Электронный учебник по веб-разработке. – 2010. – Режим доступа : <http://htmlbook.ru/content/modulnaya-setka>.
10. Колодяжный, П. В. Разработка дизайна сайта с использованием модульной сетки [Электронный ресурс] / П. В. Колодяжный // CMSmagazine: Аналитический портал рынка веб-разработок. – 2013. – Режим доступа : http://www.cmsmagazine.ru/library/items/graphical_design/website-design-development-using-modular-grid/.

УДК 004.4

*А. Ф. Ушаков, Д. В. Литовкин***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО НАПОЛНЕНИЯ
И СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВЕБ-САЙТА КАФЕДРЫ ПОАС****Волгоградский государственный технический университет**

andrey200964@yandex.ru, litd@mail.ru

В статье описан начальный этап создания веб-сайта профилирующей кафедры вуза на примере кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем» (ПОАС) ВолгГТУ. Определены цели и потенциальные пользователи будущего сайта. Описан процесс выявления ожиданий наиболее важных пользователей от разрабатываемого веб-сайта. Представлен перечень информационных ресурсов, в которых заинтересованы наиболее важные пользователи сайта кафедры ПОАС. Определена система организации разрабатываемого сайта.

Ключевые слова: веб-сайт кафедры вуза, концепция веб-сайта, разработка веб-сайта, система организации.

*A. F. Ushakov, D. V. Litovkin***IDENTIFYING OF THE INFORMATION CONTENT AND ORGANIZATION
SYSTEM OF THE POAS DEPARTMENT WEBSITE****Volgograd State Technical University**

The article describes the first phase of creating website of the Computer Science department (POAS) of Volgograd State Technical University. Authors determined stakeholder's goals and potential users of the future website. According to chosen methodology for website creation, described a process of expectations identifying of most important website users. In the article presented a list of information resources, which might interest to specified categories of users. Based on this study, authors created an organization system of the future website.

Keywords: university department website, website conception, website design, organization system.

Введение

Сайт кафедры – важный инструмент для решения вопросов нового набора студентов, повышения качества образования, привлечения партнеров [1].

Целями создания сайта кафедры «Программное обеспечение автоматизированных систем» (ПОАС) заявлены: популяризация кафедры, привлечение абитуриентов и партнеров; улучшение оперативного взаимодействия между сотрудниками и студентами кафедры; трудоустройство студентов и выпускников кафедры; оперативное предоставление доступа к информационным ресурсам кафедры.

Разработка сайта ведется согласно методологии создания образовательных сайтов, предлагаемой Принстонским университетом [2].

Первым шагом определен круг потенциальных пользователей будущего сайта. Для решения данной задачи проведен экспертный опрос сотрудников кафедры ПОАС [3]. По результатам опроса выделенные потенциальные типы пользователей разделены на две группы: пользователи, на которых следует ориентироваться в первую очередь при разработке сайта, и те, чья поддержка является менее важной.

К пользователям первой группы относятся: 1 – абитуриенты; 2 – заказчики, желающие выпол-

нить какой-либо проект в сотрудничестве с кафедрой; 3 – студенты кафедры; 4 – работодатели, ищущие студентов для работы или стажировки; 5 – преподаватели кафедры; 6 – аспиранты кафедры.

К пользователям второй группы относятся: 7 – грантодержатели; 8 – сотрудники кафедры, кроме преподавателей и аспирантов; 9 – преподаватели кафедр других вузов, смежных по направлениям подготовки; 10 – преподаватели других кафедр вуза; 11 – деканат; 12 – учебно-методическое управление (УМУ), ректорат.

**Определение информационного
наполнения сайта**

После определения потенциальных категорий пользователей необходимо выявить их ожидания от сайта кафедры. Под ожиданиями пользователей подразумевается перечень информационных ресурсов и сервисов, которые они хотели бы видеть на сайте кафедры. Для решения задачи, согласно используемой методологии, предпочтительными методами являются проведение опроса потенциальных пользователей, опрос экспертов или составление перечня информационных ресурсов на основе существующих решений.

Респондентам предлагался заранее выделенный набор информационных ресурсов и серви-

сов, в которых они потенциально заинтересованы. Перечень ресурсов и сервисов был составлен на основе анализа сайтов кафедр ведущих вузов в области информационных технологий [4].

Выявление ожиданий абитуриентов, студентов и аспирантов. Для выявления ожиданий абитуриентов, студентов и аспирантов проведено анкетирование. Поскольку различным типам пользователей присущи различные виды деятельности, то для каждого типа пользовате-

лей составлен свой вариант анкеты [5]. В качестве средства анкетирования использовалась система проведения социологических опросов LimeSurvey (www.limesurvey.org).

В основном анкеты состоят из поливариантных вопросов полузакрытого типа [6, 7]. Это позволяет предложить респонденту готовые варианты ответов, т. е. дать ему подсказки. С другой стороны, если предлагаемые варианты его не удовлетворяют, он может указать свои. Пример такого типа вопроса представлен на рис. 1.

Какая информация, связанная с вашим профессиональным ростом, вам была бы интересна?
Если у вас есть какие-либо комментарии к выбранному варианту ответа, оставьте их в поле ввода напротив соответствующей строки.

Отметьте все подходящие варианты
Комментарий только тогда, когда Вы выбираете ответ.

☐ Информация о программах стажировок (в России, за границей)	
☐ Информация о программах обмена студентами (в России, за границей)	
☐ Информация о возможных местах прохождения практики	
☐ Информация о грантах	
Другое:	

 Раздел с информацией о программах обмена на сайте Кембриджского университета:
<http://www.cl.cam.ac.uk/teaching/exchanges/>

Рис. 1. Пример поливариантного вопроса полузакрытого типа из анкеты для студентов

Реже использовались вопросы открытого типа [6] как дополнительные к вопросам закрытого типа с целью, чтобы респондент мог выра-

зить свои предложения и замечания. Пример такого типа вопроса представлен на рис. 2.

Какие еще сервисы (информация), связанные с трудоустройством, или повышением профессиональных навыков, были бы вам интересны?

Рис. 2. Пример открытого вопроса из анкеты для студентов

Всего в опросе приняли участие 178 респондентов, из них: 51 абитуриент (в качестве абитуриентов выступили студенты 1 курса); 122 студента; 5 аспирантов.

Перечень информационных ресурсов разрабатываемого сайта сформирован на основе вариантов ответов, которые выбрали более 50 % респондентов (см. таблицу).

Выявление ожиданий преподавателей кафедр. Для выявления ожиданий преподавате-

лей, в связи с небольшим количеством респондентов, проведен групповой опрос. Преподавателям был предложен набор информационных ресурсов, предварительно составленный в ходе анализа существующих сайтов кафедр. Респонденты могли оценить предложенные варианты или добавить свои. Утвержденный перечень информационных ресурсов представлен в таблице.

Выявление ожиданий работодателей и заказчиков проектов. Проведение опроса работо-

дателей и заказчиков, желающих выполнить проект в сотрудничестве с кафедрой, является затруднительной задачей. В связи с этим в пе-

речень информационных ресурсов включены ресурсы, представленные на существующих сайтах кафедр (см. таблицу).

Распределение информационных ресурсов по категориям пользователей

Информационный ресурс	Абиту- риенты	Сту- денты	Аспи- ранты	Работодатели и заказчики проектов	Препода- ватели
Контактная информация сотрудников		+	+	+	+
Контактная информация студентов		+		+	+
Контактная информация аспирантов			+	+	+
Контактная информация выпускников			+		
Резюме сотрудников, студентов и аспирантов кафедры				+	
Доступ к публикациям сотрудников, студентов и аспирантов кафедры		+	+		+
Поступление на бакалавриат	+				
Информация о будущей профессии, получаемых профессиональных навыках	+				
Информация о процессе обучения на кафедре	+				
Информация о новостях и событиях кафедры		+	+		
Контактная информация кафедры	+	+		+	
Научные направления кафедры	+	+	+	+	+
Выполненные на кафедре проекты и исследования в рамках научных направлений		+	+	+	+
Предлагаемые направления обучения	+				
Информация о стажировках, программах обмена студентами	+	+	+		
Информация о грантах			+		
Информация о местах прохождения производственной практики	+	+		+	
Доступ к кандидатским работам, выполненным на кафедре			+	+	+
Наличие объявлений о вакансиях работы	+	+	+		
Учебные материалы по дисциплинам кафедры		+			
Выбор задания (темы) по курсовой, семестровой, лабораторной работе		+			
Выбор темы выпускной работы (бакалаврская работа, магистерская диссертация); закрепление за преподавателем		+			
Возможность удаленной проверки лабораторных, семестровых, курсовых, выпускных работ		+			
Информация о собственном рейтинге и рейтинге группы		+			
Организационные вопросы: информация о восстановлении после академического отпуска; информация о переводах с других кафедр		+			
Возможность вести личную и групповую переписку		+			
Документы, специфичные для кафедры (отсутствующие на сайте вуза)		+	+		+
Партнеры кафедры	+	+		+	
История кафедры	+				

Создание системы организации сайта

Следующим шагом создания веб-сайта является создание системы организации веб-сайта с учетом выделенного перечня информационных ресурсов и сервисов.

Система организации – способ распределения информации по категориям, например, по теме или хронологически [8]. При достаточно большом количестве подразделов сайта и ориентации на несколько типов пользователей, встает вопрос о создании такой системы организации, которая будет удобна для всех пользователей. Анализ систем организации сайтов кафедр ведущих вузов в области информационных технологий [4] показал, что существуют два основных подхода: 1) группировка подразделов по тематике 2) группировка подразделов по типам пользователей.

Примеры группировки подразделов первого типа представлены на сайте кафедры информационных технологий Стэнфордского университета (cs.stanford.edu) и сайте школы электроники и компьютерной инженерии при Технологическом институте Джорджии (www.ece.gatech.edu). Группировка подразделов второго типа представлена на сайте кафедры информационных технологий Оксфордского университета (www.cs.ox.ac.uk).

К достоинствам первого подхода относится его минималистичность и отсутствие дублирования подразделов в разделах верхнего уровня. Не-

достатком является неочевидность отнесения подразделов к разделам как для конечных пользователей, так и для будущих разработчиков сайта.

К достоинствам второго подхода относится его ориентация на пользователей; в каждом разделе находится информация, нужная конкретной группе пользователей. Недостатками являются: 1) усложнение и увеличение структуры за счет дублирования подразделов; 2) необходимость проведения опроса пользователей при добавлении новых подразделов; 3) необходимость дополнительного разбиения подразделов по тематике вследствие их большого количества; 4) ориентация только на несколько самых важных типов пользователей.

Вопрос выбора способа группировки подразделов было решено вынести на обсуждение с сотрудниками кафедры. В результате решено остановиться на комбинированном подходе, при котором информация общего характера о кафедре, а также информация, необходимая всем категориям пользователей, группируется тематически, а информация, специфичная для отдельных типов пользователей – по типам пользователей (см. рис. 3).

Таким образом, определена гибридная система организации сайта кафедры ПОАС, позволяющая: 1) уменьшить дублирование подразделов; 2) устранить дополнительное разбиение информации внутри разделов; 3) учесть специфику различных типов пользователей.

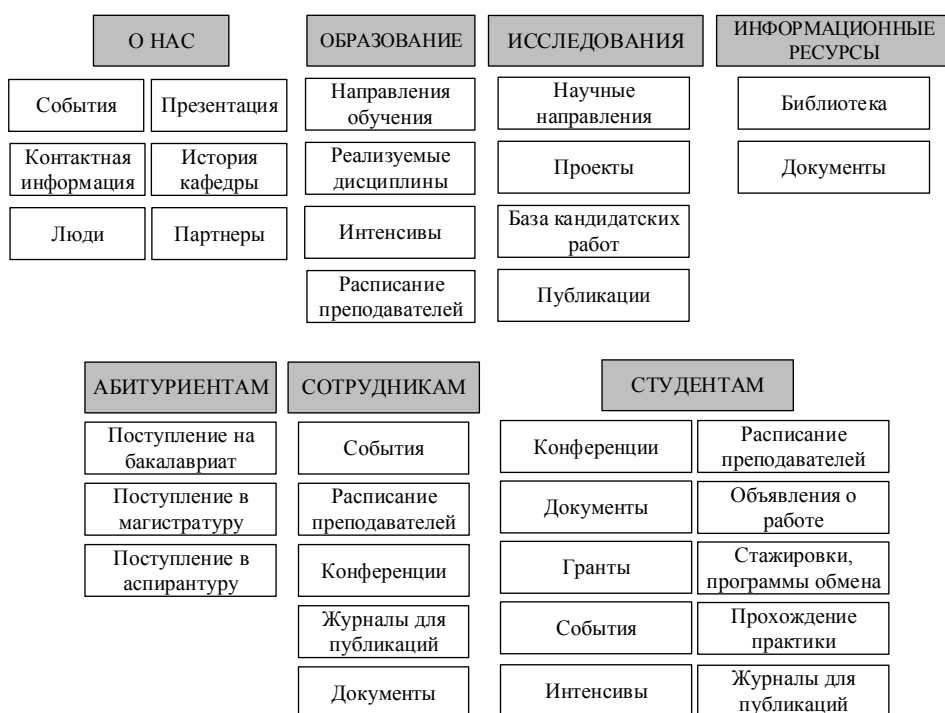


Рис. 3. Комбинированная система организации сайта кафедры ПОАС

Заключение

Таким образом, определены ожидания первичной группы пользователей от разрабатываемого веб-сайта в виде необходимого им набора информационных ресурсов и сервисов. С учетом полученного набора ресурсов и сервисов определена система организации для сайта кафедры ПОАС. Проведенное исследование позволяет перейти к созданию системы навигации и сбору информации для наполнения соответствующих разделов веб-сайта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Веряева, Ю. А.* Разработка информационной структуры веб-сайта кафедры вуза / Ю. А. Веряева, А. В. Максимов, М. А. Рязанов // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – № 1(69). – С. 64–70.
2. Sharlin, M. Guidetocreatingwebsiteinformationarchitectureandcontent / M. Sharlin, E. Tu, T. Bartus // Princeton University, 2009.
3. *Ушаков, А. Ф.* Определение типов пользователей сайта кафедры ПОАС / А. Ф. Ушаков, Д. В. Литовкин // Материалы XIV Международной научно-технической конференции ИТ-технологии: развитие и приложения. 25–26 октября 2013 г. / Сев.-Кавказский горно-металлург. ин-т. – Владикавказ : Фламинго, 2013. – С. 68–71.
4. Рейтинг университетов мира [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.topuniversities.com/university-rankings> (дата обращения 20.04.2014).
5. Анкеты, использовавшиеся в ходе опросов Пользователей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://poas.tw1.ru/survey/> (дата обращения 20.04.2014).
6. *Кравченко, А. И.* Социология: Общий курс: учеб. пособие для вузов. – М. : ПЕРСЭ; Логос, 2002. – 640 с.
7. Камаев, В. А. Анализ анкетных данных и получение оценки прогнозного решения к задаче управления / В. А. Камаев, А. В. Меликов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 15 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 15 (102). – С. 90–96.
8. *Розенфельд, Л.* Информационная архитектура в Интернете : пер. с англ. / Л. Розенфельд, П. Морвиль. – 3-е изд. – СПб. : Символ-Плюс, 2010. – 544 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 658.512.2

В. А. Воробьева, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОСТИ СИНТЕЗИРУЕМЫХ СТРУКТУР ФИЗИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

Волгоградский государственный технический университет

vassasennuyer@gmail.com, dkorobkin80@mail.ru, saf@vstu.ru, sk375@bk.ru

Данная работа посвящена автоматизации процесса синтеза физического принципа действия (ФПД) с целью повышения эффективности работы инженера, изобретателя, научного сотрудника и получения новых, оригинальных технических решений. Представлены методы оценки синтезируемых структур, т.е. способы определения их физической реализуемости и степени соответствия возможных конструктивных реализаций решаемой задаче, на основе использования теории графов, математического аппарата сетей Петри и сети Байеса.

Ключевые слова: физический принцип действия, физический эффект, сети Петри, сети Байеса.

V. A. Vorobyeva, D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov, S. G. Kolesnikov

REVIEW OF THE ASSESSMENT METHODS OF THE PHYSICAL PRINCIPLE OF TECHNICAL SYSTEMS OPTIMALITY

Volgograd State Technical University

This work is devoted to Automating a process of synthesis the physical principle of action (PF) in order to increase the efficiency of the engineer, inventor, researcher and obtain new interesting technical solutions. Presented evaluation methods synthesized structures, methods for determining their physical feasibility and the extent possible design implementations through the use of graph theory, the mathematical formalism of Petri nets and Bayesian network.

Keywords: the physical principle of action, physical effect, Petri nets, Bayesian network.

Введение

В современных условиях повышение эффективности, продуктивности творческого труда в сфере науки и техники предполагает обязательное усиление информационной составляющей этого труда (наряду с факторами материально-технического, организационного характера). Общемировой тенденцией становится перемещение все большей доли труда из области переработки вещества и энергии в область добывания, хранения, переработки и передачи информации. Поэтому проблема удовлетворения потребности в информации ученых-исследователей из фундаментальных и прикладных наук, специалистов-практиков (инженеров) из различных отраслей экономики чрезвычайно актуальна.

Известен ряд подходов к реализации начальных этапов проектирования технических систем (ТС), среди них одним из наиболее пер-

спективных является подход, связанный с привлечением структурированных физических знаний в форме физических эффектов (ФЭ) для автоматизированного формирования и выбора физического принципа действия (ФПД) разрабатываемой ТС. Успешное решение задачи выбора ФПД дает большой экономический эффект, вызывает более заметный технический прогресс в рассматриваемой области и обеспечивает разработку изделий с большим сроком морального старения по сравнению с результатами, полученными на этапах выбора технического решения или параметров ТС.

Алгоритмы реализации автоматизированного синтеза ФПД на основе данных моделей описания ФЭ представлены в [1–5], где под физическим принципом действия ТС понимается структура совместимых и объединенных ФЭ, обеспечивающих преобразование заданного начального входного воздействия A_1 в заданный конечный результат (выход) C_n . Выделяют элементарные структуры ФПД, которые основаны

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-07-97032 р_поволжье).

на одном ФЭ. Под ФПД понимают ориентированный граф, вершинами которого являются наименования физических эффектов, а ребрами входные A и выходные C потоки вещества, энергии и сигналов. Большинство ФПД изделий имеют сложную структуру, в которой используется одновременно несколько различных ФЭ. Синтез таких структур основывается на следующем понятии совместимости ФЭ. Два последовательно расположенных ФЭ (A_i, B_i, C_i), ($A_{i+1}, B_{i+1}, C_{i+1}$) считаются совместимыми, если результат воздействия C_i предыдущего ФЭ эквивалентен входному воздействию A_{i+1} последующего ФЭ. Два совместимых ФЭ могут быть объединены, при этом входное воздействие A_i будет вызывать результат C_{i+1} . Под эквивалентностью воздействий понимается: 1) качественная совместимость по совпадению наименований входов и выходов; 2) качественная совместимость по совпадению качественных характеристик входов и выходов; 3) количественная совместимость по совпадению значений (диапазонов) физических величин.

Анализ работ, связанных с использованием структурированных физических знаний [6–10] в виде физических эффектов (ФЭ) на начальных этапах проектирования технических систем (ТС), показал ряд проблем, тормозящих эффективное применение и широкое внедрение данных методов:

- сильные ограничения на типы получаемых структур, определяемые простотой алгоритмов синтеза ФПД;
- несовершенство методов и средств представления результатов синтеза;
- сложность оценки адекватности синтезированных структур ФПД решаемой задаче.

Важной задачей является представление результатов синтеза структур ФПД. Наиболее распространена выдача цепочек ФЭ в порядке их получения. Актуальной проблемой автоматизации выбора ФПД ТС [4] является разработка методов оценки синтезируемых структур, то есть способов определения их физической реализуемости и степени соответствия их возможных конструктивных реализаций решаемой задаче.

Методы исследования

Проблему оценки оптимальности сетевых структур физических принципов действия предлагается решать посредством построения множества критериев на структурах ФПД (необходимо ввести дополнительное поле ФЭ – критерий, отражающий оптимальность исполь-

зования в цепочке ФПД данного ФЭ). На основе этой характеристики ФЭ будут присваиваться коэффициенты (веса) [7]. В таком случае задача выбора наиболее оптимальных ФПД сводится к задаче комбинаторной оптимизации (чем меньше суммарный вес полученного ФПД, тем ближе к оптимальности данная цепочка ФПД). Значение критерия веса может быть получено из знаний о стоимости объекта, с помощью которого реализуется ФЭ, а также его сложности или частоты встречаемости в реализациях. В данной работе исходим из двух предположений:

- 1) веса получены и используются их дискретные значения для нахождения оптимальной цепочки ФПД среди имеющегося множества ФПД;
- 2) веса ФЭ необходимо получить.

В рамках решения поставленной задачи было принято решение использовать теорию графов, математический аппарат сетей Петри и сети Байеса.

Использование теории графов

Если известны веса каждого ФЭ, то тогда задача нахождения оптимальной цепочки ФПД сводится к решению задачи нахождения кратчайшего пути на взвешенном графе. Задача нахождения кратчайшего пути или задача коммивояжера имеет множество алгоритмов решения, многие из которых реализованы в различных программных пакетах.

Однако данные алгоритмы имеют некоторый недостаток применительно к поставленной задаче. Допустим, имеются две цепочки ФПД, связывающих заданные вход и выход, одинакового веса. Возникает вопрос: как определить, какая из цепочек ФПД является наиболее оптимальной? Будем считать оптимальной цепочку ФПД с наименьшим количеством вершин. Для выбора оптимальной цепочки ФПД из двух и более равных по весу и по количеству вершин цепочек введем понятие «равномерности»:

- 1) возьмем среднее арифметическое значений весовых коэффициентов каждого ребра найденного кратчайшего пути;
- 2) найдем разницу между значениями весовых коэффициентов и среднего арифметического;
- 3) сложим сумму полученных значений. Данную сумму назовем коэффициентом равномерности.

Таким образом, при выборе из двух ФПД одинаковой длины и веса будем учитывать данный коэффициент равномерности. Чем меньше коэффициент равномерности, тем ближе к оптимальному полученный кратчайший путь или ФПД.

Для реализации данного функционала можно использовать программный пакет Graphviz (<http://www.graphviz.org/>). Этот пакет используется для автоматического построения графов, а также содержит необходимые библиотеки для поиска кратчайшего пути.

Программы из пакета Graphviz, отображающие графы, получают описания графов в виде текста на простом языке и создают диаграммы в нескольких форматах (Graphviz также поддерживает формат GXL-диалект XML).

Этот пакет используется для автоматического рисования графов, что может оказаться важным в инженерии программ, базах данных и веб-дизайне, для создания сетей, а также для создания визуальных интерфейсов во многих других областях. В Graphviz есть множество полезных возможностей, доступных при построении конкретных диаграмм, например, можно выбрать цвет, шрифты, расположения узлов, стиль линий, гиперссылки и задать формы используемых элементов графа.

Также в пакете Graphviz содержатся необходимые библиотеки для поиска кратчайшего пути: libagraph поддерживает программирование операций с графами, предоставляя для этого средства работы с графами в памяти и средства чтения и записи файлов, содержащих графы. Для графов, узлов и ребер можно указывать атрибуты, которые может определять программист, и пары строк имя-значение. Графы состоят из узлов, ребер и вложенных подграфов. Библиотека libpathplan содержит функции поиска кратчайшего пути между двумя точками в простом многоугольнике.

Использование сетей Петри

Другим возможным вариантом решения задачи нахождения оптимального пути (оптимальной цепочки ФПД) является использование сетей Петри. Использование сетей Петри актуально, так как существующие пакеты реализации сетей Петри (в частности, пакет CPN Tools <http://cpntools.org/>) содержат необходимый функционал для моделирования и анализа созданных сетей.

Анализ сложных систем на базе сетей Петри можно выполнять посредством имитационного моделирования систем массового обслуживания (СМО), представленных моделями сетей Петри. При этом задаются входные потоки заявок и определяется соответствующая реакция системы. Выходные параметры СМО рас-

считывают путем обработки накопленного при моделировании статистического материала.

Возможен и другой подход к использованию сетей Петри для анализа объектов, исследуемых на системном уровне. Он не связан с имитацией процессов и основан на исследовании таких свойств сетей Петри, как ограниченность, безопасность, сохраняемость, достижимость, живость. Достижимость характеризуется возможностью достижения маркировки M_j из состояния сети, характеризуемого маркировкой M_k .

В сетях Петри существует понятие графа достижимости. Предположим, что сетевую цепочку ФПД можно представить в виде сетей Петри и что построенный граф достижимости для данной сетевой цепочки позволит выводить все возможные достижимые (т. е. в принципе возможные, а также оптимальные и имеющие практическое применение) линейные цепочки. Дерево достижимости можно использовать для поиска всех возможных путей от заданного входа ФЭ до заданного выхода ФЭ.

В сетях Петри вводятся объекты двух типов: динамические – изображаются фишками (маркерами) внутри позиций – и статические – им соответствуют вершины и дуги сети Петри. Отображение взаимодействия элементов системы во времени и пространстве осуществляется в виде движения маркеров через позиции и переходы сети Петри [11]. Потенциально в сетях Петри существует механизм задания весов для решения задачи нахождения оптимальной цепочки ФПД из множества найденных.

Для решения поставленной задачи необходимо определить применяемый тип сети Петри. Временной сетью Петри будем называть пятерку $N = (P, T, F, W, D)$, где $P = \{p\}$ – конечное множество позиций; $T = \{t\}$ – конечное множество переходов; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – конечное множество дуг; $W : F \rightarrow \mathbb{N}$ кратность дуг; $D : T \rightarrow \mathbb{N}$ времена срабатывания переходов; $\mathbb{N}$ – множество натуральных чисел [11]. Таким образом, временная сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф, дополненный характеристиками дуг и вершин, представленными натуральными числами. Данную временную характеристику можно использовать как вес, и тогда для нахождения оптимальной ФПД необходимо свести задачу к нахождению самой быстрой цепочки, т. е. пути с наименьшей суммарной временной характеристикой. В CPN Tools существует библиотека, реализующая данный функционал.

Однако вопрос нахождения оптимальной цепочки ФПД из найденных равновесных (в данном случае равных путей по времени срабатывания) остается открытым.

Использование сети Байеса

Для нахождения значений весов ФЭ предлагается применение наивного байесовского классификатора. Байесовские сети представляют собой графовые модели вероятностных и причинно-следственных отношений между переменными в статистическом информационном моделировании. В машинном обучении под классификацией понимают задачу определения категории, к которой принадлежит ранее не встречавшийся образец, на основании обучающего множества, для элементов которого эти категории известны. Таким образом, можно отнести имеющуюся цепочку ФПД к некоторой категории сложности или оптимальности. Обучающая выборка получается на основе экспертных оценок.

Главным инструментом машинного обучения является теорема Байеса:

$$p(\theta|D) = \frac{p(\theta)p(D|\theta)}{p(D)},$$

где D – обучающая выборка (данные); θ – параметры модели для обучения (в нашем случае D – оценки, выставленные экспертами полученным ФПД; θ – ФЭ); $p(\theta|D)$ – распределение вероятностей параметров модели после обучения (апостериорная вероятность); $p(D|\theta)$ – вероятность данных при условии зафиксированных параметров модели [12, 13].

Так как элементы ФЭ в цепочке ФПД не влияют друг на друга, то можно использовать одномерную независимую Байесовскую модель, а именно наивный байесовский классификатор. За счет предположения независимости параметры каждого атрибута могут быть обучены отдельно, и это значительно упрощает обучение (особенно когда количество атрибутов велико).

Если ввести несколько классов оптимальности ФПД (или обратное – несколько классов сложности ФПД), то можно обучить модель разделять массив ФЭ по принадлежности к данным классам.

Обучение: пусть задан набор ФПД, которые уже распределены (вероятностно распределены) по классам C_j , задан массив ФЭ. Для обучения такого классификатора необходимо настроить вероятности $p(W_t|C_j)$, где W_t – физиче-

ский эффект; C_j – класс, т. е. подсчитать оценки вероятностей того, что тот или иной ФЭ относится к тому или иному классу оптимальности.

Для реализации Байесовской сети и ее обучения можно использовать пакет `bnlearn`. Пакет позиционируется как инструмент работы с байесовскими сетями и предоставляет возможности настройки параметров. Основная ценность `bnlearn` – настройка структуры. Пакет `bnlearn` содержит набор алгоритмов. Каждый алгоритм имеет собственную R-функцию, название которой соответствует указанному в скобках. Все алгоритмы работают только в случае, когда либо все переменные дискретны (представлены факторами в R), либо все переменные вещественны (представлены числовыми массивами). На вход алгоритму обучения следует подавать наборы значений переменных на обучающей выборке в виде фрейма данных (`data frame`).

Выводы

Был проведен анализ подходов к оценке синтезируемых структур физического принципа действия технических систем на основе использования теории графов, математического аппарата сетей Петри и сети Байеса. Указаны преимущества каждого из подходов, программные средства, позволяющие решить поставленную проблему, и сложности, возникающие в результате использования предложенных методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдов, Д. А. Автоматизированное проектирование линейных структур физических принципов действия технических систем / Д. А. Давыдов, С. А. Фоменков // *Машиностроитель*. – 2002. – № 2. – С. 33–35.
2. Яровенко В. А., Фоменков С. А. Формирование интегрированной системы обработки структурированных физических знаний с применением мультиагентного подхода // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2009. Т. 12. № 7. С. 126–128.
3. Фоменков, С. А. Программный комплекс представления и использования структурированных физических знаний / С. А. Фоменков, Д. М. Коробкин, А. М. Дворянкин // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2012. – № 11. – С. 24–28.
4. Коробкин, Д. М. Программный комплекс поддержки процесса формирования информационного обеспечения фонда физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2009. – № 87. – С. 306–310.
5. Сальникова Н. А. Структурирование физических знаний в поисковом конструировании технических систем // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 118–122.
6. Фоменков, С. А. Автоматизированный информационный поиск физических эффектов / С. А. Фоменков,

Д. А. Давыдов, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 7. – С. 30–34.

7. Коробкин, Д. М. Модель представления структурированной предметной информации в виде физических эффектов в тексте на естественном русском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 7. – С. 17–21.

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. Автоматизация процедур формирования информационного обеспечения для систем концептуального проектирования, использующих структурированные физические знания в форме физических эффек-

тов / С. А. Фоменков, А. В. Петрухин, С. Г. Колесников // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 1. – С. 26–29.

10. Фоменков С. А., Колесников С. Г., Коробкин Д. М. Формирование и структура баз данных по физическим эффектам // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 18. № 22 (125). С. 153–157.

11. Кириличев, Б. В. Моделирование систем : учеб. пособие / Б. В. Кириличев. – М. : МГИУ, 2009. – С. 134–135.

12. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высшее образование, 2005 с.

13. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей : учебник / Б. В. Гнеденко. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – С. 386–387.

УДК 004.822

Ю. Ф. Воронин, А. В. Матохина, Е. О. Сикорский, А. Б. Рогудеев

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И ЛИКВИДАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ*

Волгоградский государственный технический университет

voronin@vstu.ru, matokhina.a.v@gmail.com

В статье представлена автоматизированная система диагностики и ликвидации литейных дефектов. Описаны структура визуально-логического и нейросетевого анализов выявления причин возникновения дефектов и способов их ликвидации. Представленная автоматизированная система позволяет быстро и незатруднительно для специалистов литейного производства выявлять литейные дефекты, знакомиться с материалами по их возникновению и быстро ликвидировать на своем предприятии.

Ключевые слова: система, ликвидация, дефекты отливки, визуально-логическое, выявление, предметная область, анализ, методы, раковины, нейронная сеть, цвет, форма, свищевидная, размер.

Yu. F. Voronin, A. V. Matokhina, E. O. Sikorsky, A. B. Rogudeev

THE AUTOMATED SYSTEM OF DIAGNOSTICS AND ELIMINATION OF FOUNDRY DEFECTS

Volgograd State Technical University

The automated system of diagnostics and elimination of foundry defects is presented in article. The structure of visual and logical and neuronetwork analyses of identification of the reasons of emergence of defects and ways of their elimination are described. The presented automated system allows quickly and not difficult for experts of foundry production to reveal foundry defects, to get acquainted with materials on their emergence and quickly to liquidate at the enterprise.

Keywords: system, eliminations, defects of casting, visual and logical, identification, subject domain, analysis, methods, sinks, neural network, color, form, svishchevidny, size.

Снижение брака отливок является важнейшей задачей литейщиков и зависит от квалификации специалиста, его представлений о разновидностях дефектов, причин их возникновения и способов ликвидаций. Наличие у литейщиков таких знаний позволит не только раскрыть причину возникновения дефекта и ликвидировать его, но и разработать технологический проект с эффективными технологическими решениями, предупреждающими возникновение дефектов [1–3].

На сегодняшний день имеется большое количество автоматизированных систем, позволяющих, как описывают авторы, проводить моделирование литейной технологии. Но, к сожалению, они не используются литейщиками в борьбе с браком.

Авторы статьи ставят целью разработать автоматизированную систему диагностики литейных дефектов, позволяющую в конечном итоге предоставить пользователю список конкретных рекомендаций по ликвидации дефекта отливки.

Работа системы происходит по двум направлениям. На первом направлении используется «Информационная платформа», в основу ко-

* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).

торой положен метод диагностики литейных дефектов с использованием визуально-логического определения. Система позволяет пользователю по представленной в платформе серии увеличенных фотографий точно определить разновидность рассматриваемого, четко изображенного на фотографии дефекта по его визуальным характеристикам (цвет, блеск, шероховатость, размер, форма, место расположения, количество и др.). В результате, следуя по представленным этапам отличительных особенностей дефектов, на третьем этапе предоставляется информация по разновидности исследуемого дефекта, этапам его формирования и способам ликвидации. Помимо описательной функции, система используется как база данных для хранения информации по разновидностям дефектов отливок, причинам их возникновения и способам ликвидации.

На втором направлении, для определения отличительных особенностей дефектов, использована нейронная сеть, целью которой является автоматическая идентификация дефекта по его фотографии с последующим переходом сразу на третий этап.

Общая архитектура описанной автоматизированной системы диагностики и ликвидации литейных дефектов визуально-логическим и нейросетевым способами показана на рис. 1.



Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы диагностики и ликвидации литейных дефектов

Рассматриваемый метод повышения качества отливок визуально-логическим способом за-

ключается в идентификации дефекта отливки путем визуального поиска схожих изображений, что абсолютно не затруднительно для человека. Метод включает трехуровневое дерево идентификации дефектов, упрощенная схема которого представлена на рис. 2. На первом уровне расположены восемь фотографий дефектов, демонстрирующих ключевые особенности группы дефектов. Выбирая на экране дефект, похожий на исследуемый, пользователь нажимает на расположенную ниже надпись и переходит на второй уровень. На втором уровне происходит детализация возможных отличительных свойств дефекта по характерным признакам.

Выбрав наиболее похожий дефект, пользователь переходит на нижний, третий уровень, где демонстрируется уточненная разновидность дефекта, в виде семи – девяти фотографий. После внимательного анализа приведенных фотографии отливок выбирается окончательный образ дефекта. Следует отметить, что группы дефектов третьего уровня схожи по причинам возникновения и способам ликвидации дефектов, но, все же, имеют некоторые отличия. Каждая из представленных на третьем уровне отливок подкреплена описанием разновидности дефектов, этапов их возникновения и способов ликвидации, в ряде случаев с анимационным представлением.

Рассмотрим более подробно особенности нейросетевого определения разновидностей литейных дефектов. Общая схема функционирования автоматизированной системы, может выполняться автоматически, путем загрузки фотографии дефекта в нейросетевую систему и получения его наименования на выходе. На третьем, завершающем этапе, пользователь получает рекомендации по ликвидации дефекта.

Алгоритм процесса диагностики литейных дефектов с использованием нейронной сети содержит три основных этапа:

- получение из исходного изображения характеристик дефекта, заложенных в программе;
- идентификация дефекта с использованием нейронной сети;
- получение описания этапов возникновения дефектов и способов их ликвидации.

Исследование фотографий дефектов для применения нейросетевого способа показало, что места возникновения дефектов отличаются от остальной поверхности своими, более темными оттенками. Поэтому процесс их обнаружения связан с вычислением значения порога изображения (в градации серого). Этот порог за-

висит от системы формирования изображения и должен быть настроен в отношении положения камеры и освещения. Для обработки используем метод Бернсена. С помощью этого метода можно выявить места дефектов на изображении, а

также посчитать их количество. Одним из наиболее эффективных методов поиска аналитически заданных примитивов (линий и эллипсоидов) является на сегодня группа методов, основанных на идее преобразования Хафа.

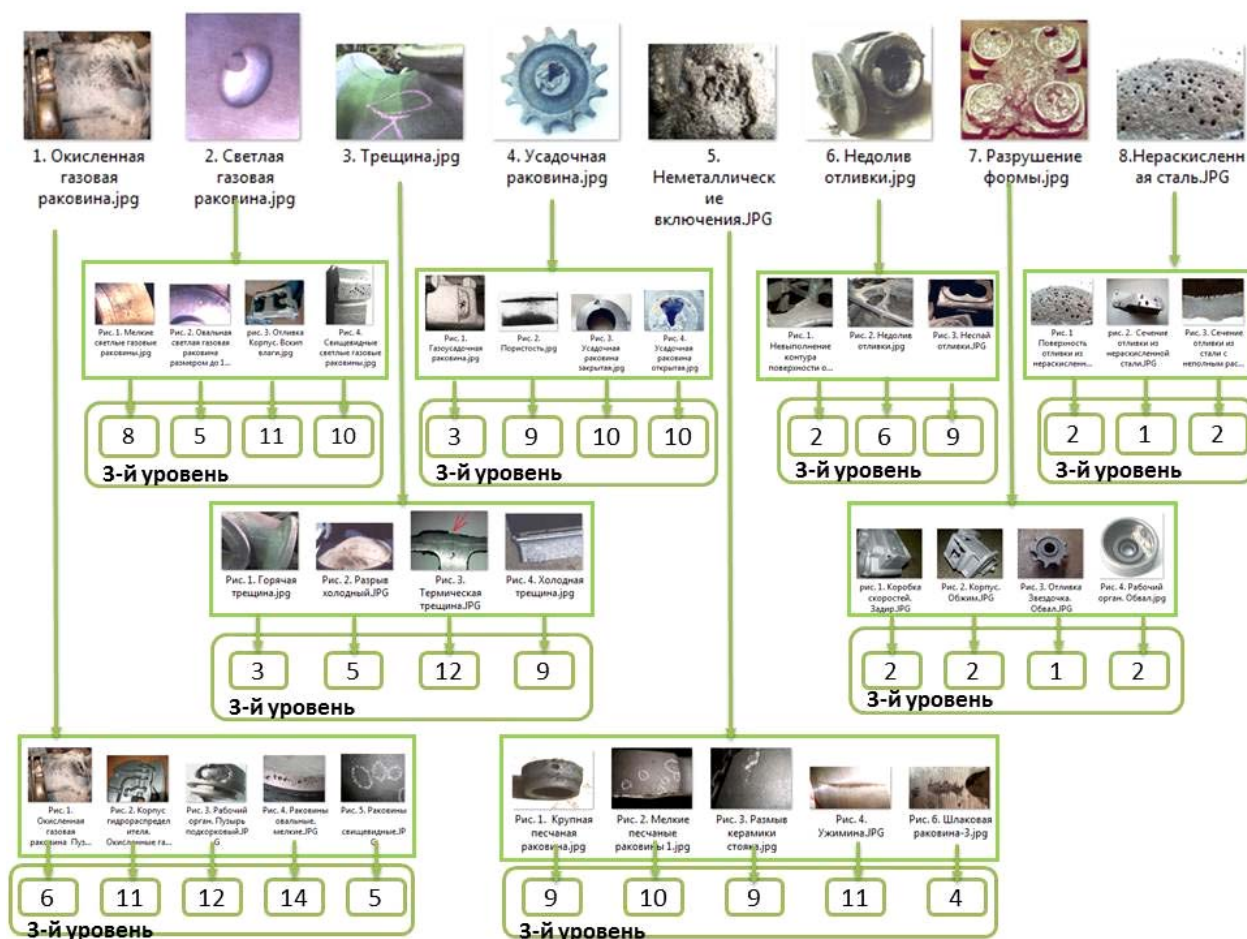


Рис. 2. Схема дерева идентификации дефектов отливок

Выбор нейросетевого способа обусловлен следующими соображениями:

- так как однозначно определить дефект по фотографии может только эксперт, то использовать знания эксперта можно через нейросеть;
- после анализа с помощью нейросети можно получить функции принадлежности дефектов к рассматриваемым разновидностям дефектов. Это значит, что мы сможем узнать, какой из дефектов наиболее совпадает по характеристикам с идентифицируемым.

Наиболее подходящим типом нейросети для такой задачи является однослойный перцептрон (сеть прямого распространения). Он будет состоять из входного слоя, промежуточного слоя и выходного слоя. На вход нейронной сети мы можем подать четыре значения характери-

стик, которые мы получили после применения методов обработки изображения дефекта, а также после пользовательского выбора. Промежуточный слой должен включать в себя большее количество нейронов, чем на входе и выходе. Выходным слоем нейронной сети будет являться значение функций принадлежности к каждому из рассматриваемых разновидностей дефектов.

Для обучения нейросети можно использовать алгоритм, при котором происходит распространение сигналов ошибки от выходов нейросети к ее входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы. Данный алгоритм обучения получил название метода обратного распространения ошибки.

Рассмотрим подробно процесс идентификации дефекта «Окисленная газовая раковина» с использованием визуально-логического метода. Представленная ниже информация является результатом многолетней работы по визуально-логическому выявлению и ликвидации дефек-

тов отливок из чугуна и стали. Для примера приведено исследование свищевидной окисленной газовой раковины на отливке «Рабочий орган» насоса для перекачки нефти (третий уровень, слева на рис. 3).

Уровень 1. Окисленная раковина

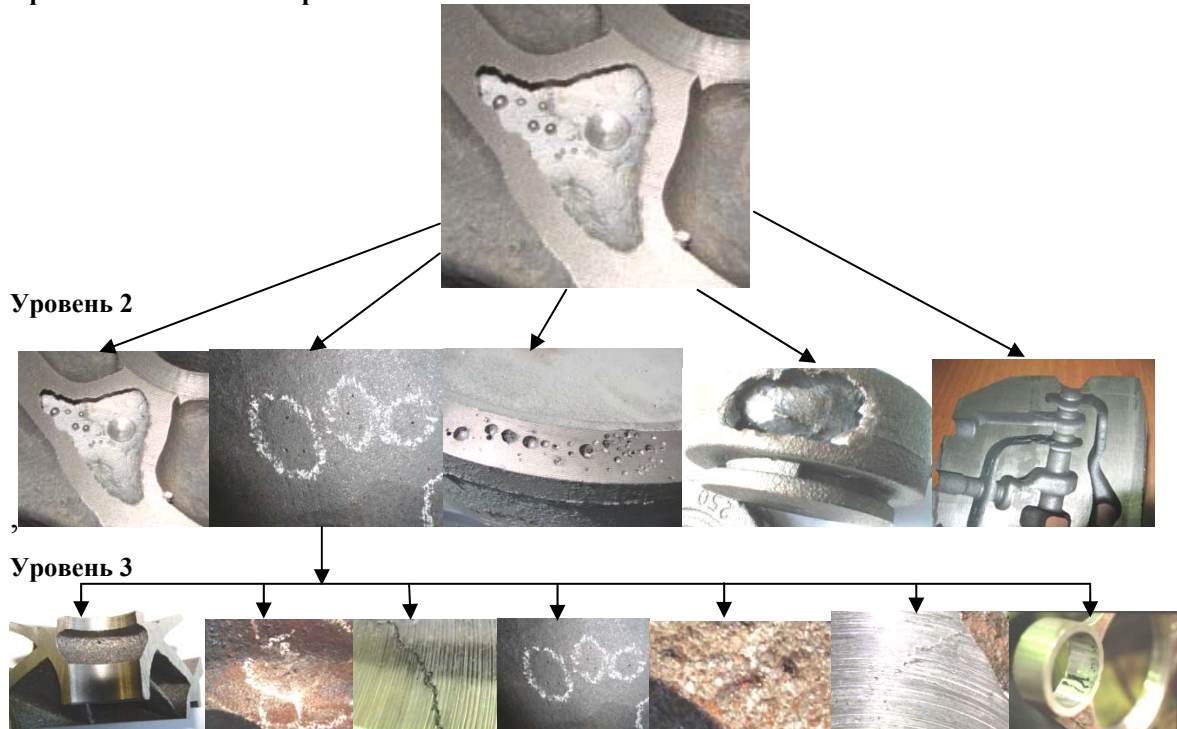


Рис. 3. Фрагмент 3-уровневой «Информационной платформы» с определением, в частности, окисленных свищевидных газовых раковин. Каждый дефект на 3-м уровне завершается подробным описанием ликвидации дефектов, приведенным ниже

На рис. 3 представлен фрагмент информации 3-уровневой «Информационной платформы». Рассмотрим отличительные особенности и

позтапное определение условий формирования свищевидных окисленных газовых раковин на отливке «Рабочий орган» насоса.



Рис. 4, а. Фрагмент отливки «Рабочий орган» с окисленной газовой раковиной

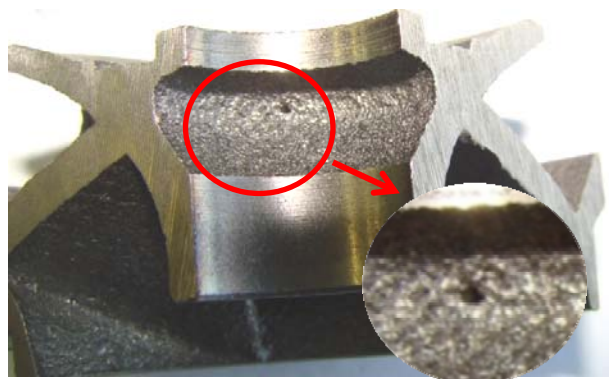


Рис. 4, б. Обратная сторона фрагмента отливки «Рабочий орган» со свищевидной окисленной газовой раковиной от стержня

Представленные на рис. 4, а и б мелкие свищевидные раковины расположены в отливке со стороны стержня и формы. Такие дефекты

вызывают значительные затруднения у литейщиков при их ликвидации, но после изучения этого материала можно будет увидеть, на-

сколько просты и очевидны рассматриваемые пороки отливок [5]. На рис. 4, а представлен фрагмент наружной стороны отливки «Рабочий орган» насоса с дефектом. Дефект представляет вытянутую полость с шероховатой поверхностью серо-синего цвета. Такая поверхность напоминает дефект «Усадочная раковина», образованная в незначительном термическом узле при заливке формы горячим металлом. Литейщики завода пришли именно к такой характеристике дефекта и занимались ликвидацией усадки длительное время, а рассматриваемый дефект появлялся и исчезал вне зависимости от результатов исследований.

Проведенный анализ позволил установить, что диаметр утолщения отливки в месте возникновения раковины составляет 9 мм, что затруднительно для возникновения усадочной раковины в таком пространстве отливки. В процессе исследований в средней части протяженного дефекта была обнаружена окисленная свищевидная раковина, уходящая внутрь отливки и выходящая на ее внутренней поверхности, как показано на рис. 4, б. Следовательно, отливка имела окисленную свищевидную раковину, формируемую с внутренней стороны.

Проходя по дереву визуально-логической идентификации дефекта, пользователь имеет возможность опуститься до 3-го уровня, где имеется описание с анимацией процесса возникновения и ликвидации дефектов. Ознакомимся с описанием процесса возникновения рассматриваемого дефекта.

Рассматривая под увеличением не менее 20 крат свищевидную раковину, устанавливаем, что она имеет серо-синий цвет недоливки отливки, с диаметром отверстия 1 мм, и уходит в глубину отливки. Внутренняя поверхность отливки в этом месте формировалась от вклеиваемого внутреннего стержня сферической формы. Стержень изготавливался из плакированной смеси, где в качестве связующего использовалась новолачная феноло-формальдегидная смола с отвердителем. Смесь имела повышенную газотворность в пределах 20 см³/г смеси. Для вывода газа из стержня было предусмотрено вентиляционное отверстие рядом с местом его вклейки в формирующий стержень. По технологии клей наносится кистью в виде полоски по диаметру знаковой части в месте контакта его с формовочным знаком. Однако иногда, вместо нанесения клея кистью, его наносили окутанием знаковой частью в клей. В результа-

те клеем было покрыто место выхода газа из стержня, что создавало условия затрудненного выхода газа в атмосферу. После повышения требовательности к выполнению сборочных операций стержней подобные дефекты не возникали.

Рассмотрим полную последовательность этапов формирования рассмотренного дефекта, что особенно важно для его ликвидации.

Этап 1. Первоначально дефект представлен в виде вытянутой полости с шероховатой поверхностью серо-синего цвета, в центре которой имеется свищевидная раковина диаметром в пределах 1 мм.

Этап 2. Диаметр места расположения раковины, равный 9 мм, свидетельствует о невозможности возникновения в этом месте усадочной раковины. Следовательно, увеличенная раковина является газовой; ее образование происходило в момент начала кристаллизации металла с формированием дендритов и образованием шероховатой поверхности дефекта.

Этап 3. Образование увеличенной газовой раковины происходило через свищевидное отверстие, соединяющее поверхности отливки.

Этап 4. Внутренняя поверхность отливки формировалась от вклеиваемого сферического стержня из плакированной смеси с повышенной газотворной способностью.

Этап 5. Выполнение операции нанесения клея окутанием закупоривало вентиляционную поверхность стержня, что способствовало повышению давления газа и формированию газовой раковины.

Последующее внимательное проведение операций вклейки стержней и совершенствование вентиляционной системы ликвидировало возникновение рассматриваемой газовой раковины. Аналогичная информация приводится к каждому дефекту на 3-м уровне автоматизированной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Juriy F. Voronin, Sergey A. Fomenkov, Alla G. Kravets, Anna V. Matokhina and Gennadiy V. Khanov Virtual Simulator for Making Castings Without Cracks Skills Development // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 24.
2. Воронин, Ю. Ф. Комплекс тренажеров «Технологические основы устранения дефектов отливок» / Ю. Ф. Воронин, В. А. Камаев, А. В. Матохина // Открытое образование. – 2011. – № 6. – С. 21–26.
3. Воронин, Ю. Ф. Синтез процессов формирования отливок повышенного качества / Ю. Ф. Воронин // Оборудование : технический альманах. – 2009. – № 1 (март). – С. 8–12.

4. Камаев, В. А. Автоматизированное поисковое конструирование / В. А. Камаев // Наука – производству. – 2000. – № 1. – С. 3–7.

5. Voronin Y. F., Kamaev V. A., Matokhina A. V., Karpov S. A. Computer-aided determination of defects, causes of their origination and elimination method // Литейное производство. – 2004. – № 7. – С. 17–24.

6. Воронин, Ю. Ф. Система определения и ликвидации окисленных газовых раковин в отливках из чугуна и стали : учеб. пособие / Ю. Ф. Воронин ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – 157 с.

7. Медведев, Я. И. Газы в литейной форме / Я. И. Медведев. – М. : Машиностроение, 1976. – 240 с.

8. Медведев, Я. И. Газовые процессы в литейной форме / Я. И. Медведев. – М. : Машиностроение, 1980. – 200 с.

УДК 004.5

А. М. Дворянкин, Р. Р. Романенко

ГЕНЕРАЦИЯ ПРОТОТИПА ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ТРИЗ

Волгоградский государственный технический университет

romanenkorr@gmail.com

Рассматривается механизм генерации прототипа пользовательского интерфейса при помощи алгоритма решения изобретательских задач. Описаны проблемы и возможные решения при генерации прототипа пользовательского интерфейса. Представлены этапы разработки пользовательского интерфейса и возможности его автоматизации.

Ключевые слова: алгоритм решения изобретательских задач, прототип пользовательского интерфейса.

A. M. Dvoryankin, R. R. Romanenko

PROTOTYPE GENERATION USER INTERFACE USING TRIZ METHODS

Volgograd State Technical University

Here is described a mechanism of generation of the prototype user interface using algorithm of invention problems solving. Here are described problems and solutions in the generation of a prototype user interface. Here are described stages of development of the user interface and variants automate the generation of the user interface.

Keywords: ARIZ, prototype user interface.

Интенсивность работ по созданию и практическому использованию инструментальных средств прототипирования пользовательских интерфейсов значительно возросла в последние годы.

Прототипирование пользовательских интерфейсов помогает улучшить и упростить процесс создания качественных пользовательских интерфейсов. На сегодняшний момент разработка пользовательского интерфейса становится одной из самых важных задач. Интерфейсы, которые создаются, интерактивны, откликаются на воздействие пользователя и обладают эмоциями. Прототипы позволяют сформулировать чувства и функции дизайна так, как этого не могут сделать простые экранные формы.

Сегодня разработчик волен выбирать между тем, что бы самому разрабатывать прототип или использовать специальное программное обеспечение, которое позволяет интерактивно и быстро создавать прототип. Рассматривая оба варианта, человек, который разрабатывает прототип интерфейса, должен обладать представлениями о правилах размещения элементов и иметь базовые знания человеко-машинного

взаимодействия. В проекте со скромным бюджетом может не оказаться человека с такими знаниями. Поэтому задача создания метода автоматической генерации прототипа интерфейса является актуальной.

Создание пользовательского интерфейса – это комплексный и многоаспектный процесс, который обычно включает в себя пять этапов:

- 1) сбор функциональных требований;
- 2) создание информационной архитектуры;
- 3) юзабилити-тестирование;
- 4) создание графического дизайна пользовательского интерфейса;
- 5) прототипирование пользовательского интерфейса.

На первом этапе производится сбор, систематизация и анализ требований к системе. Также анализируются и систематизируются возможные пользовательские системы (персонажи, актеры).

После создается информационная архитектура. Под информационной архитектурой понимается совокупность методов и приемов структурирования и организации информации. Другими словами, информационная архитектура

ра занимается принципами систематизации, навигации и оптимизации информации, что позволяет облегчить пользователю работу с данными, а именно, их поиск и обработку.

По завершению этапа создания информационной структуры обычно приступают к юзабилити-тестированию. К тестированию интерфейса привлекают как конечных пользователей, так и специалистов по функциональному тестированию ПО. Юзабилити-тестирование позволяет оценить удобство использования продукта. Информационный архитектор проводит юзабилити-тестирование и анализирует его результаты.

Далее интерфейс системы приобретает необходимый законченный вид. Часто заказчик уже имеет брэнд бук или стайл гайд; задача дизайнера – разработать такой дизайн, который бы соответствовал всем требованиям системы, удовлетворял заказчика и сочетался с задумками информационного архитектора.

Прототипирование пользовательского интерфейса. Завершающий этап разработки, который подразумевает создание законченных прототипов экранов системы. Прототипы позволяют обнаружить проблемы функционального характера будущей системы на раннем этапе и устранить их до того, как проект уйдет в разработку к программистам.

Исходя из представленных выше этапов, следует, что разработка должна вестись целой командой, состоящей из художников, программистов, архитекторов. В небольших проектах редко встречается команда, в которой есть все вышепредставленные специалисты. Также для таких проектов отсутствуют стилевые рекомендации от заказчика. Необходимым условием для интерфейса остается удобство и полнота отображения функционала.

Для того чтобы облегчить жизнь команде, выполняющей небольшой проект, предлагается генерировать прототип интерфейса. Основными входными данными для такой системы станет список функций, выполняемых будущей системой.

Чтобы сгенерировать прототип интерфейса, необходимо первоначально составить описание будущей системы. Для примера возьмем систему, которая будет генерировать прототип интерфейса. Список основных функций, которые должна выполнять система:

- 1) создать новый проект;
- 2) открыть проект;
- 3) сохранить проект;

4) ввести список основных функций;

5) сгенерировать прототип интерфейса.

При построении данного списка на первом месте указывались глаголы, которые, в свою очередь, указывали на действия. Данные действия присущи ряду стандартных виджетов. К примеру, «открыть» присущ виджету, который открывает диалоговое окно, предлагающее выбрать файл, который будет в дальнейшем открыт. «Ввести» может соответствовать сразу нескольким виджетам: текстовое поле, таблица, список.

Система, генерирующая прототип интерфейса, должна для каждой функции сопоставить виджет или предложить на выбор из набора виджетов, которые подходят для данной функции. Если система не смогла сопоставить по действию, то предлагается брать за основной признак тип данных, с которым нужно работать. Оператор системы должен выбрать из заранее подготовленных типов. Этих данных хватает, чтобы сформировать первичный прототип. Данный прототип будет иметь только набор виджетов, с которыми можно работать. Для того что бы интерфейс стал более интерактивным, каждому действию будет предложен вариант перехода и данные, которые должны отображаться в том или ином виджете. Переходы формируются с помощью соединения виджетов функциональными связями, которые заранее определены системой для каждого виджета. Эти данные помогают сформировать заглушки и логику взаимодействия с интерфейсом. После генерации с уточненными данными на выходе получается интерактивный прототип интерфейса.

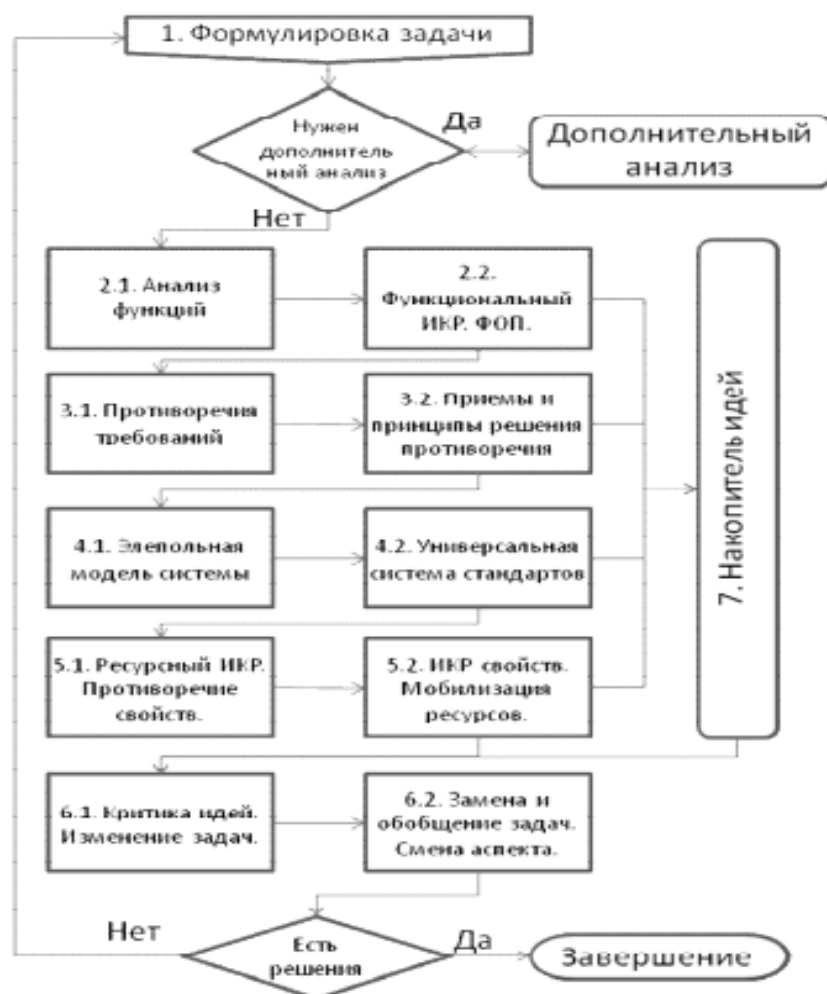
Прототип будет функциональным, но неудобным. Для того чтобы повысить удобство, над прототипом будет выполняться оптимизация, основанная на различных правилах. К примеру, чтобы виджеты создавали как можно меньше горизонтальных линий (это облегчает восприятие интерфейса), количество объектов, с которыми работает оператор, не должно превышать 7. Данные правила помогут без участия оператора оптимизировать интерфейс и сделать его более удобным. Система также будет предлагать оператору самостоятельные изменения положения виджетов. После каждого изменения система будет спрашивать, на основании чего оператор изменил те или иные параметры. Это позволит обучить систему в процессе работы и составить свои правила построения прототипа интерфейса.

Основной проблемой при генерации прототипа интерфейса является сопоставление функций и виджетов, так как одной и той же функции может соответствовать различный набор виджетов. Данные наборы виджетов создают противоречие между функциональностью и удобством. Решение противоречий – это одна из задач теории решения изобретательских задач (ТРИЗ). Революцию в этой области совершил основоположник данной теории, инженер и изобретатель из Баку Генрих Саулович Альтшуллер. В 1956 году он опубликовал совместно с Рафаэлем Борисовичем Шапиро первую статью о методике изобретательства. В статье впервые был сформулирован научный подход к изобретательской деятельности, суть которого кратко можно выразить следующим образом: техника и технологии развиваются в соответствии с объективными закономерностями, которые можно выявить, изучить и сознательно применять

для решения изобретательских задач. Для выявления таких законов развития были изучены история развития техники, огромный патентный фонд изобретений.

Инструменты ТРИЗ позволяют превратить сложные, непреступные на первый взгляд задачи во вполне доступную, поддающуюся алгоритмизации деятельность. Барьер, который стоит между задачей и ее решением и который невозможно преодолеть за один раз, оказывается вполне преодолимым за несколько последовательных шагов – более простых и выстроенных в нужном для решения задачи направлении.

Основной тезис ТРИЗ – решение изобретательских задач возможно только на основе последовательного, целенаправленного поиска при помощи методов и инструментов. Одним из таких инструментов является алгоритм решения изобретательских задач.



Блок-схема АРИЗ-Универсал-2010

Алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ) – это ключевой инструмент ТРИЗ. АРИЗ

появился как методика решения изобретательских задач уже в первых публикациях Г. С. Альт-

шуллера и Р. Б. Шапиро в 1956 году. Долгое время (до 1977 года) методика изобретательства так и называлась – АРИЗ. Только с появлением законов развития технических систем и других разработок возникло понятие ТРИЗ, а АРИЗ стал только частью этой теории. В АРИЗ входят все основные инструменты ТРИЗ, предназначенные для анализа задачи и поиска ее решения. При этом инструменты организованы в определенную систему, которая позволяет с каждым шагом уточнять суть проблемы, цели, ресурсы, возможные идеи решения.

Для решения изобретательских задач в нетехнических областях, в том числе и в области программирования, развития информационных технологий в 2010 году был разработан АРИЗ-Универсал-2010. Блок-схема АРИЗ-Универсал-2010 показана на приведенном выше рисунке.

В данной блок-схеме на шаге 2.2 учитываются две технологии:

- 1) функционально-ориентированный поиск;
- 2) функциональный закон идеального конечного результата.

Функционально-ориентированный информационный поиск – это метод поиска информации в различных хранилищах, при котором область поиска выбирается на основе сходства функций улучшаемой системы и систем (а также их компонентов), относящихся к этой области.

Идеальный конечный результат – это закон, определяющий основное направление развития системы; стремление системы к нужному результату при наименьших затратах. Примером может служить понятие идеальной программы. Это программа, в которой нет ни строчки кода, но которая выполняет заявленный функционал.

Данные технологии планируется применить при сопоставлении функций и виджетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Альтшуллер, Г. С.* Творчество как точная наука / Г. С. Альтшуллер. – 2-е изд. – Петрозаводск : Скандинавия, 2004. – С. 208.
2. Автоматизация поискового конструирования: искусственный интеллект в машинном проектировании / А. М. Дворянkin [и др.] ; под ред. А. И. Половинкина. – М., 1981. – 344 с.
3. Матрица идей [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа : <http://www.artlebedev.ru/tools/matrix/>
4. Методы поиска идей и создания инноваций [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа : <http://www.inventech.ru/pub/methods/>
5. *Рубин, М. С.* Основы ТРИЗ в инновации / М. С. Рубин, В. И. Княев. – М.: Радио и связь, 2012. – 278 с.
6. Программа Creativity Machine выдумывает, изобретает и совершает открытия [Электронный ресурс]. – 2004. – Режим доступа : <http://www.membrana.ru/articles/inventions/2004/01/26/212000.html>
7. Свето-звуковая стимуляция [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа : <http://www.medsport.spb.ru/>
8. The Director Bureau Special Projects [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа : <http://www.tdbspecialprojects.com/>

УДК 004.89

Г. А. Карачунова, С. А. Фоменков, Е. А. Гопта, Д. М. Коробкин

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СИНТЕЗА ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ДЕЙСТВИЯ «САПФИТ 2»*

Волгоградский государственный технический университет

kar_gal@mail.ru, saf@vstu.ru

В статье представлена новая версия автоматизированной системы синтеза физических принципов действия. Дан сравнительный анализ двух систем: «САПФИТ» и «САПФИТ 2». Показаны преимущества системы «САПФИТ 2».

Ключевые слова: физический эффект, физический принцип действия, информационное обеспечение, база физических знаний, вектор смежности, ориентированный сетевой граф, система, программное обеспечение.

G. A. Karachunova, S. A. Fomenkov, E. A. Gupta, D. M. Korobkin

AUTOMATED SYNTHESIS OF PHYSICAL OPERATING PRINCIPLES OF ACTION, SAPFIT 2»

Volgograd State Technical University

The article presents a new version of the automated system of synthesis of physical operating principles of action. Comparative analysis of two systems: «SAPFIT» and «SAPFIT 2». Advantages of the system «SAPFIT 2».

Keywords: physical effect, a physical principle, information management, database of physical knowledge, vector adjacency oriented network graph, system, software.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-01-00302).

В настоящее время одной из важнейших задач является интенсификация создания новых высокоэффективных технических систем (ТС).

Сроки от начала разработки до серийного выпуска, сумма затрат на переход к новой модели, функциональные и экономические характеристики, ряд других важнейших показателей жизнеспособности ТС во многом определяются результатами, достигнутыми на начальных этапах проектирования, когда принимаются основополагающие решения о принципе действия и структуре объекта проектирования.

Автоматизированные системы, оперирующие структурированными физическими знаниями в форме физических эффектов (ФЭ), позволяют формировать и выбирать физический принцип действия (ФПД) разрабатываемой ТС. Успешное решение задачи выбора ФПД дает больший экономический эффект, вызывает более заметный экономический прогресс и обеспечивает разработку изделия с большим сроком старения по сравнению с результатами, полученными на этапах выбора технического решения или параметров ТС. Система синтеза ФПД предназначена для обеспечения проектировщиков информацией при разработке технического задания (ТЗ) и технического предложения по проектируемому объекту, когда необходимо определить физические возможности реализации ТЗ, рациональные ФПД, провести инженерное прогнозирование и определить перспективные направления исследований и разработок.

Система «САПФИТ» и ее модификация – система «САПФИТ 2», разработанные на кафедре САПР и ПК ВолгГТУ, осуществляют синтез физических принципов действия изделий и технологий в виде цепочки последовательно совместимых ФЭ (задача качественного синтеза ФПД) и выдачу пользователю фактографической информации о ФЭ, входящих в синтезируемые структуры. Основным элементом систем является физический эффект (ФЭ), структура которого и определяет модель ФПД [1–4].

Информационным обеспечением систем является централизованная база физических знаний в форме физических эффектов (ФЭ), включающая фонд ФЭ, словари, справки по различным разделам физических знаний.

Фонд содержит свыше 1000 единиц описаний ФЭ из различных разделов физики: электромагнетизма, оптики, акустики, термодинамики, механики, физики твердого тела, физики жидких кристаллов, физики плазмы, суперион-

ных проводников, сверхпроводимости (низкой и высокотемпературной) и из смежных с физической дисциплин: физхимии, электрохимии, металлостроения, техники СВЧ и СВЧ и т. п.) и постоянно пополняется [5–8]. В системе «САПФИТ 2» база данных ФЭ пополнилась новыми наноэффектами, позволяющими решать задачи в области нанотехнологий.

Основные отличия этих систем состоят в следующем:

1) математическая постановка задачи синтеза ФПД в системе «САПФИТ» реализуется следующим образом: первоначально строится ориентированный граф связей, в узлах которого находятся номера воздействий согласно списку наименований (см. таблицу), на дугах расположены ФЭ, для которых эти воздействия являются соответственно входом и выходом.

Список наименований воздействий

Порядковый номер воздействия	Наименование воздействия
1	Электрическое поле
2	Магнитное поле
3	Гравитационное поле
4	Силовое (механическое) воздействие
5	Поток вещества
6	Поток тепла
7	Поток микрочастиц
8	Упругие (акустические) волны
9	Электромагнитное излучение
10	Электрический ток
11	Изменение параметров
12	Электронные плазменные волны
13	Плазменные ионно-звуковые волны

Полученный граф хранится в базе данных и перестраивается только при редактировании или вводе нового эффекта. Далее программа синтеза осуществляет построение линейных цепочек ФПД по полученному графу методом «поиск в глубину». Полученное множество линейных цепочек ФЭ без анализа совместимости содержит много противоречивых и заведомо ошибочных ФПД. Поэтому далее совместимость ФЭ проверяется пользователем при просмотре каждой из полученных цепочек нажатием специальной клавиши «V» (рис. 1).

При этом учитывается только совместимость выхода со входом соседних ФЭ по качествен-

ным характеристикам воздействий (1–10, 12, 13) или по разделу физики и наименованию физической величины для 11 воздействия: изменение

параметров. Таким образом, ошибочные ФПД, которые не удовлетворяют условиям совместимости, должен учитывать сам пользователь.

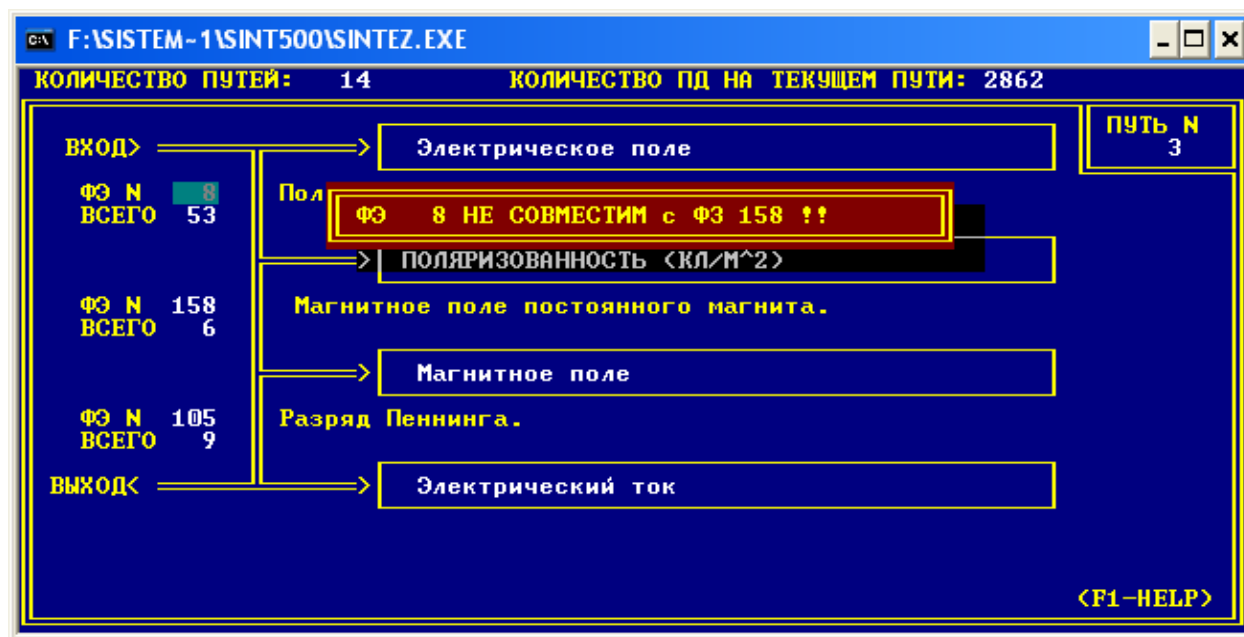


Рис. 1. Проверка совместимости ФЭ в полученной линейной структуре ФПД в системе «САПФИТ»

В системе «САПФИТ 2» математическая постановка реализуется следующими алгоритмами: алгоритм анализа совместимости ФЭ и построения ориентированного графа и алгоритм синтеза ФПД. Первоначально строится матрица смежности, содержащая для каждого ФЭ базы данных эффекты, совместимые с ним, согласно расширенным условиям совместимости [9, 10], учитывающим совместимость соседних ФЭ как по входу, выходу, так и по объекту. Полученная матрица хранится в базе данных и перестраивается только при редактировании или вводе нового эффекта. Далее строится ориентированный граф, в узлах которого находятся только те ФЭ, между которыми выполняются условия совместимости. Программа синтеза осуществляет построение линейных цепочек ФПД по полученному графу методом «поиск в глубину».

Введение расширенных условий совместимости ФЭ по объекту в системе «САПФИТ 2» и программная реализация анализа совместимости до выполнения программы синтеза позволяют качественно уменьшить получаемое на выходе автоматизированной системы множество структур синтезируемых ФПД путем исключения физически противоречивых и заведомо ошибочных структур. Кроме того, в этом случае

можно проследить физические процессы, протекающие внутри объекта, и изменения его состояний на каждом этапе синтеза ФПД. Тем самым, сокращается время проектировщика на анализ полученных ФПД и исключается формирование ряда нереализуемых ФПД, что уменьшает число нереализуемых технических систем;

2) программное обеспечение систем включает следующие модули интерактивного взаимодействия с пользователем:

- формирование запроса на синтез;
- вывод и анализ результатов синтеза.

В системе «САПФИТ 2» добавлен еще один модуль: сохранение и восстановление сеансов работы с системой.

В режиме запроса пользователь формирует задание на синтез ФПД, которое на этом этапе содержит поисковые образы (индексы) компонент: входное воздействие (вход), выходное воздействие (выход) и длину цепочки. Индексы входа и выхода формируются в диалоге просмотра тезаурусов воздействий [1].

В системе «САПФИТ 2» задание на синтез расширено. Дополнительно указываются следующие ограничения с целью повышения точности (адекватности решаемой задаче):

- множества обязательных и запрещенных к применению ФЭ;

- множества обязательных и запрещенных к применению воздействий;
- множества обязательных и запрещенных к применению объектов.

В системе «САПФИТ» согласно заданию ав-

томатически производится синтез линейных структур ФПД, выводятся варианты линейных структур ФПД и по желанию пользователя может быть выведена фактографическая информация по любому ФЭ, входящему в ФПД (рис. 2).

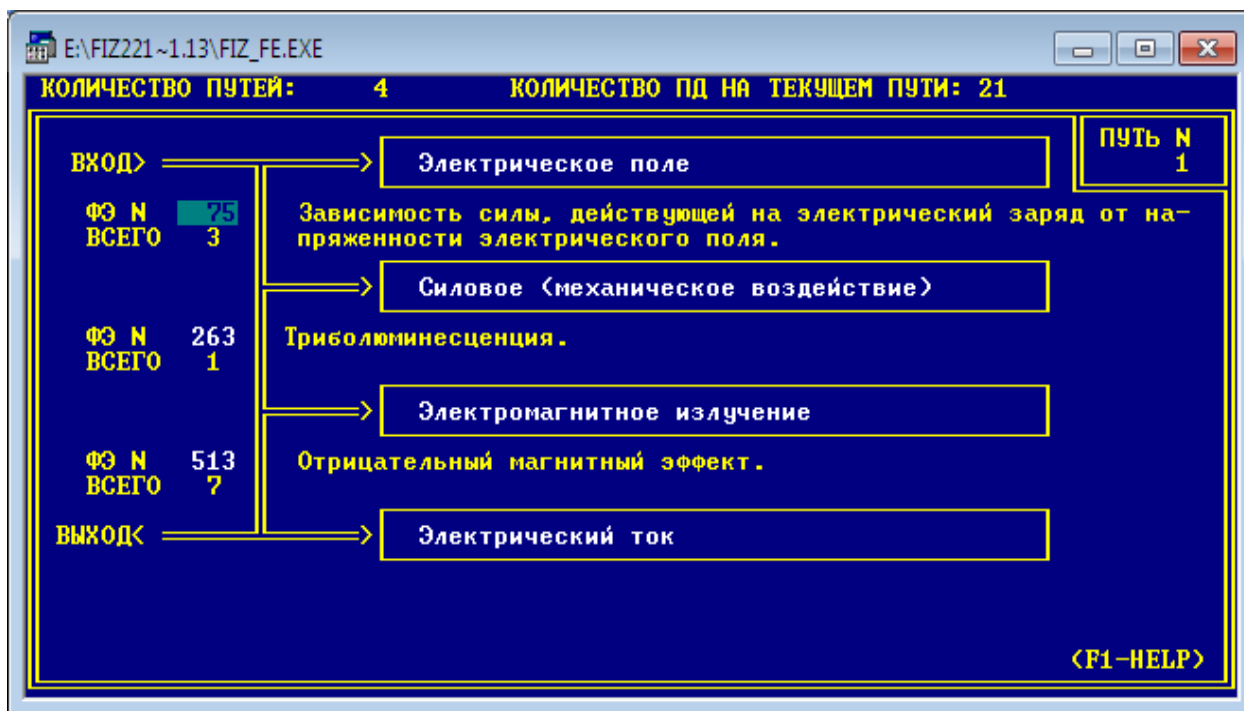


Рис. 2. Вариант линейной структуры ФПД в системе «САПФИТ»

В системе «САПФИТ 2» результат синтеза выдается на экран модулем вывода и анализа

результатов синтеза в соответствии с макетом экрана, представленном на рис. 3.

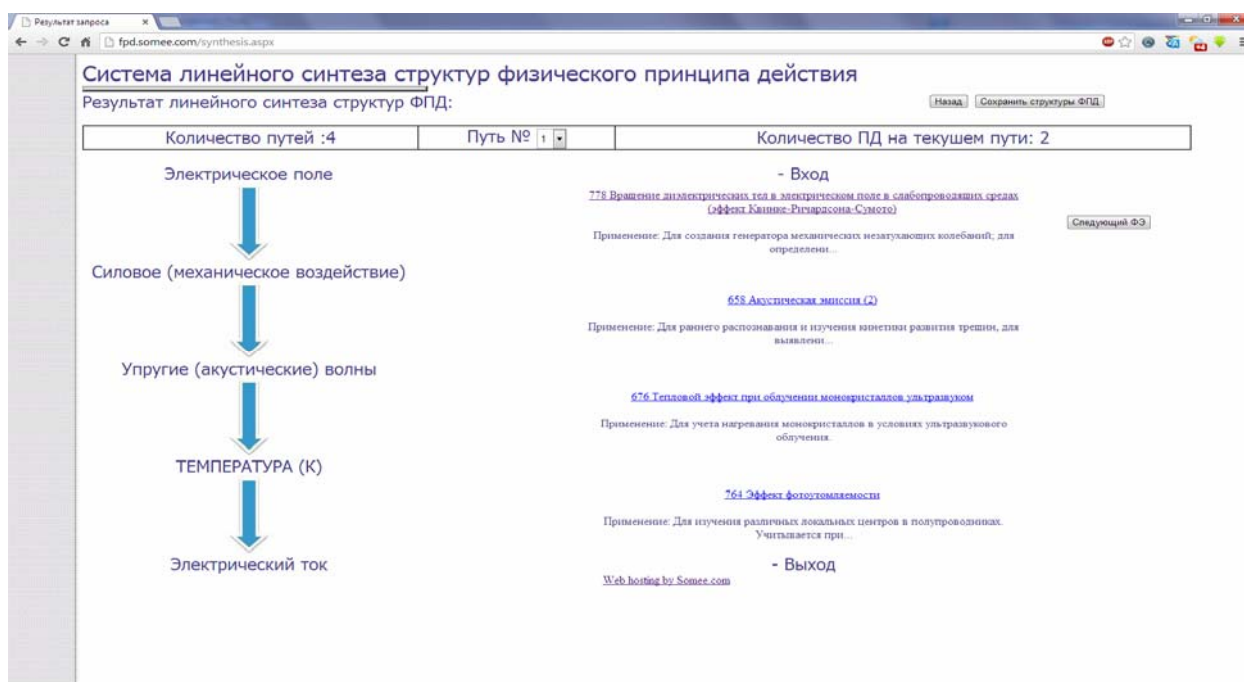


Рис. 3. Результат работы автоматизированной системы «САПФИТ 2»

Результат работы системы «САПФИТ 2» представляет собой свернутое дерево решений (множество цепочек с общим началом – заданием на вход ФПД), в котором в каждый момент времени представлено одно из решений. Здесь каждый уровень соответствует ФЭ, который может быть использован в соответствующем месте ФПД. Для текущего решения на каждом уровне выводится список допустимых ФЭ на данном уровне ФПД. С выбором другого ФЭ на уровне нижняя (относительно данного уровня) часть таблицы перестраивается для отображения допустимых вариантов для выбранной новой ветви дерева.

В случае невозможности построения цепочек ФЭ, соответствующих заданию на синтез ФПД, выдается сообщение о необходимости корректировки задания. Для реализации такого анализа осуществляется сохранение результатов, а именно дерева решений, в базе данных в соответствующем файле;

3) система «САПФИТ» реализована в операционной системе – DOC, СУБД – dBASE, с использованием языка линейного программирования Clipper. Система «САПФИТ 2» реализована в операционной системе Microsoft Windows, СУБД – Access, с использованием языка Visual Basic, сочетающего в себе процедуры и элементы объектно-ориентированных и компонентно-ориентированных языков программирования. Кроме того, среда разработки Visual Basic включает инструменты для визуального конструирования пользовательского интерфейса. Поэтому интерфейс пользователя во второй системе гибкий и отвечает всем требованиям, предъявляемым к автоматизированным системам последнего поколения. Помимо этого, в системе «САПФИТ 2» фактографическая информация каждого эффекта в базе данных расширена путем включения графической информации, что отсутствует в первой системе;

4) «САПФИТ» используется локально на одном компьютере пользователя. «САПФИТ 2» может быть использована в сети Интернет, что значительно увеличивает число пользователей программы, а также сокращает время, необходимое для развертывания нового рабочего места.

Автоматизированный синтез ФПД, реализованный системой «САПФИТ 2» формирует физическую основу функционирования технических объектов. Применение этой системы целесообразно для классов технических объектов, имеющих следующие особенности:

а) в данном классе используется широкий набор ФЭ;

б) в данном классе имеется тенденция расширения множества используемых ФЭ и потребность в переходе на новые ФПД, поскольку существующие ФПД либо себя исчерпали, либо не удовлетворяют новым требованиям;

в) в данном классе приходится часто решать задачи, связанные с выбором и анализом ФПД;

г) предпочтение отдается классам технических систем, реализующих «технологические линии» (преобразования и обработки веществ, энергии, информационных сигналов), в которых преимущественно последовательно используются различные ФЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменков, С. А.* Моделирование и автоматизированное использование структурированных физических знаний / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 278 с.
2. *Камаев, В. А.* Архитектура автоматизированной системы концептуального проектирования СОФИ / В. А. Камаев, С. А. Фоменков, А. В. Петрухин, Д. А. Давыдов // Программные продукты и системы. – 1999. – № 2. – С. 30–34.
3. *Фоменков, С. А.* Автоматизированный информационный поиск физических эффектов / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 7. – С. 30–34.
4. *Фоменков, С. А.* Представление физических знаний в автоматизированном банке физических эффектов / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Известия вузов. Машиностроение. – 1998. – № 1–3. – С. 55–61.
5. *Фоменков, С. А.* Информационное наполнение баз данных по физическим эффектам / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 6. – С. 60–62.
6. *Фоменков С. А., Колесников С. Г., Коробкин Д. М.* Формирование и структура баз данных по физическим эффектам // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2013, т. 18, № 22(125), с. 153–157.
7. *Фоменков С. А., Колесников С. Г., Коробкин Д. М.* Методика модификации информационного обеспечения базы данных физических эффектов // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2012, т. 10, № 14, с. 166–170.
8. *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.
9. *Карачунова Г. А., Фоменков С. А., Колесников С. Г.* Модификация условий совместимости физических эффектов для задачи построения физического принципа действия // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2013, т. 17, № 14(117), с. 113–117.
10. *Гонта, Е. А.* Использование свойств объекта в условиях совместимости физических эффектов / Е. А. Гонта, С. А. Фоменков, Г. А. Карачунова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – № 2(116). – С. 22–26.

ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.021

А. Е. Андреев, А. А. Красников, С. А. Коржова

ПРИМЕНЕНИЕ OPENCL ДЛЯ ШИФРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ КВАТЕРНИОНОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Волгоградский государственный технический университет

andan2005@yandex.ru, realistic@yandex.ru, liberima@gmail.com

В статье рассматривается реализация кватернионной схемы шифрования изображений (алгоритм HW-QES) на неоднородных вычислительных системах при помощи технологии OpenCL. Сравнение полученных результатов производилось как с однопоточной, так и с многопоточной реализацией алгоритма на C++ с использованием OpenMP. Тестирование производилось на процессоре Intel Core i5 2500k (4.0 GHz, RAM: 8 GB), графическом ускорителе NVidia TESLA K20, а также на плате DE5-NET с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) Altera Stratix V и поддержкой OpenCL. Время шифрования на DE5-NET и графическом ускорителе сократилось в среднем в 30 раз по сравнению с шифрованием на одном ядре процессора, при этом реализация на ПЛИС более энергоэффективна.

Ключевые слова: кватернион, схема шифрования, OpenCL, ПЛИС, DE5-NET.

A. E. Andreev, A. A. Krasnikov, S. A. Korzhova

OPENCL'S USAGE FOR IMAGES' ENCRYPTION WITH QUATERNIONS IN HETEROGENEOUS COMPUTING SYSTEMS

Volgograd State Technical University

This article observes implementation of an quaternion encryption scheme (HW-QES algorithm) in heterogeneous computing systems using OpenCL technology. The comparison was performed with the C++ single-threaded and multi-threaded implementation using OpenMP. Testing was performed on the CPU Intel Core i5 2500k (4.0 GHz, RAM: 8 GB), GPU NVidia GeForce GTX 780, and DE5-NET board with Altera Stratix V FPGA and OpenCL support. As a result, algorithm execution time on FPGA and GPU is 30 times less in general than on 1 core of CPU. FPGA implementation is more effective from the power consumption point of view.

Keywords: quaternion, encryption scheme, OpenCL, FPGA, DE5-NET.

Введение

Достижение определенного потолка в наращивании тактовой частоты работы процессоров стимулировало более широкое внедрение многопроцессорных и многоядерных технологий, что привело по утверждению многих аналитиков к «параллельной революции», начиная примерно с середины 2000 годов. Изменения в архитектуре центральных процессоров подтолкнули разработки в области использования графических ускорителей (ГПУ) для неграфических вычислений (GPGPU), а успех ГПУ, особенно интерфейса программирования CUDA от компании NVidia, в свою очередь, способствовал поиску способов эффективного применения программистами других типов ускорителей. Ведь довольно быстро выявились недостатки систем массивного параллелизма на базе

ядер ЦПУ и ГПУ – прежде всего, это недостаточная эффективность на многих классах задач и чрезвычайно высокое энергопотребление и выделение тепла. В результате в последние годы появились две многообещающие архитектуры ускорителей – Intel MIC и ускорители на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Справедливости ради нужно отметить, что платы расширения настольных ПЭВМ, оснащенные ПЛИС, появились уже давно, но только с ростом степени интеграции и частоты ПЛИС, а также с появлением скоростных интерфейсов PCI-E эти устройства стало возможным рассматривать в качестве ускорителей.

Многообразие доступных вычислительных архитектур, с одной стороны, и сложность реальных задач, для решения которых все чаще привлекаются параллельные архитектуры, с дру-

гой, способствовали увеличению интереса разработчиков к так называемым неоднородным вычислительным системам, в которых сочетаются ресурсы многоядерных центральных процессоров и ускорителей различных архитектур (ГПУ, MIC, FPGA, DSP).

Но использование неоднородных архитектур наряду с высоким потенциалом приносит и дополнительные проблемы, в частности, связанные со сложностью и неоднородностью используемых технологий, практик программирования, временем их изучения, совместимостью друг с другом, необходимостью распределять между ними части общей работы.

Особняком в ряду различных архитектур сопроцессоров стоят реконфигурируемые системы на базе ПЛИС (FPGA). Их преимущество, прежде всего, состоит в возможности строить схемные реализации под конкретный алгоритм (за счет программируемой схемы соединений, конкретная конфигурация которой хранится во внутренней памяти ПЛИС). Несмотря на более низкую по сравнению с ЦПУ и ГПУ тактовую частоту и степень интеграции, такие устройства позволяют добиваться потенциально значительного ускорения за счет максимальной специализации, распараллеливания, а также – эффективной конвейеризации вычислений в соответствии с заданным алгоритмом. Одновременно разработка решений под такие устройства много лет является камнем преткновения для большинства программистов. Проблема – в отсутствии удобной и эффективной программной технологии создания специализированных схемных решений для ПЛИС. Аналогичная (но более простая) ситуация сложилась на начальном этапе использования ГПУ до появления экосистемы CUDA (а затем – OpenCL). В случае ПЛИС речь идет о более глубоком противоречии между низкой эффективностью схем, генерируемых по высокоуровневым описаниям алгоритмов на языках высокого уровня (обычно это язык C), рассчитанных исторически на архитектуру фон-Неймана, или, в крайнем случае – на модель многопоточных вычислений, и – сложностью освоения традиционными программистами эффективных низкоуровневых инструментов описания схем на языках описания аппаратуры (HDL).

Это противоречие отчасти пытаются преодолеть современные средства высокоуровневого проектирования для FPGA (HLS [1, 2]). К ряду наиболее интересных средств такого рода

относится Altera OpenCL SDK – инструмент для генерации эффективных решений для ряда сопроцессоров на базе ПЛИС Altera, использующий новый, но при этом достаточно популярный стандарт для программирования неоднородных систем OpenCL, уже зарекомендовавший себя для ГПУ различных производителей (в отличие от CUDA, ориентированной только на ГПУ NVidia). Использование OpenCL имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в поддержке его (по крайней мере – заявленной) всеми основными вычислительными архитектурами, а теперь – еще и ПЛИС. В результате можно использовать по сути один и тот же код для различных подсистем неоднородной системы.

В данной работе показано применение OpenCL для оценки эффективности реализации схем шифрования, построенных на базе алгоритма HW-QES (использующего специальное представление гиперкомплексных чисел – кватернионов [3, 4]), на неоднородной системе, которая может строиться как на базе ГПУ, так и на базе FPGA и их комбинации.

Технология Altera OpenCL SDK

С началом многоядерной эры в компьютерных технологиях появилось большое количество разнообразных стандартов. Отсутствие переносимого стандарта являлось камнем преткновения многие годы. Летом 2008 года компания Apple предложила OpenCL (Open Computing Language) в попытке создания кроссплатформенного стандарта параллельного программирования. Данный стандарт позволяет реализовывать параллельные алгоритмы, которые могут быть перенесены на любую платформу с минимальными изменениями в коде. OpenCL основан на языке программирования C и содержит расширения, которые позволяют определить параллельные и последовательные блоки, а также задавать код, размещаемый в ускорителе, управлять передачей данных между ускорителем и основной машиной (хостом) [5].

До недавнего времени основной сферой применения OpenCL являлась разработка переносимых решений для ГПУ различных архитектур (а с учетом тяготения NVidia к своему API CUDA – в основном для ГПУ компании AMD).

В конце 2012 года компания Altera впервые представила возможность описывать алгоритмы для ПЛИС на более высоком уровне по сравнению с HDL с помощью OpenCL [6].

Компания разработала компилятор АОС, который позволяет не только генерировать достаточно эффективные схемы для прошивки в ПЛИС, но и, что немаловажно, автоматически (под управлением программиста) генерирует необходимую обвязку для этих схем и подключает все необходимое системное программное обеспечение для взаимодействия с приложением, работающим на хосте. Это дает возможность программисту сосредоточиться на самой задаче, а не на огромном количестве системных вопросов.

Картина несколько осложняется необходимостью оптимизировать код ядра с учетом предстоящей реализации на ПЛИС, учитывать различные нюансы и тонкости технологии. Кроме того, можно отметить некоторое несовершенство первой версии продукта (например, создание прошивок требует от 2–3 часов до суток), высокие системные требования к оборудованию, на котором ведется разработка, а так-

же небольшое количество ускорителей, которые пока поддерживают данную технологию. Одним из таких устройств является плата DE5-NET компании Terasic.

DE5-NET

DE5-NET – отладочный набор компании Terasic на базе ПЛИС Altera семейства Stratix-VGX, обеспечивающий идеальное аппаратное решение для приложений, требующих высокую емкость и полосу пропускания интерфейсов памяти, сверхнизкую задержку связи и энергоэффективность [7].

ПЛИС Stratix V GX включает интегрированные трансиверы с максимальной скоростью передачи 12,5 Гб/с, позволяя плате DE5-NET быть полностью совместимой со стандартом PCI Express версии 3.0 и осуществлять прямое соединение с четырьмя внешними 10 Гбит модулями SFP+.

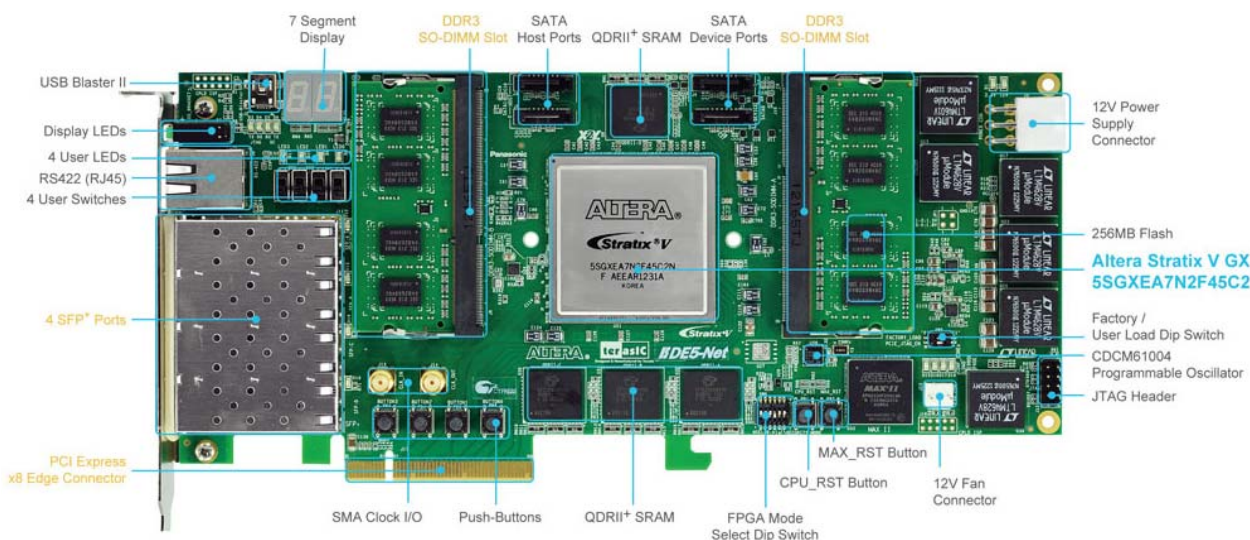


Рис. 1. Плата DE5-NET с ПЛИС Altera Stratix V и поддержкой Altera OpenCL SDK

Данное устройство может выступать не только средством прототипирования высокоскоростных сетевых решений, но и являться реконфигурируемым ускорителем в составе неоднородной вычислительной системы. Помимо оснащения мощной ПЛИС устройство поддерживает технологию Altera OpenCL SDK, что делает его также отличным испытательным стендом для этой новой технологии, приближающей ПЛИС-ускорители к широкому кругу программистов. Устройство и набор необходимого программного обеспечения приобретены ВолгГТУ в рамках участия в Университетской программе Altera.

Схема шифрования изображений на основе кватернионов

Алгоритмы, изначально ориентированные на аппаратную реализацию, являются первыми кандидатами для переноса на реконфигурируемые системы. Но зачастую проверка эффективности их реализации на данной платформе тормозится сложностью получения схемного решения средствами HDL. Возможность использовать OpenCL позволяет сократить время прототипирования. В данной работе оценивается эффективность реализации аппаратно-ориентированной схемы шифрования на базе кватернионов HW-QES, описанной в [3, 4].

В основе данной схемы шифрования изображений лежит кватернион. Кватернион представляет собой гиперкомплексное число вида:

$$q = w + xi + yj + zk, \quad (1)$$

где w, x, y, z – вещественные числа; i, j, k – мнимые единицы со следующим свойством:

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1. \quad (2)$$

Матрицей поворота (или матрицей направляющих косинусов) называется ортогональная матрица, которая используется для выполнения собственного ортогонального преобразования в евклидовом пространстве. При умножении любого вектора на матрицу поворота длина вектора сохраняется. Определитель матрицы поворота равен единице.

Для любого кватерниона имеется своя матрица поворота, представленная в виде:

$$\Gamma(d) = \frac{1}{|d|^2} \begin{bmatrix} (2^m + 1)^2 + 2^{2m-2i} - 2^{m+1-2i} - 2^{-2i} & \alpha\beta 2^{3(m+1)/2-2i} + \gamma(2^{m-i+1} + 2^{-i+1}) & \alpha\gamma 2^{m-2i+1} - \beta(2^m + 1)2^{(m+3)/2-i} \\ \alpha\beta 2^{3(m+1)/2-2i} - \gamma(2^{m-i+1} + 2^{-i+1}) & (2^m + 1)^2 - 2^{2m-2i} + 2^{m+1-2i} - 2^{-2i} & \beta\gamma 2^{(m+3)/2-2i} + \alpha 2^{-i+m+1}(2^m + 1) \\ \alpha\gamma 2^{m-2i+1} + \beta(2^m + 1)2^{(m+3)/2-i} & \beta\gamma 2^{(m+3)/2-2i} - \alpha 2^{-i+m+1}(2^m + 1) & (2^m + 1)^2 - 2^{2m-2i} - 2^{m+1-2i} + 2^{-2i} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Матрица (6) содержит суммы целых степеней двойки, $+/-1$; в результате умножение на нее выполняется проще, чем на матрицу (3).

Для выполнения одной итерации шифрования необходима следующая последовательность действий:

- 1) посчитать значения элементов матрицы при заданных параметрах;
- 2) разделить входные данные на векторы размером 3 элемента;
- 3) умножить каждый вектор на матрицу, в результате чего получим зашифрованные данные.

Количество итераций шифрования выбирается пользователем и позволяет увеличить криптостойкость зашифрованного изображения.

Для выполнения одной итерации дешифрования необходима следующая последовательность действий:

- 1) посчитать значения элементов матрицы при заданных параметрах и транспонировать ее;
- 2) разделить входные зашифрованные данные на векторы размером 3 элемента;
- 3) умножить каждый вектор на матрицу, в результате чего получим расшифрованные данные.

Количество итераций дешифрования равно количеству итераций шифрования для получения исходного изображения.

$$\Gamma(q) = \begin{pmatrix} 1-2y^2-2z^2 & 2xy-2zw & 2xz+2yw \\ 2xy+2zw & 1-2x^2-2z^2 & 2yz-2xw \\ 2xz-2yw & 2yz+2xw & 1-2x^2-2y^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для ускорения вычислений и сокращения аппаратных затрат мы можем представить параметры кватерниона в несколько другом варианте [3]:

$$w = 2^m + 1, x = \alpha * 2^{m-i}, \\ y = \beta * 2^{(m+1-2i)/2}, z = \gamma * 2^{-i}, \quad (4)$$

где $m = 2k + 1$; $k = 0, 1, 2, \dots$

$$|d|^2 = (2^m + 1)^2(1 + 2^{-2i}) \quad (5)$$

$\alpha, \beta, \gamma \in \{-1, 1\}$, $i = 0, -1, -2, \dots$

При подстановке данных значений в матрицу (3) мы получим новую матрицу (6) вида:



Рис. 2. Исходное изображение

Подробнее данный аппаратно-ориентированный алгоритм шифрования на базе кватернионов и их представления в виде (4–5) описан в [3, 4].



Рис. 3. Зашифрованное изображение

Код ядра (kernel) OpenCL (с сокращениями) шифрования (для 25 разных матриц (6)) представлен ниже :

```
__attribute__((num_compute_units(13)))
__kernel void quat(__global uchar* arrD, uchar m1x0, uchar m1x1, uchar m1x2, uchar m1x3, uchar m1x4,
uchar m1x5, uchar m1x6, uchar m1x7, uchar m1x8,
char m2x0, uchar m2x1, uchar m2x2, uchar m2x3, uchar m2x4, uchar m2x5,
// И так далее для всех элементов матрицы M
// ...
uchar m25x7, uchar m25x8)
{

    uchar matrix[25][9];
    matrix[0][0] = m1x0;
    matrix[0][1] = m1x1;
    matrix[0][2] = m1x2;
    matrix[0][3] = m1x3;
    matrix[0][4] = m1x4;
    matrix[0][5] = m1x5;
    matrix[0][6] = m1x6;
    matrix[0][7] = m1x7;
    matrix[0][8] = m1x8;
// И так далее для всего массива matrix
// ...
    int iGID = 3*get_global_id(0);

    uchar buf1[3];
    uchar buf2[3];

    buf2[0] = arrInp[iGID];
    buf2[1] = arrInp[iGID + 1];
    buf2[2] = arrInp[iGID + 2];
    #pragma unroll 25
    for(int i = 0; i < 25; i++)
    {
        buf1[0] = matrix[i][0] * buf2[0] + matrix[i][1] * buf2[1] +
            matrix[i][2] * buf2[2];
        buf1[1] = matrix[i][3] * buf2[0] + matrix[i][4] * buf2[1] +
            matrix[i][5] * buf2[2];
        buf1[2] = matrix[i][6] * buf2[0] + matrix[i][7] * buf2[1] +
            matrix[i][8] * buf2[2];
        buf2[0] = buf1[0];
        buf2[1] = buf1[1];
        buf2[2] = buf1[2];
    }
    arrD[iGID] = buf1[0];
    arrD[iGID+1] = buf1[1];
    arrD[iGID+2] = buf1[2];
}
```

В таблице и на рис. 4 представлены результаты сравнения времени выполнения 25 итераций шифрования, реализованных с помощью C++, OpenMP (на ЦПУ Intel Core i5), OpenCL (на ГПУ TESLA K20 и ПЛИС-ускорителе DE5).

Сравнение времени шифрования

Объем шифруемых данных, МБ	1 ядро ЦПУ, мс	4 ядра ЦПУ, мс	XeonPhi, мс	ГПУ Tesla K20, мс	DE5-NET, мс
4	538	124	1022	19	16
8	1079	238	1203	26	33
16	2122	458	1507	38	65
32	4102	901	2206	59	127
64	8066	1788	3152	111	242
128	15966	3501	4020	202	499
256	31102	6822	6290	1692	971
512	60966	13092	11920	2578	1924

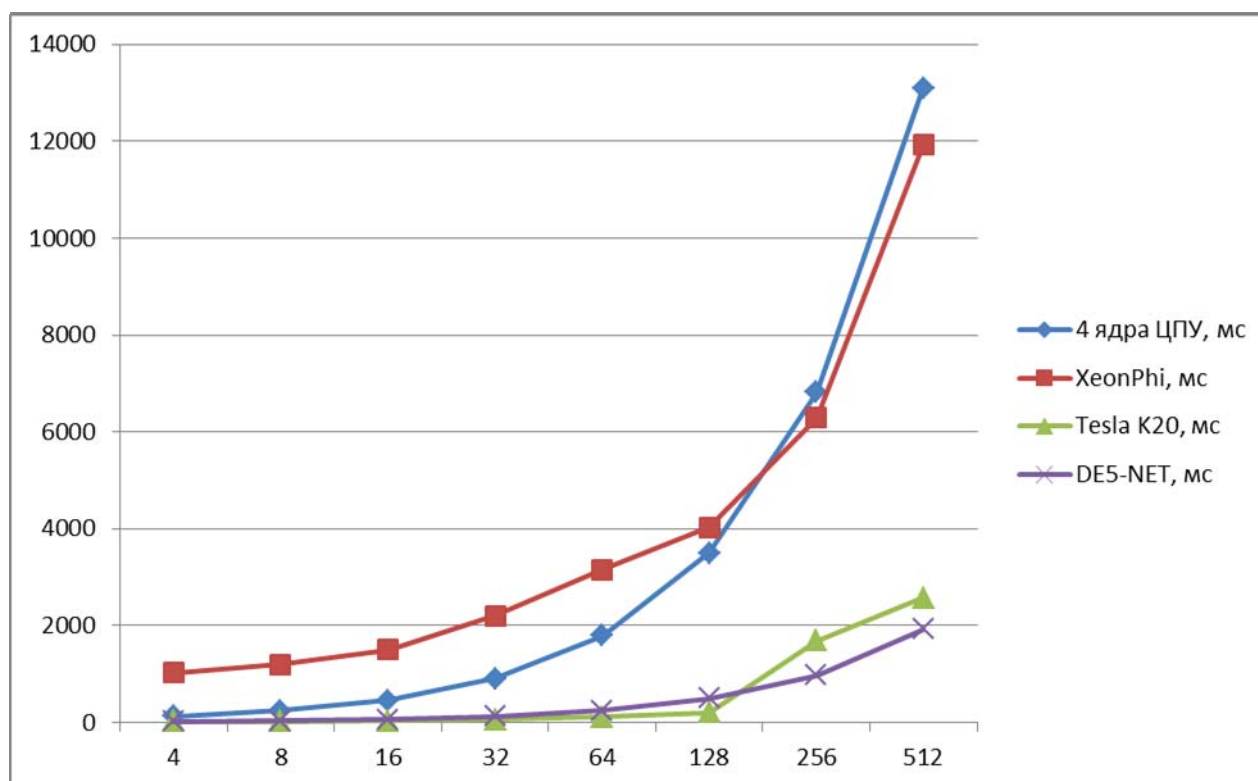


Рис. 4. Зависимость времени шифрования от объема обрабатываемых данных для разных вариантов реализации

Заключение

Как видно из приведенной выше таблицы, реализация на ГПУ от 20 до 72 раз производительнее, чем на одном ядре процессора. Реализация на ускорителе DE5-NET на базе ПЛИС в 30–32 раза производительнее, чем на одном ядре процессора. Начиная с объема шифруемых данных в 256 Мб, реализация на ПЛИС обгоняет реализацию на ГПУ в 1,3–1,7 раз, при этом потребляемая мощность для DE5-NET (90 Вт) в 2,5 раза меньше чем у TESLA K20 (225 Вт), что обеспечивает более высокую энергоэффективность. При большем числе итераций шифрования преимущество ПЛИС будет возрастать за счет эффективной конвейеризации, резерва используемых ресурсов ПЛИС и, наоборот, истощения резервов ГПУ.

тать за счет эффективной конвейеризации, резерва используемых ресурсов ПЛИС и, наоборот, истощения резервов ГПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сравнительный анализ высокоуровневых средств разработки для ПЛИС [Электронный ресурс] / А. Е. Андреев, В. А. Малолетков, М. А. Оболонин, Г. О. Фролов, Д. А. Чернояров // Современные проблемы науки и образования : электрон. науч. журнал / РАЕ. – 2013. – № 2. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/108-8748>.
2. Реализация вычислительно-интенсивных алгоритмов на гибридных системах с реконфигурируемыми сопроцессорами : монография / А. Е. Андреев, В. А. Егунов, Д. Н. Жариков, В. А. Малолетков ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – 179 с.

3. Doukhnitch, Eugeni, Alexander Chefranov, Ahmed Mahmoud (2013), «Encryption Schemes with Hyper-Complex Number Systems and Their Hardware-Oriented Implementation», DOI: 10.4018/978-1-4666-4030-6.ch005

4. Trifonov, Vladimir (2007), «Natural Geometry of Nonzero Quaternions», International Journal of Theoretical Physics, 46 (2) 251–257, doi:10.1007/s10773-006-9234-9

5. The open standard for parallel programming of heterogeneous systems [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.khronos.org/opencv/>

6. Achieve Power-Efficient Acceleration with OpenCL on Altera FPGAs [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.altera.com/products/software/opencv/opencv-index.html>

7. DE5-Net FPGA Development Kit [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&No=526>

8. Altera SDK for OpenCL Optimization Guide [Электронный ресурс]. – URL: http://www.altera.com/literature/hb/opencv-sdk/aocl_optimization_guide.pdf

УДК 004.942, 519.213, 519.872.4

С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша, С. А. Фоменков

АППРОКСИМАЦИЯ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА LPC EGEE 2004

Волгоградский государственный технический университет

gaevserge@mail.ru, alhadsha@mail.ru

В связи с массовым распространением распределенных вычислительных систем стала актуальной проблема их эффективного использования; в частности, возникает необходимость анализа обслуживания заданий конкретным кластером. В работе рассматривается вопрос выбора способа и средств аппроксимации таких стохастических параметров кластера, как время выполнения заданий, интервалы между поступлениями заданий и других, с использованием различных видов распределений.

Ключевые слова: метод моментов, метод наибольшего (максимального) правдоподобия, функция распределения, parallel workloads, rigid jobs, время выполнения заданий, имитационное моделирование, стохастическая аппроксимация.

S. V. Gaevoy, F. A. H. AL-hadsha, S. A. Fomenkov

APPROXIMATION OF JOB EXECUTION TIME DISCOVERING COMPUTING CLUSTER LPC EGEE 2004

Volgograd State Technical University

Due to wide spread of the distributed computing systems a problem of its effective usage became actual in particular the analysis of the job execution of a single cluster is necessary. In this paper the problem of a manner of stochastic approximation of cluster parameters, as job execution time, inter-arrival times etc. using different types of distributions.

Keywords: method of moments, maximum likelihood, cumulative distribution function, parallel workloads, rigid jobs, job length, simulation, stochastic approximation.

Введение

В рамках работ по моделированию Грид-систем [1–3] необходимо проводить аппроксимацию стохастических параметров кластера, таких как время выполнения заданий, интервалы между поступлениями заданий и т. д.

В данной работе рассматривается вопрос выбора способа и средства аппроксимации для таких случайных величин.

Аппроксимация и моделирование

1. Постановка задачи

Во многих работах делались попытки аппроксимации потоков входных заданий отдельных кластеров или групп кластеров с различной степенью точности. В данной статье ставится цель аппроксимировать время выполнения заданий вычислительного кластера различными

видами распределений, различными методами аппроксимаций и сравнить результаты.

Введем обозначения: *pdf* – плотность вероятности; *cdf* – функция распределения; *E* – математическое ожидание; *VAR* – дисперсия; *stDev* – среднеквадратичное отклонение; *cov* – коэффициент вариации; *X* – сама случайная величина. Будем обозначать эмпирическую оценку момента надчеркиванием, чтобы отличать ее от точных значений моментов [4].

2. Методы определения параметров распределения случайной величины

В данной работе будут использованы два метода определения параметров распределения случайной величины: метод наибольшего правдоподобия (иногда его еще называют методом максимального правдоподобия) и метод момен-

тов. Оба метода предполагают вид закона распределения заданным. Назовем это распределение теоретическим.

Метод моментов (ММ) предполагает определение параметров распределения по моментам, то есть параметры выбираются такими, чтобы некоторые моменты теоретического распределения совпадали с эмпирическими оценками моментов эмпирического распределения [5]. Количество используемых моментов должно быть равно количеству параметров распределения. В первую очередь используются моменты более низких порядков.

Введем оценки первого начального и второго центрального моментов, то есть математического ожидания ($E(X)$) и дисперсии ($VAR(X)$), а также оценку второго начального момента ($E(X^2)$).

Необходимые моменты можно получить по формулам [4, 5]:

$$\begin{aligned}\overline{E(X)} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i, \\ \overline{VAR(X)} &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \overline{E(X)})^2 = \\ &= \frac{N}{N-1} \left(\overline{E(X^2)} - \overline{E(X)}^2 \right), \\ \overline{E(X^2)} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2,\end{aligned}$$

где N – число наблюдений; X_i – конкретное наблюдение № i .

Недостатком этого метода, во-первых, является то, что он приравнивает именно моменты и никак не учитывает характер распределения, а во-вторых, то, что, с практической точки зрения, определение моментов выше четвертого порядка затруднено из-за присутствия в них большой доли случайности. Поэтому использовать этот метод для распределений, у которых больше четырех параметров, нельзя.

Метод наибольшего правдоподобия (МНП) лишен этих недостатков, но может требовать больших вычислительных ресурсов [5]. Функция правдоподобия имеет вид:

$$L = \prod_{j=1}^N pdf(X_j),$$

где N – число наблюдений; X_j – конкретное наблюдение № j .

В соответствии с методом необходимо проинвестировать максимизацию этой функции. Аналитическое решение в общем случае может быть затруднительно.

Функция может принимать значения очень близкие к нулю, и это может привести к серьезным проблемам из-за округления чисел в ЭВМ, поэтому максимизацию функции надо заменить максимизацией ее логарифма $\ln L$ (или минимизацией $-\ln L$). Такая замена возможна благодаря строгому возрастанию натурального логарифма во всей своей области определения. Прологарифмированную функцию можно найти по формуле

$$\ln L = \sum_{j=1}^N \ln(pdf(X_j)).$$

В качестве метода численной оптимизации возьмем метод Хука – Дживса [6]. Для аналитического решения может быть использован необходимый признак экстремума функции нескольких переменных (равенство частных производных нулю).

3. Используемые законы распределения

Исследования показывают, что время выполнения задания обычно является случайной величиной с большим коэффициентом вариации. Также очевидно, что она не может быть отрицательной. Поэтому необходимо выбирать соответствующие распределения.

В качестве законов распределения случайных величин были взяты следующие (в различных источниках встречаются различные обозначения) [1, 7]:

1) M – экспоненциальное распределение:

$$pdf(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x}, \quad cdf(x) = 1 - e^{-\lambda x},$$

$$E(X) = stDev(X) = \frac{1}{\lambda}, \quad VAR(X) = \frac{1}{\lambda^2},$$

$$cov(X) = 1, \quad X \in (0; \infty), \quad \lambda > 0$$

Для этого распределения оценки ММ и МНП совпадают и дают

$$\lambda = \frac{1}{E(X)}.$$

Решение для МНП возможно аналитически;

2) Γ – гамма-распределение:

$$pdf(x) = \lambda \cdot \frac{(\lambda x)^{v-1}}{\Gamma(v)} \cdot e^{-\lambda x},$$

$$cdf(x) = \frac{\gamma(v, \lambda x)}{\Gamma(v)} = P(v, \lambda x), \quad E(X) = \frac{v}{\lambda},$$

$$VAR(X) = \frac{v}{\lambda^2}, \quad stDev(X) = \frac{\sqrt{v}}{\lambda}, \quad cov(X) = \frac{1}{\sqrt{v}},$$

$$X \in (0; \infty), \quad v > 0, \quad \lambda > 0,$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция Эйлера [8]; $\Upsilon(x, y)$ – неполная нижняя гамма-функция [9]; $P(x, y)$ – нормированная нижняя гамма-функция [9].

Оценки ММ имеют вид

$$\lambda = \frac{E(X)}{VAR(X)}, \quad v = \lambda \cdot E(X)$$

Оценки МНП найти труднее. Из равенства частных производных логарифмической функции правдоподобия нулю следует, что

$$\begin{cases} \frac{v}{\lambda} = E(X) \\ \psi(v) = E(\ln X) + \ln \lambda \end{cases},$$

где $\psi(v)$ – дигамма-функция (производная логарифмической гамма-функции) [10]; $E(\ln X)$ – оценка среднего значения логарифма случайной величины.

Из первого уравнения системы следует, что оценка обоими методами будет иметь одно и то же матожидание. Подставив значения $\lambda = \frac{v}{E(X)}$ во второе уравнение, получим

$$\psi(v) - \ln v = E(\ln X) - \ln(E(X)).$$

Это уравнение можно решить численно. Затем, по найденному v можно определить $\lambda = \frac{v}{E(X)}$;

3) W – распределение Вейбулла;

$$pdf(x) = \alpha \lambda x^{\alpha-1} e^{-\lambda x^\alpha}, \quad cdf(x) = 1 - e^{-\lambda x^\alpha},$$

$$E(X) = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})}{\sqrt[\alpha]{\lambda}}, \quad E(X^k) = \frac{\Gamma(1 + \frac{k}{\alpha})}{\sqrt[\alpha]{\lambda^k}},$$

$$VAR(X) = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}{\sqrt[\alpha]{\lambda^2}},$$

$$stDev(X) = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}}{\sqrt[\alpha]{\lambda}},$$

$$cov(X) = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}}{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})},$$

$$X \in (0; \infty), \alpha > 0, \lambda > 0$$

Использование метода моментов возможно. Из оценок первых двух начальных моментов следует, что

$$\frac{E(X^2)}{E(X)^2} = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha})}{\Gamma^2(1 + \frac{1}{\alpha})}.$$

Решив уравнение численно методом дихотомии, можно получить α . Затем можно опреде-

$$\text{лить } \lambda = \left(\frac{\Gamma(1 + \frac{1}{\alpha})}{E(X)} \right)^\alpha.$$

Использование МНП полностью в аналитической форме затруднено. Из равенства частных производных логарифмической функции правдоподобия нулю следует, что

$$\begin{cases} 1/\lambda = E(X^\alpha), \\ 1/\alpha = \lambda E(X^\alpha \cdot \ln X) - E(\ln X). \end{cases}$$

Осуществив подстановку $\lambda = 1/E(X^\alpha)$ из пер-

вого уравнения во второе, можно получить

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{E(X^\alpha \cdot \ln X)}{E(X^\alpha)} - E(\ln X).$$

Численное решение данного уравнения дает α . После этого можно получить $\lambda = 1/E(X^\alpha)$ из первого уравнения системы;

4) LN – логнормальное распределение:

$$pdf(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}},$$

$$cdf(x) = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\ln x - m}{\sigma}\right), \quad E(X) = e^{m + \frac{\sigma^2}{2}},$$

$$VAR(X) = e^{2m + \sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1),$$

$$stDev(X) = e^{m + \frac{\sigma^2}{2}} \cdot \sqrt{e^{\sigma^2} - 1}, \quad cov(X) = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1},$$

$$X \in (0; \infty), -\infty < m < +\infty, \sigma \geq 0,$$

где $\Phi(x)$ – функция Лапласа [11].

Используя метод моментов, получаем

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{VAR(X)}{E(X)^2}\right)}, \quad m = \ln(E(X)) - \frac{\sigma^2}{2}$$

Оценки методом МНП дают

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln X_i = \overline{\ln X},$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln X_i = \overline{\ln X},$$

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln X_i - \bar{m})^2 = \frac{N}{N-1} (E(\ln^2 X) - E(\ln X)^2);$$

5) ΓW – гамма-вейбулловое распределение (название не является общепринятым):

$$pdf(x) = \alpha \lambda^v \cdot \frac{x^{\alpha v - 1}}{\Gamma(v)} \cdot e^{-\lambda x^\alpha},$$

$$cdf(x) = \frac{\gamma(v, \lambda x^\alpha)}{\Gamma(v)} = P(v, \lambda x^\alpha),$$

$$E(X^k) = \frac{\Gamma\left(v + \frac{k}{\alpha}\right)}{\sqrt[k]{\lambda^k} \Gamma(v)}, \quad X \in (0; \infty), \quad v > 0, \\ \lambda > 0, \quad \alpha > 0.$$

Очевидно, что при $v = 1$ распределение переходит в W , при $\alpha = 1$ — в Γ , а при $v = \alpha = 1$ — в M .

Оценка ММ была произведена следующим образом. Из оценок первых трех начальных моментов можно получить систему уравнений:

$$f(v, \alpha) = \left(\frac{\overline{E(X^2)}}{\overline{E(X)}^2} - \frac{\Gamma\left(v + \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma(v)}{\Gamma^2\left(v + \frac{1}{\alpha}\right)} \right)^2 + \left(\frac{\overline{E(X^3)}}{\overline{E(X)}^3} - \frac{\Gamma\left(v + \frac{3}{\alpha}\right)\Gamma^2(v)}{\Gamma^3\left(v + \frac{1}{\alpha}\right)} \right)^2$$

Этот минимум был найден с использованием метода Хука – Дживса. А затем из оценки первого начального момента было получено

$$\lambda = \left(\frac{\Gamma\left(v + \frac{1}{\alpha}\right)}{\overline{E(X)} \cdot \Gamma(v)} \right)^\alpha.$$

Для получения оценки МНП был использован необходимый признак экстремума функции нескольких переменных, что привело к системе уравнений:

После подстановки v из третьего уравнения во второе получается

$$\begin{cases} \lambda = v / \overline{E(X^\alpha)}, \\ \Psi \left(\frac{1/\alpha}{\frac{\overline{E(X^\alpha \cdot \ln X)}}{\overline{E(X^\alpha)}} - \overline{E(\ln X)}} \right) - \ln \left(\frac{1/\alpha}{\frac{\overline{E(X^\alpha \cdot \ln X)}}{\overline{E(X^\alpha)}} - \overline{E(\ln X)}} \right) = \alpha \overline{E(\ln X)} - \ln \overline{E(X^\alpha)}, \\ v = \frac{1/\alpha}{\frac{\overline{E(X^\alpha \cdot \ln X)}}{\overline{E(X^\alpha)}} - \overline{E(\ln X)}} \end{cases}$$

Теперь второе уравнение системы является уравнением с одним неизвестным. Решив его численно, можно найти α . Используя это α , можно найти v из третьего уравнения, а затем по найденным v и α можно найти λ из первого;

б) $H(n)$ – гиперэкспоненциальное распределение [5]:

$$pdf(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i e^{-\lambda_i x},$$

$$cdf(x) = 1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i e^{-\lambda_i x}, \quad E(X) = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\lambda_i},$$

$$\begin{cases} \frac{\overline{E(X^2)}}{\overline{E(X)}^2} = \frac{\Gamma\left(v + \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma(v)}{\Gamma^2\left(v + \frac{1}{\alpha}\right)}, \\ \frac{\overline{E(X^3)}}{\overline{E(X)}^3} = \frac{\Gamma\left(v + \frac{3}{\alpha}\right)\Gamma^2(v)}{\Gamma^3\left(v + \frac{1}{\alpha}\right)}. \end{cases}$$

Очевидно, что решение системы является минимумом функции

$$\begin{cases} v/\lambda = \overline{E(X^\alpha)}, \\ \Psi(v) = \alpha \overline{E(\ln X)} + \ln \lambda, \\ 1/\alpha = \lambda \overline{E(X^\alpha \cdot \ln X)} - v \overline{E(\ln X)}. \end{cases}$$

Подставив значение λ из первого уравнения во второе и третье, можно получить

$$\begin{cases} \lambda = v / \overline{E(X^\alpha)}, \\ \Psi(v) - \ln v = \alpha \overline{E(\ln X)} - \ln \overline{E(X^\alpha)}, \\ \frac{1}{\alpha v} = \frac{\overline{E(X^\alpha \cdot \ln X)}}{\overline{E(X^\alpha)}} - \overline{E(\ln X)}. \end{cases}$$

$$VAR(X) = E^2(X) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j \left(\frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{\lambda_j} \right)^2,$$

$$X \in (0; \infty), \quad \lambda_i > 0, \quad 1 \geq \alpha_i \geq 0, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1,$$

где n – число ветвей, веток распределения (задается перед аппроксимацией как часть вида распределения).

Из условия $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ следует, что одна из α_i

задается по остаточному принципу, поэтому число параметров это распределения равно

$2n-1$. Будет использовано распределение с тремя ветками, значит, необходимо определить пять параметров. ММ не применим из-за большого числа параметров, поэтому будет использован МНП с численной оптимизацией;

7) $H\Gamma(n)$ – гипергамма-распределение:

$$pdf(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \lambda_i \cdot \frac{(\lambda_i x)^{v_i-1}}{\Gamma(v_i)} \cdot e^{-\lambda_i x},$$

$$cdf(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{\gamma(v_i, \lambda_i x)}{\Gamma(v_i)} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot P(v_i, \lambda_i x),$$

$$E(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{v_i}{\lambda_i},$$

$$VAR(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \frac{v_i(v_i+1)}{\lambda_i^2} - E^2(X),$$

$$X \in (0; \infty), v_i > 0, \lambda_i > 0, 1 \geq \alpha_i \geq 0,$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1,$$

где n – число ветвей, веток распределения (задается перед аппроксимацией как часть вида распределения).

Число параметров этого распределения дается формулой $3n-1$. В данной работе будет использовано, во-первых, как и в [12–16], распределение с двумя ветками $n=2$, которое имеет $3n-1=3 \cdot 2-1=5$ параметров, и, во-вторых, распределение с тремя ветками $n=3$, которое имеет $3n-1=3 \cdot 3-1=8$ параметров.

В [12–16] использовались распределения с двумя ветками. В этой работе у каждой ветки

будут два параметра, как и в [15, 16], в то время как в [12–14] у каждой ветки был один собственный параметр и один общий на все ветки.

Очевидно, что из-за числа параметров расчет будет вестись при помощи МНП.

В [17] предоставлены логи работы реальных вычислительных систем. В логах указывается время выполнения заданий. Это всего лишь один из параметров, которые нам нужны, но здесь для примера будет аппроксимирован именно он.

В качестве примера мы будем анализировать работу кластера LPC EGEE 2004 на основе лога LPC-EGEE-2004-1.2-cln.swf. Очищенные от спорных данных логи (cln) рекомендуются сайтом для научных изысканий, поэтому в дальнейшем мы использовали именно такой.

Для получения решения методом Хука – Дживса для H и $H\Gamma$ нам пришлось сделать замену переменных λ_i через $\beta_i = \frac{1}{\lambda_i}$. В качестве

стартовых значений мы выбрали случай обычного экспоненциального распределения с равнозначными вероятностями по разным веткам, если таковые имеются. Параметр α_n всегда определялся исходя из условий нормировки: его не было в максимизируемом векторе. При запрещенных значениях параметров принималось, что $\ln L = -\infty$ ($L=0$).

На рис. 1 и 2 представлены эмпирическая функция распределения (ЭФР) и различные аппроксимации, причем аппроксимации методом моментов обозначены звездочкой. Очевидно, что ММ не дает качественной аппроксимации (рис. 1).

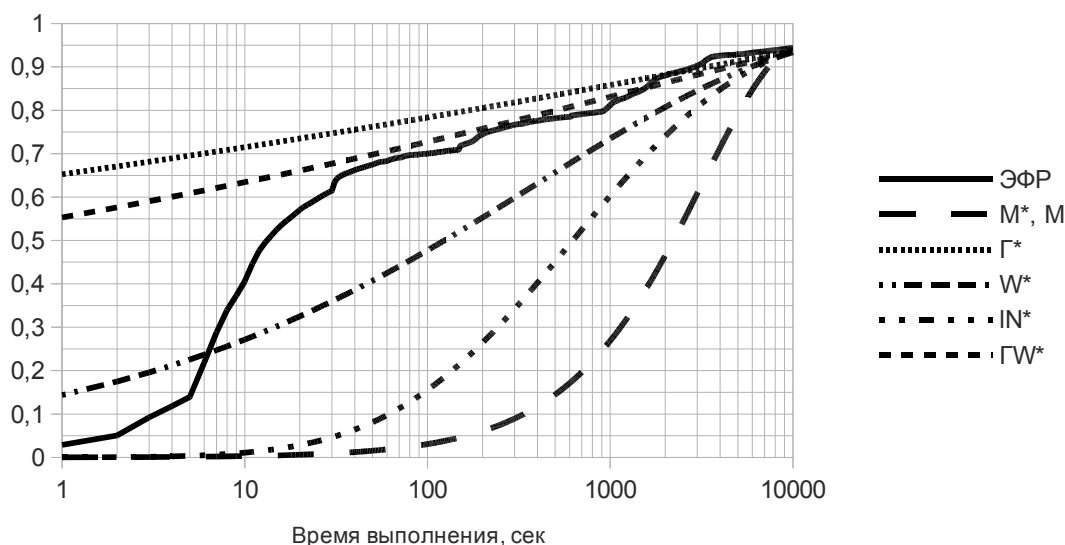


Рис. 1. Функции распределения времени выполнения задания, полученные методом моментов

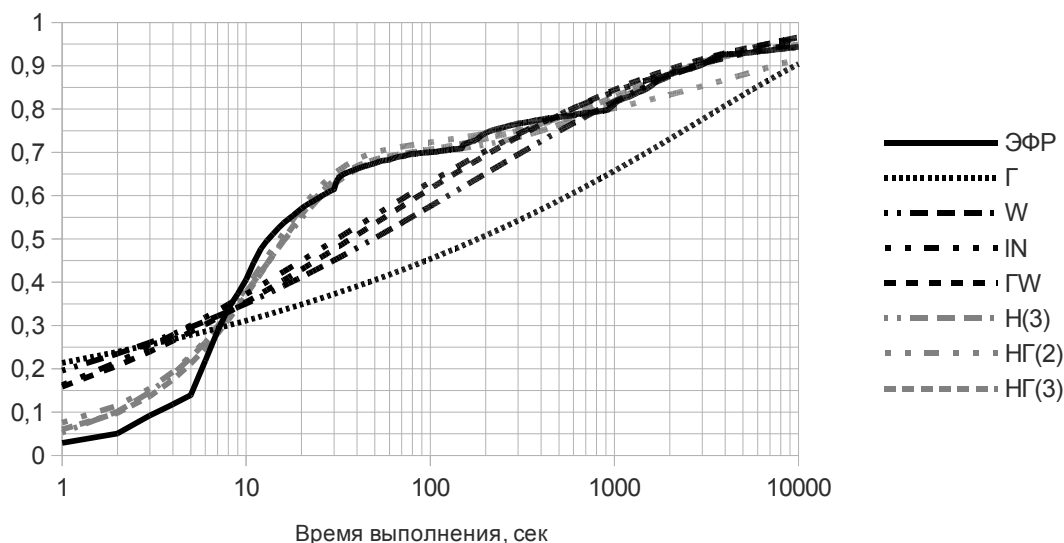


Рис. 2. Функции распределения времени выполнения задания, полученные методом наибольшего правдоподобия

Самое лучшее качество аппроксимации дают варианты $H(3)$ и $HГ(3)$, так как они совпадают с ЭФР как для малых времен, так и для больших (рис. 2). $HГ(2)$ дает третий по качеству результат: на малом интервале он совпадает с ЭФР, но в большом интервале происходит расхождение (рис. 2). Вариант $HГ(3)$ дает примерно такой же по качеству результат, что и $H(3)$. Однако $HГ(3)$ требует численной максимизации функции восьми переменных, а не пяти, поэтому является хуже $H(3)$ в плане вычислительной мощности.

Заключение

Таким образом, были рассмотрены семь распределений для аппроксимации времени выполнения заданий. Из них для конкретного примера были выделены две самые точные аппроксимации. Стоит отметить, что этот результат получен для конкретного примера: при использовании других экспериментальных данных выбор закона распределения может измениться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Имитационное моделирование грид-систем : монография / В. С. Лукьянов, А. Е. Андреев, Д. Н. Жариков, А. А. Островский, С. В. Гаевой ; ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – 215 с.
2. Имитационная модель гетерогенной вычислительной системы / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Д. С. Попов // Изв. ВолГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – № 9. – С. 85–88.
3. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010610693 от 20 янв. 2010 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель грид-системы (GridModel) / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Ю. В. Шафран ; ВолГТУ. – 2010.

4. Фарафонов, В. Г. Теория вероятностей и математическая статистика. Ч. 1 : учеб. пособие [Электронный ресурс] / В. Г. Фарафонов, Вяч. Г. Фарафонов, В. И. Устинов ; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения // Сайт Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. – 2009. – Режим доступа : http://guar.ru/guar/kaf2/tv_ms_1.pdf

5. Теория вероятностей и математическая статистика. Ч. 2 : учеб. пособие [Электронный ресурс] / В. Г. Фарафонов, Вяч. Г. Фарафонов, В. И. Устинов, Д. В. Бутенина ; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения // Сайт Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. – 2009. – Режим доступа : http://guar.ru/guar/kaf2/tv_ms_2.pdf

6. Метод Хука – Дживса [Электронный ресурс] // Википедия. – [2014]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%A5%D1%83%D0%BA%D0%B0_%E2%80%94%D0%94%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D1%81%D0%B0

7. Гаевой, С. В. Аппроксимация стохастических параметров вычислительного кластера на примере LANL CM5 / С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша // Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami – 2013 : mater. IX miedzynarod. nauk.-prakt. konf., 7–15 listopada 2013 r. Vol. 33. Matematyka. – Przemysl, 2013. – S. 67–70.

8. Gamma function [Электронный ресурс] // Wikipedia. – [2014]. – Режим доступа : http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_function

9. Incomplete gamma function [Электронный ресурс] // Wikipedia. – [2014]. – Режим доступа : http://en.wikipedia.org/wiki/Incomplete_gamma_function

10. Digamma [Электронный ресурс] // Wikipedia. – [2014]. – Режим доступа : <http://en.wikipedia.org/wiki/Digamma>

11. Значения функции Лапласа [Электронный ресурс]. – [2014]. – Режим доступа : http://www.matematika.ru/publ/teorija_verojatnosti/prilozhenie/tablica_znachenij_funkcii_laplasa/83-1-0-286

12. Joefon Jann, Pratap Pattnaik, Hubertus Franke, Fang Wang, Joseph Skovira, and Joseph Riordan, «Modeling of Workload in MPPs». In Job Scheduling Strategies for Parallel Processing, D. G. Feitelson and L. Rudolph (Eds.), Springer-Verlag, 1997, Lect. Notes Comput. Sci. vol. 1291, pp. 95–116.

13. H. Franke, J. Jann, J. E. Moreira, P. Pattnaik, and M. A. Jette, «An Evaluation of Parallel Job Scheduling for ASCI Blue-Pacific». In Supercomputing '99, Nov 1999.

14. The Jann et al 1997 Model [Электронный ресурс] // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. – [2013]. – Режим доступа : http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/m_jann97/

15. Uri Lublin and Dror G. Feitelson, The Workload on Parallel Supercomputers: Modeling the Characteristics of Rigid Jobs. J. Parallel & Distributed Comput. 63(11), pp. 1105–1122, Nov 2003.

16. Lublin, 1999 [Электронный ресурс] // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. – [2013]. – Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/models.html#lublin99>

17. Logs of Real Parallel Workloads from Production Systems [Электронный ресурс] // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. – [2013]. – Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/logs.html>

УДК 004.942

А. С. Толстов, Д. В. Пантюхов, А. Л. Гудиков

СИНТЕЗ СХЕМ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ В КОМПЛЕКСАХ ТСО ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Академия ФСО РФ, г. Орел

A.Dick2001@yandex.ru, gospamme@yandex.ru, gudikov.al@yandex.ru

В статье представлен подход к синтезу схем надежности систем с резервированием на основе алгоритмов оптимизации. Описан метод статистического моделирования схем надежности. Представленный метод позволяет определить степень требуемого резервирования элементов схемы надежности на основе использования алгоритмов оптимизации.

Ключевые слова: надежность, модель надежности, схема надежности, резервирование, безотказная работа, оптимизация, алгоритм оптимизации.

A. S. Tolstov, D. V. Pantyuhov, A. L. Gudikov

SYNTHESIS SCHEMES RELIABILITY OF SYSTEMS WITH REDUNDANCY ON BASIS OF ALGORITHMS FOR OPTIMIZATION IN COMPLEXES OF TPS PROTECTED OBJECTS

The Academy of FGS of the Russian Federation

The article presents an approach to the synthesis of circuits with the reliability of reserves based on optimization algorithms. The Article describes a method of the statistical reliability of circuit simulation. The presented method is used to determine the required redundancy circuit elements on the reliability of using optimization algorithms.

Keywords: reliability, reliability model, circuit reliability, redundancy, uptime, optimization, optimization algorithm.

При разработке, испытаниях и эксплуатации комплексов ТСО вопросам обеспечения надежности придается большое значение, что обусловлено высокой ценой отказа в процессе эксплуатации. Обеспечение более высоких требований по надежности возможно либо путем повышения уровня надежности элементов системы, либо осуществления специальных технических мер по их резервированию. Эффективность принимаемых мер оценивается путем расчета показателей надежности.

Оценка и анализ надежности сложных систем аналитическими методами, особенно если распределение времени безотказной работы элементов не подчинено экспоненциальному закону, сопряжены с определенными трудностями. Получение аналитического решения в этом случае возможно лишь для самых простых схем надежности, и поэтому для анализа

надежности систем используют методы статистического моделирования на ЭВМ.

Под моделью надежности понимается система уравнений, отображающая объект исследования с учетом особенностей формирования и реализации его надежности и способная адекватно замещать его так, что ее изучение дает исследователю необходимую информацию о надежности объекта.

Наличие такого инструмента, как модель надежности системы, может позволить специалистам по расчетам надежности формализовать решение задачи выработки рекомендаций по повышению надежности исследуемой системы. Осуществление данного подхода возможно путем разработки и использования поисковых алгоритмов параметрической (структурной) оптимизации схем надежности в смысле выбранных критериев обеспечения требований к на-

дежности системы. В настоящее время публикаций по теме разработки устойчивых и эффективных алгоритмов оптимизации моделей надежности сложных систем явно недостаточно.

В качестве примера одного из вариантов конфигурации компактной системы с резервированием, обладающей развитой структурой, позволяющей считать получаемые результаты анализа ее надежности достаточно общими, представлена система на рис. 1.

Анализ приведенной на рис. 1 схемы позволяет составить формулу для вычисления ее логического состояния (исправна-неисправна) S_{Σ} :

$$S_{\Sigma} = ((S_1 \vee S_2) \wedge S_4) \vee S_3 \vee S_6 \vee \times \times [(S_1 \vee S_2) \wedge (S_4 \vee S_5) \wedge S_7]. \quad (1)$$

где S_i – логические состояния соответствующих элементов схемы.

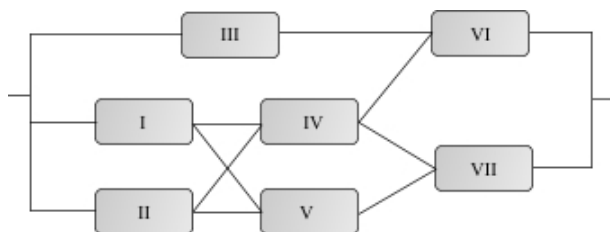


Рис. 1. Вариант схемы надежности СБЭП с резервированием

При этом в позиции схемы надежности, содержащей элемент k , на i -м шаге моделирования, соответствующем моменту времени t , может реализоваться состояние элемента S_k , означающее его отказ, если для этого элемента выполняется неравенство:

$$\xi_i(0,1) > P(t), \quad (2)$$

где ξ_i [0, 1] – выборка из совокупности равномерно распределенных на интервале [0–1] случайных чисел; $P(t)$ – вероятность исправного состояния элемента k на момент времени t .

В противном случае реализуется исправное состояние элемента. Такой способ определения состояния элементов схемы надежности в практике статистического моделирования носит название метода Монте-Карло.

Таким же образом можно задавать характеристики восстановления элементов системы на основе закона распределения времени восстановления.

Схема определения состояния системы на i -м шаге моделирования из состава модели надежности системы, соответствующая логической формуле (1), приведена на рис. 2.

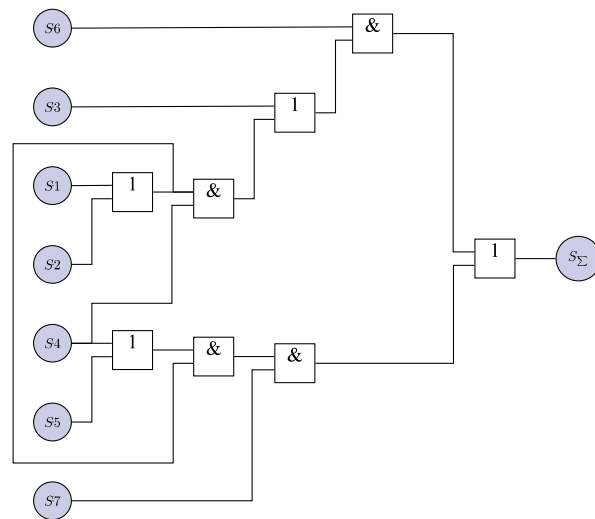


Рис. 2. Схема определения состояния системы на i -ом шаге моделирования

В соответствии с рис. 2 каждый i -й шаг моделирования начинается с определения по методу Монте-Карло (2) состояния S_k (исправно – 1, неисправно – 0) каждого элемента схемы (см. рис. 1). Далее в соответствии с (1) определяют состояние системы по правилам алгебры логики. Оценка вероятности безотказной работы $\bar{P}_i$ производится по результатам N модельных экспериментов по формуле:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_{\Sigma,j}. \quad (3)$$

Для приведенной на рис. 1 системы аналитическое выражение для определения вероятности безотказной работы системы имеет вид:

$$P(t) = P_{1,3}(t) \cdot P_{1,6}(t) + (P_{1,1}(t) + P_{1,2}(t) - P_{1,1}(t) \cdot P_{1,2}(t)) \cdot [P_{1,4}(t) \cdot ((1 - P_{1,3}(t)) \cdot P_{1,6}(t) + (1 - P_{1,6}(t)) \cdot P_{1,7}(t)) + (1 - P_{1,3}(t) \cdot P_{1,6}(t)) \cdot (1 - P_{1,4}(t)) \cdot P_{1,5}(t) \cdot P_{1,7}(t)], \quad (4)$$

где $P_k(t)$ – вероятность безотказной работы k -го элемента.

На рис. 3 представлены графики вероятности безотказной работы системы $P(t)$ и оценки $\bar{P}(t)$, полученные с использованием аналитического выражения (4) и путем статистического моделирования ($N=200$) на модели, соответствующей рис. 2.

Анализ процессов на рис. 3 показывает, что оценка вероятности безотказной работы комбинированной системы, полученная при моделировании, в среднем соответствует результатам аналитических расчетов и содержит ошибку оценки $\Delta P(t)$:

$$\bar{P}(t) = P(t) + \Delta P(t). \quad (5)$$

Значение среднего квадратического отклонения (СКО) ошибки оценки $\sigma_{AP}(t)$ определяет-

ся количеством модельных экспериментов N (3) и значением оцениваемой вероятности $P(t)$.

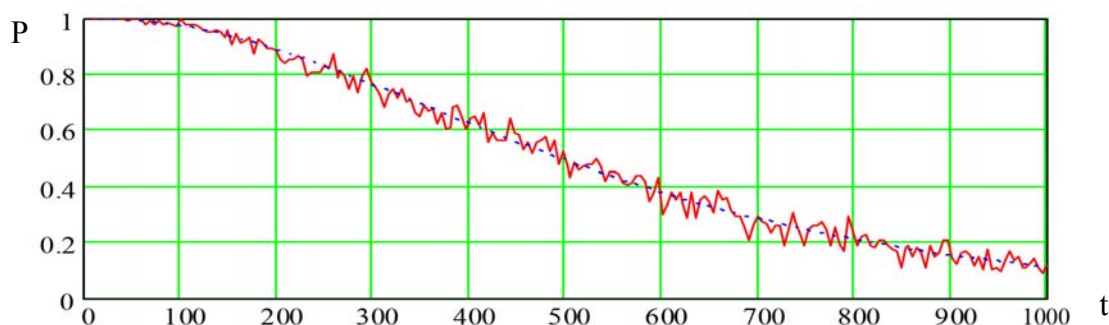


Рис. 3. Зависимость вероятности безотказной работы (пунктирная линия) и ее модельной оценки от времени для схемы надежности на рис. 1

Поток событий S_Σ , состоящий из случайной последовательности 0 и 1, имеет максимальную неопределенность $\sigma = 0,5$ при $P(t) = 0,5$ и минимальную неопределенность на граничных значениях вероятности безотказной работы $\sigma = 0$ при $P(t) = 0$ и $P(t) = 1$. Исходя из этого, СКО ошибки оценки $\hat{P}(t)$ лежит в интервале значений:

$$0 \leq \sigma_{AP}(t) \leq \frac{0,5}{\sqrt{N}}. \quad (6)$$

Анализ (5) и (6) показывает возможность использования метода статистического моделирования для анализа надежности сложных систем при условии наличия достаточных вычислительных ресурсов для обеспечения требуемой точности оценки вероятности безотказной работы.

Одной из основных задач, решаемых при разработке сложных технических систем, является задача выполнения требований по надежности, которую можно сформулировать в виде:

$$P(t_{\text{треб.}}) \geq P_{\text{треб.}} \quad (7)$$

То есть схема (конфигурация) системы должна обеспечить на заданный момент времени надежность не ниже требуемой. В случае если требование не выполняется, необходимо уточнять выбранную схему системы. Решение такой задачи при наличии модели надежности может быть формализовано и осуществлено путем формирования поискового алгоритма, обеспечивающего оптимальное пошаговое уточнение структуры выбранной схемы, направленное на ввод в схему дополнительных резервных элементов, или определение требований к параметрам надежности включенных в схему элементов. При этом максимизируемым показателем качества служит приращение

вероятности исправного состояния системы, рассчитываемое моделью на требуемый момент времени $t_{\text{треб.}}$, а искомым параметром поиска k – место подключения резервного элемента, обеспечивающего максимальный прирост показателю качества при минимальных затратах C_k . Таким показателем качества в пространстве k параметров может служить нормализованная функция чувствительности μ_k :

$$\mu_k = \frac{\hat{P}_k^*(t_{\text{треб}}) - \hat{P}_k(t_{\text{треб}})}{C_k}, \quad (8)$$

где $\hat{P}_k^*(t_{\text{треб}})$ – вероятность исправного состояния системы на момент времени $t_{\text{треб}}$ при условии резервирования k -го элемента.

Показатель качества (8) содержит случайную составляющую $\Delta\mu_k$, определяемую свойствами ошибок оценки $\hat{P}_k(t)$ и $\hat{P}_k^*(t)$ и составляющую $\bar{\mu}_k$, содержащую информацию об эффективности принимаемого решения.

$$\Delta\mu_k = \frac{\Delta\hat{P}_k^*(t_{\text{треб}}) - \Delta\hat{P}_k(t_{\text{треб}})}{C_k}. \quad (9)$$

Учитывая, что СКО составляющих $\Delta\hat{P}_k^*(t_{\text{треб}})$ и $\Delta\hat{P}_k(t_{\text{треб}})$ практически равны между собой, СКО ошибки $\sigma_{\Delta\mu_k}$ будет превосходить значения $\frac{\sigma_{AP}(t)}{C_k}$ примерно в 1,4 раза (при отсутствии корреляции между составляющими).

В то же время вычислительная устойчивость поискового алгоритма, работающего по принципу пошаговой максимизации критерия (8), может быть обеспечена при условии совпадения позиции его максимума и максимума $\bar{\mu}_k$ в пространстве параметров поиска. Это условие выпуклости предъявляет требование к ошибке

оценки критерия в виде $\sigma_{\bar{R}_k} < \frac{\bar{R}_k - \bar{R}_k}{3}$, для выполнения которого требуются значительные вычислительные ресурсы. Например, для обеспечения СКО ошибки оценки $\bar{R}_k(t)$ на уровне менее $5 \cdot 10^{-2}$ в соответствии с (6) необходимо на каждом шаге итерации проведение $N > 10^4$ модельных экспериментов на уровне менее $1 \cdot 10^{-2}$ – $N > 2,5 \cdot 10^4$ экспериментов и т. д.

Анализ (9) показывает, что возможным путем уменьшения интенсивности ошибок оценки выбранного критерия является решение задачи по обеспечению максимальной корреляции ошибок $\Delta \bar{R}_k(t_{\text{треб}})$ и $\Delta \bar{R}_k^*(t_{\text{треб}})$. Когда значение коэффициента корреляции составляющих ошибки оценки функции чувствительности (9) близко к 1, они практически компенсируют друг друга, существенно уменьшая СКО ошибки оценки. Решение этой задачи оказывается возможным за счет использования идентичных последовательностей случайных чисел при расчетах оценок состояния исследуемой системы, формируемых по методу Монте-Карло (1), (2).

Такой подход к организации модельного эксперимента, означающий синхронизацию расчетов оценок $\bar{R}_k(t_{\text{треб}})$ и $\bar{R}_k^*(t_{\text{треб}})$, позволяет на 1–2 порядка уменьшить вычислительную сложность решаемой задачи.

Ядро поискового алгоритма, осуществляющего пошаговое формирование схемы надежности СБЭП ТСО, обеспечивающей выполнение требований по надежности, функционирует следующим образом.

Первоначально производится статистическое моделирование по оценке значения надежности исходной системы на заданный момент времени и оно запоминается в качестве $\bar{R}_k(t_{\text{треб}})$.

Последовательно для каждого k -го элемента схемы надежности системы проводится моделирование по оценке $\bar{R}_k^*(t_{\text{треб}})$ при условии подключения к нему дополнительного резервного элемента. Далее рассчитываются функции чувствительности μ_k (8) для каждого элемента схемы.

Проверяется выполнение требования (7) для каждого значения $\bar{R}_k^*(t_{\text{треб}})$. Если требование не выполняется, то принимается решение о включении в схему надежности резервного элемента параллельно тому k -му элементу, у которого μ_k имеет максимальное значение.

Соответственно этому значение $\bar{R}_k^*(t_{\text{треб}})$ за-

поминается в качестве $\bar{R}_k(t_{\text{треб}})$ и делаются следующие итерации до выполнения условия (7).

По принимаемым структурным решениям ведется протокол в виде поэлементной таблицы, содержащей сведения о структуре системы, распечатываемый при выполнении системой условия (7).

Предложенный оптимизационный алгоритм был реализован и проверен на примере СБЭП, изображенной на рис. 1. При этом формирование схемы надежности проводилось для обеспечения задаваемых значений вероятности безотказной работы $P_{\text{тр}} = 0,8; 0,9; 0,95$ и $0,99$ при требуемом времени эксплуатации 100; 1000; 2000...5000 час. Исходные данные по надежности элементов схемы выбраны из сообщений проверки устойчивости поискового алгоритма в наиболее сложных условиях, реализующихся при максимальных ошибках оценки функций чувствительности (9).

Результаты работы предлагаемого алгоритма оптимизации, работающего с организацией корреляции составляющих ошибки (9), при $N = 1000$ представлены в таблице и на рис. 5.

На рис. 4 показана функция чувствительности (8) для элементов исходной схемы на последнем шаге оптимизации.

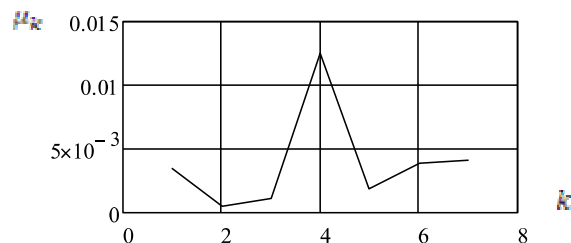


Рис. 4. Реализация показателя качества μ_k при решении оптимизационной задачи при $T_{\text{треб}} = 5000$; $P_{\text{треб}} = 0,99$

Из рисунка видно, что функция чувствительности μ_k имеет максимум на пространстве параметров схемы надежности и на данном шаге оптимизации будет принято решение по резервированию элемента № 4 (рис. 1).

На рис. 5 представлена зависимость стоимости обеспечения требуемых уровней вероятности безотказной работы СБЭП от задаваемого времени ее надежной эксплуатации.

Значения, приведенные в строках таблицы, показывают степень требуемого резервирования соответствующих элементов схемы надежности на рис. 1. В последних строках таблицы приведены значения, показывающие общее количество требующихся резервных элементов.

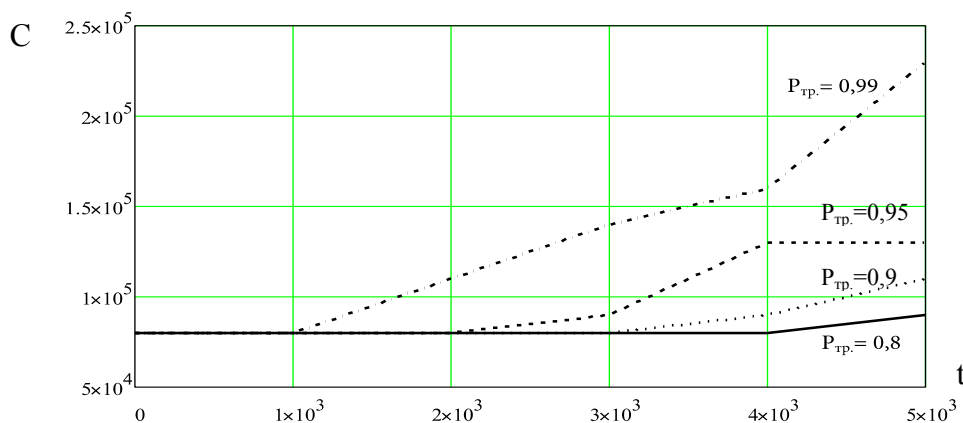


Рис. 5. Зависимость стоимости обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы СБЭП от задаваемого времени ее надежной эксплуатации

Результаты расчета комплекта аппаратуры, обеспечивающей требования по надежности за счет оптимального резервирования

№ элемента	T = 1000			T = 2000			T = 3000			T = 4000			T = 5000		
	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,99	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,99	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,99	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,99	P = 0,9	P = 0,95	P = 0,99
Интенсивность отказов элементов 0,0001															
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	3	2	3	3
4	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	3	1	2	3
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2	4
7	1	1	1	1	1	2	1	2	3	2	3	3	3	3	3
Количество доп. элементов	0	0	0	0	0	3	0	2	6	2	4	8	5	6	10
Интенсивность отказов элементов 0,0002															
Количество доп. элементов	0	0	4	1	3	7	4	7	13	8	10	18	12	18	26

Приведенные в таблице результаты работы алгоритма оптимизации в целом согласуются с интуитивными представлениями о значимости элементов в схеме надежности. При этом получаемые в выбранных условиях рекомендации по резервированию могут рассматриваться в качестве минимально необходимых требований к надежности каждого из элементов СБЭП ТСО, выполнение которых достаточно для выполнения требований к надежности исследуемой системы в целом.

Предлагаемый метод организации корреляционной взаимосвязи ошибок оценок вероятности безотказной работы, используемых при расчете максимизируемых функций чувствитель-

тельности, позволяет существенно (более чем на порядок) уменьшить вычислительную сложность реализации алгоритма оптимизации при одновременном обеспечении его вычислительной устойчивости и эффективности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин, Б. Р. Теория надежности радиотехнических систем / Б. Р. Левин. – М. : Сов. радио, 1978. – 264 с.
2. Цапко, Г. П. Е-сетевой метод информационно-логического проектирования бортовых комплексов управления / Г. П. Цапко. – Томск : Изд-во ТПУ, 1995. – 104 с.
3. Обоскалов, В. П. Структурная надежность электроэнергетических систем : учеб. пособие / В. П. Обоскалов. – Екатеринбург : УрФУ, 2012. – 118 с.
4. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 1965. – 474 с.

РОБОТОТЕХНИКА

УДК 615.477:796.012

А. А. Большаков, В. П. Глазков, А. А. Кулик

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИХ И АВТОМАТИЧЕСКИХ ПРОТЕЗИРУЕМЫХ СИСТЕМ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА

Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина

glazkovvp@gmail.ru, kulikalekse@yandex.ru

В работе рассматриваются методы повышения эффективности управления движением полуавтоматических и автоматических протезируемых устройств опорно-двигательного аппарата человека, приводятся структурные схемы их системы управления, а также блока управления. Авторами предложена модификация системы управления протезируемого устройства, основным элементом которой является нейросетевой преобразователь информации, позволяющий обеспечить заданную точность значений выходных переменных движения устройства. Особое внимание уделяется математическому моделированию функционирования системы управления.

Ключевые слова: протезируемые устройства, система управления, нейросетевой преобразователь информации.

A. A. Bolshakov, V. P. Glazkov, A. A. Kulik

IMPROVE EFFICIENCY THE CONTROL OF MOTION SEMIAUTOMATIC AND AUTOMATIC PROSTHETIC SYSTEMS OF MEN'S LOW LIMBS

Saratov State Technical University named by Y Gagarin

In article consider methods to improve the efficiency of traffic management semiautomatic and automatic prosthetics devices of men's low limbs, the block diagram of the control system and the control unit. The authors proposed a modification of the control system prosthetic device whose main element is a neural network data converter that allows to achieve a desired accuracy of the output variables of motion device. Particular attention is paid to the mathematical modeling of the control system.

Keywords: the prosthetic devices, control system, neural network converter information.

Введение

Активное развитие науки за последние годы, в том числе в области управления движением технических объектов, позволило значительно повысить эксплуатационные показатели медицинской техники, в частности, протезируемых устройств. Например, вспомогательные устройства движения человека, разработанные компанией Honda, позволяют разгрузить мускулатуру нижних конечностей человека с применением в конструкции электродвигателей. Разработчиками протезостроительной фирмы Ossure создан коленный модуль для протеза бедра на базе синтеза пневматических и электрических приводов, что позволило значительно улучшить технические и эксплуатационные характеристики устройства. При этом на российском рынке отсутствует отечественная протезостроительная продукция, по технико-физи-

ческим параметрам близкая к зарубежным аналогам. Развитие отечественного высокотехнологичного протезостроения, а именно полуавтоматических и автоматических протезируемых устройств, может стать благоприятным фактором, улучшающим условия быта и реабилитации людей с заболеваниями опорно-двигательного аппарата [1].

Полуавтоматической (автоматической) протезируемой системой опорно-двигательного аппарата человека является протез или протезируемое устройство, управление движением которым осуществляется пневматическим и (или) электрическим приводом по сигналу формируемым пользователем, физическим воздействием на систему (полуавтоматический режим управления) или нервно-импульсным (автоматический режим управления). Проектирование и производство таких механизмов связано с ра-

циональным выбором их конструкции, системы управления и программной реализацией законов движения. При этом основными этапами проектирования являются создание математических моделей движения системы, исследование и обеспечение заданной точности ее кинематических и динамических переменных движения, что позволит существенно повысить эффективность управления полуавтоматическими и автоматическими протезируемыми устройствами.

Таким образом, основным требованием, предъявляемым к системам управления протезируемых устройств, является формирование управляющего сигнала, характеризующего кинематические и динамические переменные их движения с заданной точностью, а также обеспечение безопасности эксплуатации человеком протезируемого устройства.

1. Постановка задачи

Цель настоящей работы заключается в создании системы управления полуавтоматических и автоматических протезируемых устройств опорно-двигательного аппарата человека, позволяющей повысить эффективность управления их движением, точность регулирующего сигнала блока управления системы и обеспечения безопасности ее эксплуатации при отключении электропитания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выполнить анализ методов повышения эффективности управления движением протезируемых систем опорно-двигательного аппарата человека.

2) разработать систему управления движением протезируемых систем.

3) осуществить компьютерное моделирование функционирования системы управления полуавтоматического и автоматического протезируемого устройства.

Далее рассматриваются основные результаты, полученные при решении поставленных задач.

2. Анализ методов повышения эффективности управления движением протезируемых систем опорно-двигательного аппарата человека

Как правило, методы, обеспечивающие эффективное управление движением вспомогательных устройств перемещения человека, направлены на повышение точности регулирующего воздействия формируемым блоком управления устройства. Функционирование блока управления считается удовлетворительным, если значение его выходного сигнала, характери-

зующего кинематические и динамические переменные движения протезируемой системы, совпадают с их заданными значениями. При этом погрешность значений реальных переменных от заданных может составлять $\pm 5\%$. В качестве заданных значений в зависимости от вида и конструкции протезируемой системы обычно принимаются значения углов и моментов вращения тазобедренного и коленного суставов человека, допустимая деформация элемента передачи движения к коленному шарниру.

Во время движения человека с системой возникает опасность отключения электропитания устройства управления, что может привести к заклиниванию выходного вала электродвигателя и невозможности перемещения человека с устройством. Поэтому, кроме методов, повышающих точность регулирующего сигнала блока управления протезируемого устройства, целесообразно использовать способы, обеспечивающие безопасность движения человека с системой при отключении ее электропитания.

Повышение эффективности управления движением аналогов полуавтоматических и автоматических протезируемых систем осуществляется методами формирования регулирующего сигнала блока управления, которые базируются на применении:

а) методик вычисления локальной оценки отклонения реальных переменных движения устройства от их заданных значений [3];

б) алгоритмов вычисления компенсирующих моментов формируемых электроприводом при превышении заданного значения предельно-допустимой деформации элемента передачи движения к коленному шарниру системы [15];

в) методов нейросетевой компенсации [8–13];

г) элементов системы управления, позволяющих обеспечить плавность включения/отключения электромеханических узлов протезируемого устройства.

Первые два метода могут быть реализованы в устройствах, блоком управления которых является микроконтроллер. Управление движением протезируемых систем с использованием микроконтроллера имеет следующие преимущества: простота реализации системы управления устройства на базе существующих технических решений, широкий диапазон решаемых задач в системах управления. Примером системы управления, в которой регулирующий сигнал формируется микроконтроллером, является устройство управления протезируемого механизма, разработанного фирмой Honda рис. 1 [2].

Из структурной схемы видно, что устройство управления движением полуавтоматических и автоматических протезируемых систем опорно-двигательного аппарата человека содержит аккумулятор, блок управления, электропривод, электромагнитную муфту, а также датчики обратной связи, установленные в области тазобедренного шарнира и исполнительного механизма.

Питание устройства управления осуществляется от аккумулятора и поступает на вход блока управления, который формирует управляющие сигналы вращения ротора электродвигателя и включения/отключения электромагнитной муфты.

Значения углов поворота и моментов, формируемых относительно тазобедренного шарнира, определяются с применением датчиков обратной связи D_{oc3} , D_{oc4} . При этом вращение ротора электродвигателя передается к коленному шарниру через исполнительный механизм, например, кривошипно-шатунный. Датчик обратной связи D_{oc5} характеризует деформацию элемента передачи движения исполнительного механизма в процессе эксплуатации полуавтоматической протезируемой системы. Для обеспечения безопасности движения человека с системой при отключении электропитания в конструкции предусмотрено наличие электромагнитной муфты, соединяющей ротор электродвигателя и исполнительный механизм. Управление электромагнитной муфтой осуществляется бло-

ком управления протезируемой системы по сигналу с датчика заряда аккумулятора D_{oc2} , который характеризует уровень понижения заряда аккумулятора. Также на вход блока управления поступает сигнал изменения динамических характеристик движения системы, формируемый человеком через датчики давления D_{oc1} .

Таким образом, предлагаемое устройство управления позволяет обеспечить заданную точность переменных движения протезируемой системы с использованием датчиков обратной связи, осуществляющих измерение контролируемых величин, характеризующих движение системы, а также повысить безопасность ее эксплуатации и долговечность.

Формирование регулирующего сигнала блока управления системы может быть осуществлено микроконтроллером или нейросетевым преобразователем информации. В работе исследуется блок управления протезируемой системы, реализованный на базе нейросетевого процессора и электронного ключа, структурная схема которого представлена на рис. 3.

Схема блока управления полуавтоматической протезируемой системы содержит аналого-цифровой преобразователь широтно-импульсный модулятор (ШИМ), делители напряжения, нейросетевой преобразователь информации, в качестве которого может быть использован нейропроцессор, транзистор VT1, резистор R_B и диод VD1.

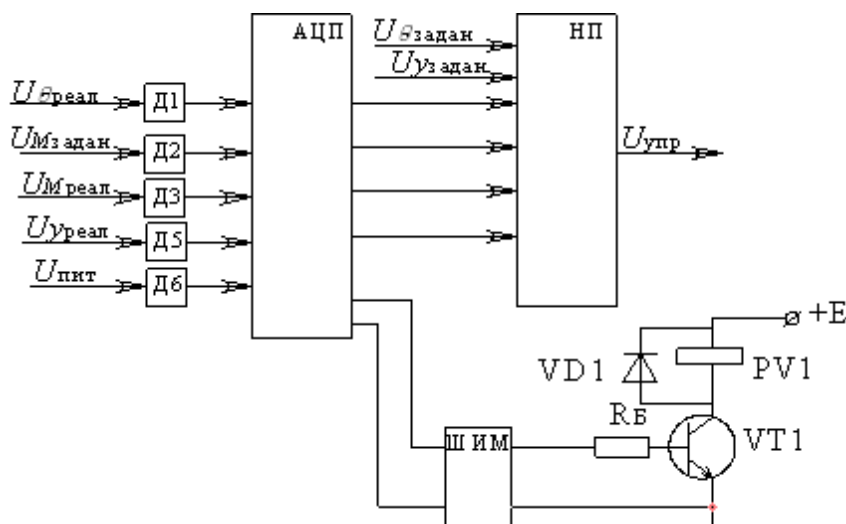


Рис. 3. Структурная схема блока управления полуавтоматической протезируемой системы:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; НП – нейронный процессор; $D_1, \dots, D_6$ – делители напряжения; VT1 – транзистор; R_B – резистор базы транзистора VT1; VD1 – диод; VT1, PV1 – электромагнитная муфта; E – питание транзистора; $U_{\theta \text{ ил}}, U_{\theta \text{ ад}}, U_{\theta \text{ реал}}$ – заданные значения моментов, углов поворота звеньев системы, деформации элемента передачи движения соответственно; $U_{M \text{ ил}}, U_{M \text{ ад}}, U_{M \text{ реал}}$ – реальные значения моментов, углов поворота звеньев системы, деформации элемента передачи движения соответственно; $U_{\text{упр}}$ – управляющее воздействие, формируемое блоком управления; ШИМ – широтно-импульсный модулятор

На вход аналого-цифрового преобразователя поступают сигналы с датчиков устройства управления полуавтоматической протезируемой системы через соответствующие делители напряжения. Затем сигналы передаются на вход нейропроцессора. Делители напряжения предназначены для преобразования выходных сигналов датчиков обратной связи в соответствии с заданным диапазоном сигналов, поступающих на вход аналого-цифрового преобразователя.

Нейронная сеть процессора формирует значения управляющего сигнала, поступающего на вход электродвигателя. Ее использование позволяет обеспечить движение протезируемой системы с заданной точностью ее выходных переменных. Структурная схема нейронной сети представлена на рис. 4. Она является сетью прямого распределения с линейной функцией активации и обучением методом алгоритма градиентного спуска [14].

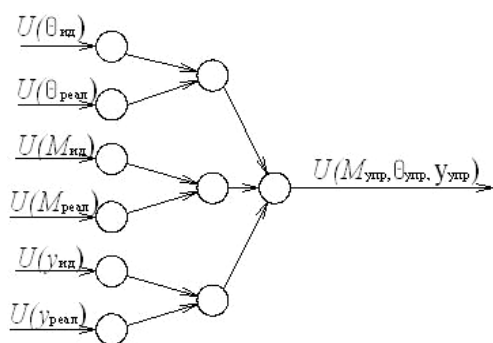


Рис. 4. Структурная схема нейронной сети протезируемой системы

Транзистор во время работы блока управления находится в открытом состоянии и передает заряд аккумулятора на электромагнитную муфту PV1. При понижении заряда на аккумуляторе транзистор VT1 закрывается, что приводит к отключению электромагнитной муфты и отсоединению выходного вала электродвигателя от исполнительного механизма. Резистор R_B обеспечивает запирающие транзистора при низком уровне управляющего сигнала во всем диапазоне рабочих температур и насыщение при высоком уровне управляющего сигнала. Параллельно транзистору VT1 установлен диод VD1, который защищает блок управления от обратного тока электромагнитной муфты. Применение в структуре блока управления широт-

но-импульсного модулятора и электронного ключа, реализованного в виде транзистора VT1, позволяет обеспечить плавность выключения/включения электромагнитной муфты системы, повышая безопасность эксплуатации системы, пользователем и его долговечность.

Переходные процессы в электронном ключе, управляемом ШИМ, представлены на рис. 5.

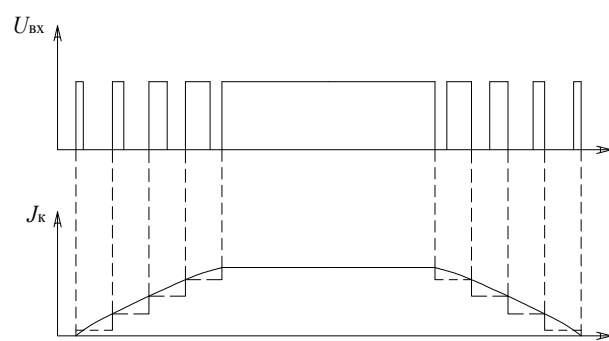


Рис. 5. Переходные процессы в электронном ключе, управляемом ШИМ

Из зависимостей переходных процессов в электронном ключе видно, что ток коллектора плавно возрастает до величины, соответствующей насыщению коллектора при изменении ширины импульсов, поступающих на вход ключа. В случае внезапного отключения питания блока управления протезируемой системы ШИМ формирует импульсный сигнал с различным шагом, значение тока коллектора начинает плавно уменьшаться. Таким образом, применение в структуре блока управления ШИМ и электронного ключа позволяет сформировать управляющий сигнал относительно электромагнитной муфты, обеспечивая плавность ее включения/выключения, долговечность электромагнитной муфты и безопасность перемещения человека с системой при отключении ее электропитания.

4. Математическое моделирование функционирования устройства управления полуавтоматических и автоматических протезируемых систем

Учитывая, что основным элементом системы управления протезируемых устройств является нейросетевой преобразователь информации, математическая модель функционирования системы управления имеет следующий вид:

$$U_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^3 c_i U_{2i}(t), U_{\text{вх}2\theta} = c_1 U_{\theta_{\text{ид}}} + c_2 U_{\theta_{\text{реал}}}, U_{\text{вх}2M} = c_3 U_{M_{\text{ид}}} + c_4 U_{M_{\text{реал}}}, \\ U_{\text{вх}2\gamma} = c_5 U_{\gamma_{\text{ид}}} + c_6 U_{\gamma_{\text{реал}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}$ – значение сигнала, характеризующего управляющее воздействие блока управления относительно электропривода; $U_{\text{вх}2\theta}$, $U_{\text{вх}2M}$, $U_{\text{вх}2y}$ – значения сигналов, поступающих на выходной слой нейронной сети; $U_{M\text{ид}}$, $U_{\theta\text{ид}}$, $U_{y\text{ид}}$ – идеальные значения моментов, углов поворота звеньев системы, деформации элемента передачи движения соответственно; $U_{M\text{реал}}$, $U_{\theta\text{реал}}$, $U_{y\text{реал}}$ –

реальные значения моментов, углов поворота звеньев системы, деформации элемента передачи движения соответственно; $c_i, c_1, \dots, c_6$ – весовые коэффициенты каждого нейрона сети.

Весовые коэффициенты $c_i, c_1, \dots, c_6$ определяются автоматически по алгоритму градиентного спуска в процессе обучения нейронной сети.

$$\begin{aligned} U_{\theta\text{реал}} &= k_1 \cdot \theta_{\text{реал}}(t), U_{M\text{реал}} = k_2 \cdot M_{\text{реал}}(t), U_{y\text{реал}} = k_3 \cdot y_{\text{реал}}(t), U_{y\text{ид}} = k_6 \cdot y_{\text{ид}}(t), \\ U_{\theta\text{ид}} &= k_m (T_m \ddot{\theta}_{\text{ид}}(t) + T_m \dot{\theta}_{\text{ид}}(t) + \theta_{\text{ид}}(t)), U_{M\text{ид}} = k_4 \cdot M_{\text{ид}}(t) + k_5 \cdot \dot{M}_{\text{ид}}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\theta_{\text{реал}}(t)$, $M_{\text{реал}}(t)$, $y_{\text{реал}}(t)$ – зависимости изменения реальных значений углов и моментов поворота звеньев системы, деформации элемента передачи движения к коленному шарниру; $k_1, \dots, k_6$ – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами датчиков обратной связи; $\theta_{\text{ид}}(t)$, $M_{\text{ид}}(t)$, $y_{\text{ид}}(t)$ – зависимости изменения заданных значений углов и моментов поворота звеньев системы, деформации элемента передачи движения к коленному шарниру; $\ddot{\theta}_{\text{ид}}(t)$, $\dot{\theta}_{\text{ид}}(t)$, $\dot{M}_{\text{ид}}(t)$ – первые и вторые производные углов и моментов поворота звеньев полуавтоматической протезируемой системы.

Согласно выражению (2) изменение электрических сигналов, поступающих на вход блока управления, имеет линейную зависимость от кинематических и динамических переменных движения протезируемых устройств, что позволяет осуществить моделирование функционирования системы управления по контролируемым переменным движения устройства. Значения кинематических и динамических переменных движения протезируемого устройства могут быть получены в результате математического моделирования движения человека и исследования деформации элемента передачи движения к коленному шарниру. Основные результаты математического моделирования движения человека и протезируемого

механизма представлены в работах [3; 5–7].

В процессе моделирования изменения регулирующего сигнала блока управления получены результаты, представленные в таблице, которая содержит следующие данные для каждого этапа движения человека с системой:

– известные экспериментальные значения, полученные японскими учеными [Yasushi Ikeuchi, Jun Ashihara, Tekeshi Koshiishi] в процессе испытания протезируемого устройства «A walking assistance device», углов $\theta_{3\text{эксп}}$ вращения тазобедренного шарнира. По значениям $\theta_{3\text{эксп}}$ и формулам движения протезируемой системы [5] вычислены значения моментов $M_{3\text{выч}}$ создаваемые электродвигателями протезируемой системы и деформации элемента передачи движения к коленному шарниру системы $y_{\text{выч}}$;

– заданные значения $\theta_{3\text{задан}}$, $M_{3\text{задан}}$, $y_{\text{задан}}$, соответствующие допустимым физиологическим нормам вращения тазобедренного сустава человека и деформации элемента передачи движения к коленному шарниру системы [5];

– значения углов и моментов вращения тазобедренного шарнира, деформации элемента передачи движения к коленному шарниру $\theta_{3\text{упр}}$, $M_{3\text{упр}}$, $y_{\text{упр}}$, определенные методом нейросетевого моделирования.

Результаты нейросетевого моделирования

Этап движения системы	Механизм передачи движения								
	Тазобедренный шарнир						Элемент передачи движения к коленному шарниру		
	$\theta_{3\text{эксп}}$, град	$\theta_{3\text{задан}}$, град	$\theta_{3\text{упр}}$, град	$M_{3\text{выч}}$, Н·м	$M_{3\text{задан}}$, Н·м	$M_{3\text{упр}}$, Н·м	$y_{\text{выч}}$, мм	$y_{\text{задан}}$, мм	$y_{\text{упр}}$, мм
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Фаза опоры движения	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000
	1.45	1.50	1.50	0.98	0.10	0.10	0.0013	0.0015	0.0015
	2.05	2.00	2.00	0.27	0.25	0.25	0.0031	0.0030	0.0030

Окончание таблицы

Этап движения системы	Механизм передачи движения								
	Тазобедренный шарнир						Элемент передачи движения к коленному шарниру		
	$\theta_{\text{зэксп}}, \text{град}$	$\theta_{\text{задан}}, \text{град}$	$\theta_{\text{зупр}}, \text{град}$	$M_{\text{звыч}}, \text{Н·м}$	$M_{\text{задан}}, \text{Н·м}$	$M_{\text{зупр}}, \text{Н·м}$	$y_{\text{выч}}, \text{мм}$	$y_{\text{задан}}, \text{мм}$	$y_{\text{зупр}}, \text{мм}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Фаза опоры движения	4.54	4.50	4.50	0.52	0.50	0.50	0.0047	0.0045	0.0045
	6.93	7.00	7.00	0.74	0.80	0.80	0.0055	0.0060	0.0060
	10.82	10.74	10.74	1.76	1.00	1.00	0.0078	0.0075	0.0075
	15.28	15.44	15.44	3.16	4.50	4.50	0.0082	0.0090	0.0090
	19.68	20.92	20.92	5.84	6.00	6.00	0.0097	0.0105	0.0105
	29.80	27.60	27.60	9.18	8.50	8.50	0.0125	0.0120	0.0120
	31.94	34.34	34.34	9.30	11.60	11.60	0.0143	0.0135	0.0135
	46.28	42.75	42.75	13.80	14.50	14.50	0.0162	0.0150	0.0150
Фаза переноса движения	0	0	0	0	0	0	0.0150	0.0150	0.0150
	-0.86	-0.85	-0.85	-2.78	-2.65	-2.65	0.0144	0.0135	0.0135
	-1.89	-1.75	-1.75	-5.67	-5.25	-5.25	0.0110	0.0120	0.0120
	-2.69	-2.75	-2.75	-8.33	-8.50	-8.50	0.0111	0.0105	0.0105
	-4.06	-3.80	-3.80	-13.37	-12.50	-12.50	0.0096	0.0090	0.0090
	-6.36	-6.44	-6.44	-21.20	-20.00	-20.00	0.0073	0.0075	0.0075
	-8.99	-9.15	-9.15	-29.16	-31.70	-31.70	0.0064	0.0060	0.0060
	-12.97	-12.24	-12.24	-42.15	-42.20	-42.20	0.0047	0.0045	0.0045
	-17.04	-15.78	-15.78	-59.17	-55.30	-55.30	0.0032	0.0030	0.0030
	-18.14	-19.44	-19.44	-65.80	-70.00	-70.00	0.0013	0.0015	0.0015
	-24.10	-23.75	-23.75	-88.56	-82.00	-82.00	0.0000	0.0000	0.0000

Как видно из таблицы, диапазон отклонения экспериментальных и вычисленных значений переменных движения протезируемой системы от заданных составляет $\pm 8\%$. При этом отклонение значений $\theta_{\text{зупр}}, M_{\text{зупр}}, y_{\text{зупр}}$ от заданных $\theta_{\text{задан}}, M_{\text{задан}}, y_{\text{задан}}$ менее $\pm 3\%$. Согласно критерию нулевая гипотеза: $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ не отвергается, если $F < F_{\text{кр}}$.

$$F = S_1^2 / S_2^2, \quad (3)$$

где F – оценка отношений дисперсий; $F_{\text{кр}}$ – табличное значение оценки отношений дисперсий; S_1^2 – дисперсия отклонения модельной кривой от результатов нейросетевого моделирования; S_2^2 – дисперсия ошибки.

В результате исследования нейронной сети на адекватность получены значения $F = 1.5$; $F_{\text{кр}} \{4, 5, 0.05\} = 6.26$, что подтверждает нулевую гипотезу и свидетельствует об адекватности и работоспособности предложенной нейронной сети.

Таким образом, нейросетевой преобразователь информации способен с определенным запасом обеспечить требуемый диапазон отклонений ($\pm 5\%$) кинематических и динамических переменных движения протезируемой системы.

Заключение

В результате выполнения работы осуществлен анализ методов повышения эффективности управления движением полуавтоматических и автоматических протезируемых устройств, сформулированы требования к их системам управления, что позволило разработать устройство управления электромеханической протезируемой системы. При этом предлагаемая система управления обеспечивает заданную точность ($\pm 5\%$) кинематических и динамических переменных движения протезируемого устройства, а также безопасность его эксплуатации в случае отключения электропитания.

Полученные результаты моделирования функционирования системы управления подтверждают целесообразность применения нейросетевого преобразователя информации в блоке управления протезируемого устройства в качестве элемента, формирующего регулирующей сигнал блока управления. Применение методов повышения эффективности управления движением протезируемых устройств позволяет повысить качество выпускаемой отечественной протезостроительной продукции по сравнению с зарубежными аналогами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глазков, В. П. Изобретение способное изменить мир / В. П. Глазков // Инновации и публицити. – 2009. – № 1. – С. 56–57.
2. Pat. US 2010/0121233 A1. Walking assistance device / Jun Ashihara, Hiroshi Matsuba, Hiroshi Kudoh. Assignee: Honda Motor Co., Ltd. - № US 12/612,862, prior publication date 5.11.2009 ; date of patent 13.05.2010. – 9 pp.: 4 fig.
3. Вукобратович, М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы / М. Вукобратович. – М. : Наука, 1976. – 544 с.
4. Медведев, В. С. Нейронные сети. Matlab 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
5. Глазков, В. П. Математическая модель движения протезов и протезируемых систем для нижних конечностей человека / В. П. Глазков, А. А. Кулик // Труды 23-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях-23». Саратов. Саратовский государственный технический университет, 2010. – Т. 6. – С. 141–143.
6. Глазков, В. П. Исследование деформации упругого элемента полуавтоматической протезируемой системы на устойчивость / В. П. Глазков, А. А. Большаков, А. А. Кулик // Труды 26-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях-26». Саратов. Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, 2013. – Т. 8. – С. 151–155.
7. Саад Загхлюл Саид Аль-Кхаит Динамический анализ различных геометрических форм исполнения звеньев робота / Саад Загхлюл Саид Аль-Кхаит // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. – № 3. – С. 14–18.
8. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими процессами / под ред. профессора А. А. Большакова. – М. : Горячая линия-Телеком, 2006. – 160 с.
9. Бровкова, М. Б. Системы искусственного интеллекта в

машиностроении / М. Б. Бровкова. – Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2005. – 82 с.

10. Глазков, В. П. Нейросетевое распознавание трехмерных объектов на основе информации о пространственных координатах точек поверхности / В. П. Глазков, И. В. Егоров, Д. В. Лачугин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4(51). – С. 167–172.

11. Мусатов, В. Ю. О возможности применения нейропроцессора для обработки отклика однокристалльной мультисенсорной микросистемы идентификации газов / В. Ю. Мусатов, В. В. Сысоев, А. А. Мащенко, А. С. Варезников, А. А. Хризостомов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 1. – С. 17–22.

12. Девятых Д. В., Гергет О. М., Михаленко И. В. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования перинатального поражения нервной системы // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. 2013. № 8 (111). С. 77–81.

13. Розалиев В. Л., Бобков А. С., Федоров О. С. Применение нейронных сетей и грануляции при построении автоматизированной системы определения эмоциональной реакции человека // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. 2010. № 11 (71). С. 63–68.

14. Большаков, А. А. Использование нейросетевого компенсатора для стабилизации движения полуавтоматической протезируемой системы / А. А. Большаков, А. А. Кулик, В. П. Глазков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 1. – С. 18–22.

15. Кулик, А. А. Исследование деформации упругого элемента полуавтоматической протезируемой системы на устойчивость / А. А. Кулик, А. А. Большаков, В. П. Глазков // Сборник трудов международной научной конференции «ММТТ-26». Т. 8. – Саратов, 2013. – С. 151–155.

УДК 62-523.8

А. Е. Гаврилов, А. С. Данишин, А. А. Бурханов

АВТОНОМНАЯ РОБОТИЗИРОВАННАЯ ШАГАЮЩАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ*

Волгоградский государственный технический университет

gavrilov@vstu.ru

В работе описывается концепция шагающего робота с ортогональным шагающим движителем, оборудованного системой мониторинга окружающей среды. Описывается конструкция роботизированной транспортной платформы, в которой для перемещения используется шагающий ортогональный движитель. Приводятся основные сведения о системе управления.

Ключевые слова: шагающий ортогональный движитель, роботизированная платформа, автономный робот, мехатронный модуль, алгоритмы перемещения, приводы шагания, механизм адаптации.

А. Е. Gavrilov, A. S. Danshin, A. A. Burkhanov

AUTONOMOUS ROBOTIC WALKING BASE FOR ENVIRONMENT MONITORING

Volgograd State Technical University

The paper contains the description of the autonomous robotic walking platform with system of environment monitoring. Construction details of robotic walking platform which used to move the walking orthogonal gears is described. Basic information about the control system is provides.

Keywords: walking orthogonal mover, robotic platform, an autonomous robot, mechatronic module, algorithms of movement, the pacing drives, the adaptation mechanism.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ проект №12-08-00301_a, №14-01-31376_мол_a, №14-01-00655_a, №14-08-97041, №13-08-01144.

Проблема сохранения экологии планеты является важной и сложной задачей для всех стран мира без исключения [1]. Сохранение экологической ситуации включает в себя решение множества взаимосвязанных, трудно формализуемых задач. Для решения подобных задач необходимо создание экспертных систем для накопления и анализа информации об окружающей среде. В настоящее время для наблюдения, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов используются различные методы [1, 2]. Для выяснения экологического состояния, снятия проб в зараженных и опасных областях организуются экспедиции в труднодоступные районы, проводятся аналитические исследования и т. д. Проведение экспедиций является невыгодным в финансовом отношении и впоследствии не всегда окупается. Проведение экспедиций, помимо экономических затрат, носит временный характер, а для выявления фундаментальных закономерностей информацию об окружающей среде необходимо получать постоянно, в течение длительного периода времени. Проведение длительных экспедиций для постоянного круглогодичного получения информации и проведения замеров интересующих показателей также экономически не обосновано из-за географической удаленности и труднодоступности мест мониторинга.

В результате появления новых мощных вычислительных систем стало возможным точное управление сложными электромеханическими исполнительными механизмами. В результате человечество научилось решать ряд задач и выполнять большое количество работ с помощью роботов. Применение робототехнических средств, для решения различных задач в особых условиях, по сравнению с человеческим трудом, имеет ряд преимуществ. Роботы выполняют работу быстрее и с меньшими погрешностями чем человек, с меньшими финансовыми затратами, и с большей производительностью. Поэтому повсеместное внедрение робототехнических систем для выполнения различных работ и технологических операций становится приоритетным направлением развития.

Создание автономной роботизированной шагающей платформы, предназначенной для непрерывного сбора, записи, частичного анализа и передачи интересующей информации для детального мониторинга окружающей среды,

реализуемого в пределах небольших территорий, является важной и актуальной задачей.

Основным недостатком робототехнических систем является то, что высокоточные и обладающие относительно длительным сроком эксплуатации роботы, применяемые для выполнения специальных операций в особых условиях, имеют высокую стоимость и отсутствие возможности длительной автономной работы без вмешательства оператора и подзарядки батарей. Большинство мобильных робототехнических систем для перемещения используют колесный или гусеничный движители, что целесообразно при движении по заранее подготовленному маршруту. При отсутствии возможности заблаговременного обустройства трассы применение колесных и гусеничных движителей при движении по пересеченной местности затруднено ввиду того, что такие движители имеют невысокие возможности грунтовой и профильной проходимости, а также обладают высоким удельным давлением на опорную поверхность. По сравнению с ними шагающие движители имеют ряд преимуществ, основными из которых являются: отсутствие сплошной колеи; возможность переступать через препятствия без потери скорости, а также регулируемые параметры профильной и грунтовой проходимости.

В ВолгГТУ на базе опытного образца робота с ортогональным шагающим движителем создан прототип роботизированной платформы [9] для детального мониторинга основных показателей окружающей среды. При проектировании мобильных робототехнических систем невозможно не учитывать специфику условий окружающей среды, в которой в дальнейшем предстоит использовать РТС [3]. Для автономного функционирования необходимо, чтобы роботизированная платформа имела постоянный источник энергии, герметичный корпус для расположения аккумуляторных батарей и системы управления, позволяющий функционировать в штатном режиме всем системам робота.

Автономная роботизированная шагающая платформа состоит из движителя (рис. 1, 2), системы управления движением, приводов курсового (горизонтального) перемещения, приводов адаптации (вертикального перемещения), привода поворота (углового перемещения), набора датчиков обратной связи, аккумуляторных батарей, солнечных батарей и генератора электроэнергии. Компонентная схема представлена на рис. 1.

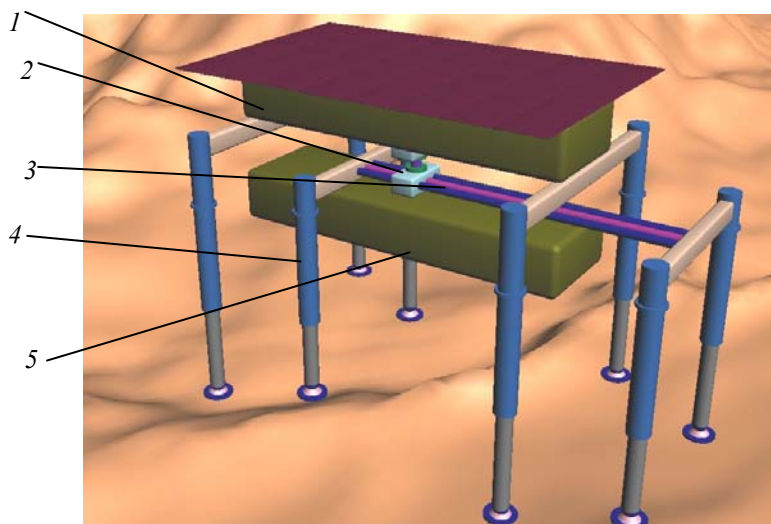


Рис. 1. Компонентная схема автономной роботизированной шагающей платформы:
1 – энергетический блок; 2 – модуль поворота; 3 – модуль горизонтального перемещения; 4 – модуль вертикальной адаптации; 5 – модуль системы управления движением с пространством для полезной нагрузки

Отличительной особенностью платформы является его движитель [7]. Движитель робота состоит из двух корпусов, связанных с возможностью вращения посредством привода поворота. Привод поворота состоит из червячного редуктора и электродвигателя. Имеются два модуля горизонтального перемещения, каждый из которых состоит из корпуса и привода горизонтального перемещения с приводным винтом, электродвигателем и направляющей. Приводной винт и направляющие закреплены в поперечных балках. На концах балок находятся вертикальные выдвижные опорные стойки, образующие с балкой модуль адаптации робота к опорной поверхности. В приводах используются электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением. Питание осуществляется от аккумуляторных батарей 12 В.

Движение происходит за счет попеременного выдвижения рам в направлении движения и чередования смены приводов вертикальной адаптации в опорной фазе. Предполагается, что робототехническая система работает на солнечной энергии и полностью автономна. Мониторинг окружающей среды включает в себя систему получения накопления и передачи информации о различных факторах, таких как температура, влажность, давление, направление ветра, его скорость, радиационный фон, содержание различных веществ и т. д. Робототехнические комплексы, построенные на подобной базе, в зависимости от конкретного предназначения могут быть укомплектованы различными аналоговыми или цифровыми датчиками.

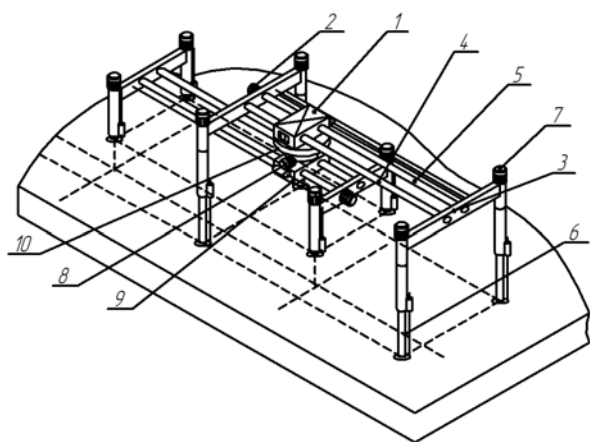


Рис. 2. Схема шагающего ортогонального движителя:
1 – корпус; 2 – привод продольного перемещения верхней рамы; 3 – верхняя рама; 4 – направляющая; 5 – приводной винт; 6 – выдвижные опорные стойки; 7 – приводы опорных стоек; 8 – платформа; 9 – нижняя рама; 10 – привод продольного перемещения нижней рамы; 11 – механизм поворота; 12 – привод поворота



Рис. 3. Шагающий ортогональный движитель с датчиками обратной связи

Кинематическая схема робота позволяет перемещаться, используя различные алгоритмы. Возможны алгоритмы, реализующие прямолинейное движение, а также маневрирование при движении по местности, содержащей препятствия, размеры которых находятся в пределах его адаптационных возможностей. Подробно алгоритмы перемещения робота описаны в работах [3, 4, 5, 6, 11].

Для робота с шагающим с электромеханическим приводом, со стандартным электродвигателем постоянного тока используется система управления движением на базе нескольких плат платы «Arduino Uno» (рис. 4), с силовыми ключами для питания двигателей. Система управления предполагает наличие системы технического зрения [10].

Платформа Arduino была выбрана благодаря удобству и простоте языка программирования, а также открытой архитектуре и программному коду. Устройство программируется через USB без использования программаторов.

Микроконтроллер на плате программируется при помощи языка Arduino и среды разработки Arduino. Проекты могут работать самостоятельно, либо же взаимодействовать с программным обеспечением на компьютере. Программное обеспечение доступно для бесплатного скачивания. Исходные чертежи схем являются общедоступными, пользователи могут применять их по своему усмотрению.

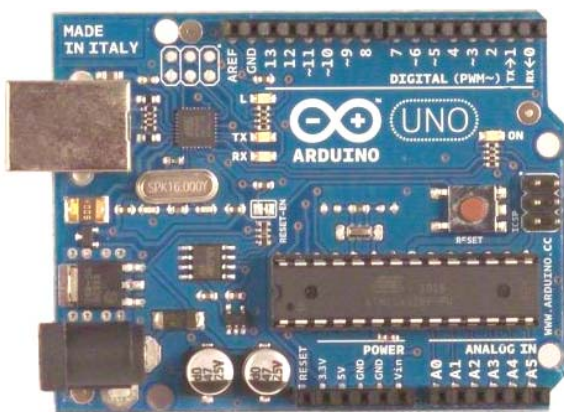


Рис. 4. Плата «Arduino Uno» системы управления автономной роботизированной платформы

Arduino Uno контроллер построен на ATmega328. Платформа имеет 14 цифровых вход/выходов (6 из которых могут использоваться как выходы ШИМ), 6 аналоговых входов, кварцевый генератор 16 МГц, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и кнопку перезагрузки. Для работы необходимо подключить

платформу к компьютеру посредством кабеля USB, либо подать питание при помощи адаптера AC/DC или батареи.

Для связи по USB Adduino Uno использует микроконтроллер ATmega8U2.

Arduino Uno может получать питание через подключение USB или от внешнего источника питания. Источник питания выбирается автоматически.

Внешнее питание может подаваться через преобразователь напряжения AC/DC или аккумуляторной батареей. Преобразователь напряжения подключается посредством разъема 2,1 мм с центральным положительным полюсом.

Платформа может работать при внешнем питании от 6 до 20 В. При напряжении питания ниже 7 В, вывод 5V может выдавать менее 5 В, при этом платформа может работать нестабильно. При использовании напряжения выше 12 В регулятор напряжения может перегреться и повредить плату. Рекомендуемый диапазон от 7 до 12 В.

Микроконтроллер ATmega328 располагает 32 кБ флэш-памяти, из которых 0,5 кБ используется для хранения загрузчика, а также 2 кБ ОЗУ (SRAM) и 1 Кб EEPROM (которая читается и записывается с помощью библиотеки EEPROM).

Каждый из 14 цифровых выводов Uno может настроен как вход или выход, используя функции `pinMode()`, `digitalWrite()`, и `digitalRead()`. Выводы работают при напряжении 5 В. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор 20–50 кОм и может пропускать до 40 мА. Некоторые выводы имеют особые функции:

последовательная шина: 0 (RX) и 1 (TX). Выводы используются для получения (RX) и передачи (TX) данных TTL. Данные выводы подключены к соответствующим выводам микросхемы последовательной шины ATmega8U2 USB-to-TTL. Внешнее прерывание: 2 и 3. Данные выводы могут быть сконфигурированы на вызов прерывания либо на младшем значении, либо на переднем или заднем фронте, или при изменении значения. Подробная информация находится в описании функции `attachInterrupt()`;

ШИМ: 3, 5, 6, 9, 10, и 11. Любой из выводов обеспечивает ШИМ с разрешением 8 бит при помощи функции `analogWrite()`;

токовая защита разъема USB. В Arduino Uno встроен автоматический предохранитель, защищающий порт USB компьютера от токов короткого замыкания и сверхтоков. Хотя практически все компьютеры имеют подобную за-

щиту, тем не менее, данный предохранитель обеспечивает дополнительный барьер. Предохранитель срабатывает при прохождении тока более 500 мА через USB-порт и размыкает цепь до тех пор, пока нормальные значения токов не будут восстановлены.

В результате проведения исследований, направленных на создание автономной РТС для функционирования в недеретминированных условиях, создана концепция автономной роботизированной платформы для мониторинга окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 376 с.
2. Муртазов, А. К. Экологический мониторинг. Методы и средства : учеб. пособие / А. К. Муртазов. – Рязань, 2008. – 146 с.
3. Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / В. А. Шурыгин, В. А. Серов, Н. Г. Шаронов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 9. № 11. С. 41–44.
4. Об управлении движением шагающей машины со сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е. С. Брискин, И. П. Вершинина, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 168.
5. Гаврилов, А. Е. Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А. Е. Гаврилов, В. В. Жога, П. В. Федченко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 164–173.
6. Жога, В. В. Программные движения робота с ортогональным шагающим движителем / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 11 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 9. – С. 22–28.
7. Пат. 2435693 РФ, МПК В62D57/032. Шагающий движитель повышенной проходимости / А. Е. Гаврилов, В. В. Жога, В. Е. Павловский, П. В. Федченко ; ВолгГТУ. – 2011.
8. Пат. 87404 РФ, МПК В 62 D 57/02. Шагающий движитель для перемещения по местности со сложным рельефом / Е. С. Брискин, А. Е. Гаврилов, В. В. Жога, В. Е. Павловский ; ВолгГТУ. – 2009.
9. Гаврилов, А. Е. Роботизированная транспортная платформа с шагающим ортогональным движителем / А. Е. Гаврилов, Д. В. Голубев, А. С. Даншин // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 19 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 24 (127). – С. 15–22.
10. Адаптация алгоритмов технического зрения для систем управления шагающими машинами / С. А. Быков, А. В. Еременко, А. Е. Гаврилов, В. Н. Скакунов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 3. – С. 52–56.
11. Жога, В. В. Динамический алгоритм стабилизации походки шагающей машины / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов // Искусственный интеллект / НАН Украины. – 2008. – № 3. – С. 428–433.

УДК 004.3:681.5

В. В. Жога, Р. В. Анисков, А. А. Меркулов, В. Н. Скакунов

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ*

Волгоградский государственный технический университет

zhoga@vstu.ru, svn@vstu.ru

Рассматриваются вопросы построения систем управления электроприводом шагающих машин со следящей обратной связью по скорости и положению, организованной с помощью инкрементного энкодера и набора ультразвуковых и инфракрасных датчиков расстояний. Разработана функциональная схема системы управления, предложены способы определения основных информационных параметров, алгоритмы управления и их программная и аппаратная реализации для электроприводов шагающих роботов с ортогональными движителями.

Ключевые слова: робот с ортогональными движителями, система управления движителями, обратная связь по скорости и положению, сенсорные датчики.

V. V. Zhoga, R. V. Aniskov, A. A. Merkulov, V. N. Skakunov

CONTROL SYSTEM ELECTRIC DRIVER FOR THE WALKING ROBOT WITH ORTHOGONAL MOVERS

Volgograd State Technical University

Questions of construction management systems electric walking machines with servo loop speed and position, organized with the help of an incremental encoder and a set of ultrasonic and infrared sensors distances. Developed a functional diagram of a control system, a method for determining the main informative parameters, control algorithms and their hardware and software implementations for walking robots with orthogonal electric movers.

Keywords: the robot with the orthogonal movers, the control system, feedback speed and position, sensors.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00301-а).

Введение

Среди множества видов роботов можно выделить мобильные робототехнические системы, отличительной чертой которых является способность автономного перемещения в пространстве. Основным назначением является их использование при проведении разведывательных операций в недетерминированных средах, труднодоступных или же опасных для человека: в местах техногенных катастроф, при разборке завалов, в местах с повышенным радиационным фоном, при разминировании. Использование механизмов шагания в качестве движителей робота в совокупности с системой управления позволяет повысить профильную и опорную проходимость и дает возможность достаточно свободно перемещаться по сильно-пересеченной местности [1]. Для автономного перемещения шагающего робота необходимо располагать развитой сенсорной системой, позволяющей получать в реальном масштабе времени информацию о его состоянии и среде передвижения. На основе полученной информации разрабатываются процедура принятия решений, алгоритмы программных движений и система управления.



Рис. 1. Мобильный робот с шагающими движителями

Механическая конструкция робота

На кафедре теоретической механики ВолгГТУ разработана конструкция и система управления восьминогного шагающего робота с ортогональными движителями, показанного на рис. 1.

Робот состоит из верхнего корпуса, соединенного механизмом поворота с нижним корпусом. С каждой из частей корпуса связаны две пары направляющих, приводимых в движение приводами горизонтального перемещения. Осо-

бенности механической конструкции и характеристики приводов движителей приведены в работе [2].

В качестве приводов горизонтального перемещения и привода поворота используются приводы RTG060-004 и RTG060-100, изготовленные компанией «Maxon-motors». Каждый из приводов включает в себя серводвигатель, планетарный редуктор, тормоз, датчик положения (энкодер HEDL 9140, 500 имп/об). На опорных штангах смонтированы приводы вертикальной адаптации робота к несущей поверхности. В качестве привода вертикальных опор используются актуаторы CAT33Nx400x4AG1F производства шведской компании «SKF Group». Исполнительные механизмы имеют возможность работать независимо друг от друга. Питание робота осуществляется от аккумуляторных батарей общей емкостью 55 А/ч, напряжение силовой цепи составляет 24 В.

Математическая модель, описывающая динамику пространственного движения робота, построена на основе расчетной схемы, приведенной в работе [3]. Уравнения движения робота составлены в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Математическая модель робота предназначена для параметрической оптимизации геометрических, массовых и энергетических характеристик робота, анализа его поведения в процессе эксплуатации, а также для синтеза системы управления движением [4].

Система управления движителями шагающего робота

Принцип перемещения шагающего робота с ортогональными движителями может быть реализован с помощью линейных электрических двигателей постоянного тока – актуаторов, позволяющих совершать поступательное движение робота. В настоящее время существует большое количество различных по характеристикам и компоновке линейных актуаторов. Актуаторы комплектуются встроенными датчиками, в качестве которых выступают многооборотные потенциометры или энкодеры различных типов.

В большинстве задач, решаемых с помощью актуаторов, требуется регулирование скорости и точности позиционирования линейного привода. В шагающих роботах с ортогональными движителями основные проблемы возникают при управлении вертикальными опорами, текущее состояние которых должно быть адаптировано к неровностям несущей поверхности.

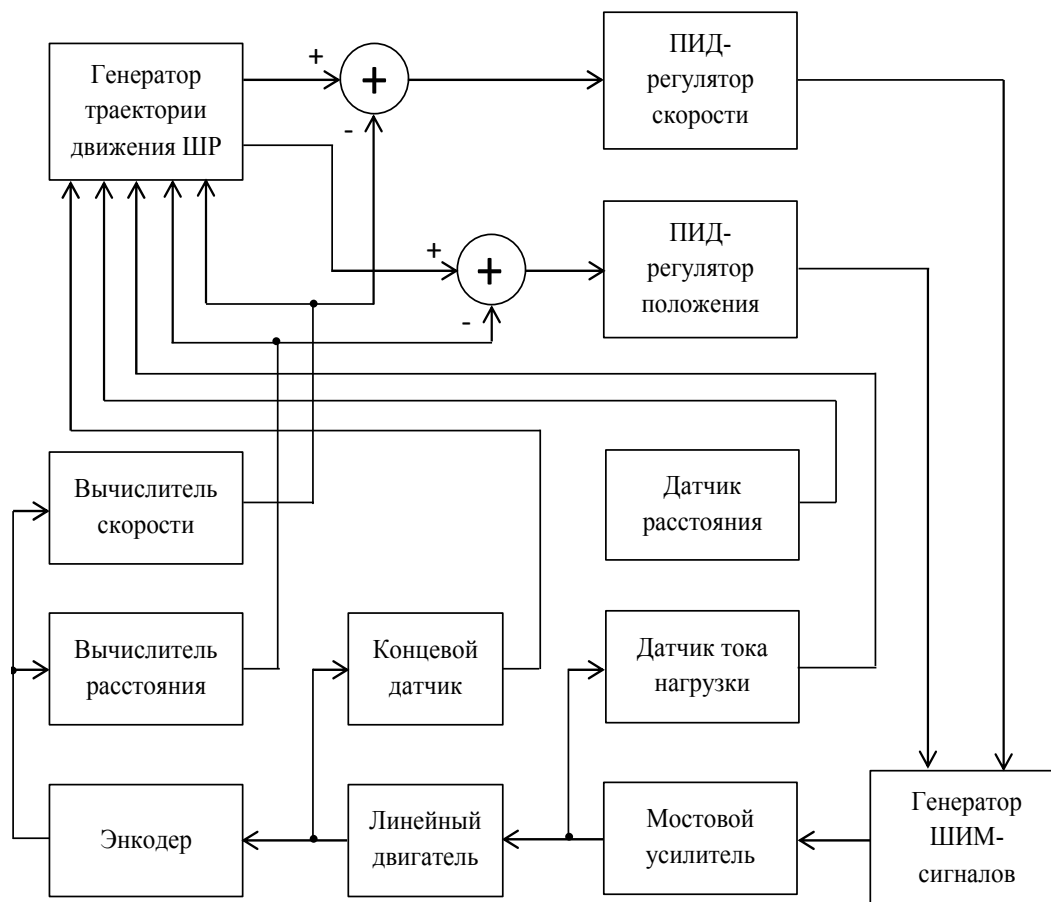


Рис. 2. Функциональная схема управления линейным актуатором

В настоящей работе рассматривается алгоритм управления вертикальной опорой шагающей машины на основе линейного актуатора типа CAT33Nx400x4AG1F с энкодерным датчиком, генерирующим на выходе стандартный цифровой сигнал. Система управления актуатором построена на основе отладочной платы STM32F3Discovery. Установленный на плате 32-разрядный контроллер STM32F303VCT6 имеет архитектуру ARM CortexTM M4 с поддержкой функций DSP и модулем FPU для вычислений с плавающей запятой, достаточно большие вычислительные ресурсы и развитый физический интерфейс. Различные алгоритмы перемещения шагающего робота реализуются с помощью разработанных программных средств, объединенных в блок генератора траектории движения шагающего робота, показанного на рис. 2.

На рис. 2 приведена функциональная схема управления линейным актуатором вертикальной опоры. На схеме показаны основные элементы системы управления электроприводом. Большая часть из них, такие как генератор тра-

ектории движения шагающего робота, вычислители скорости и расстояния, ПИД-регуляторы реализованы программными средствами на управляющем контроллере.

Основным информационным параметром в системе управления являются показания датчика обратной связи – энкодера. В общем случае на выходе энкодера при вращении вала генерируются импульсы определенной частоты, зависящей от скорости вращения. Для линейных двигателей указывается разрешение энкодера, заданное количеством импульсов, выдаваемых им при перемещении штока на определенное расстояние. Размерность разрешения – импульсы/мм. В линейных актуаторах типа CAT33Nx400x4AG1F применяются двухканальные энкодеры, что позволяет определять не только скорость, но и направление перемещения штока.

На рис. 3 приведена форма импульсов двухканального энкодера, генерирующего на выходе два сдвинутых на половину периода друг относительно друга сигнала по каналам А и В.

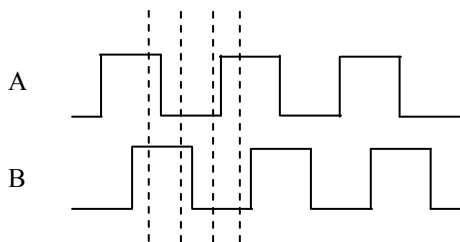


Рис. 3. Форма импульсов двухканального энкодера

Скорость перемещения и текущее положение штока вычисляются по данным от энкодера подсчетом количества импульсов из двух каналов за фиксированные интервалы времени. Вычислители скорости и расстояния (рис. 2) реализованы программно с помощью платы управления STM32F3Discovery. Некоторые микроконтроллеры оснащены специализированной периферией для работы с энкодерами, позволяющими при использовании соответствующих энкодерных входов вычислять скорость следования импульсов с последующим пересчетом в требуемые параметры.

В актуаторе CAT33Nx400x4AG1F встроенный энкодер инкрементного типа, поэтому при включении привода для оценки текущего положения штока должны применяться вспомогательные датчики расстояния. Это могут быть обычные контактные концевые датчики, но в данном случае перед началом движения робота необходимо включать двигатель с целью перемещения актуатора в крайнее положение для фиксации нуля. Основной недостаток этого подхода состоит в необходимости повторной калибровки всякий раз, когда по каким-либо причинам устройство выключалось. Конструкция вертикальной опоры также не позволяет установить концевые датчики других типов, например, датчики давления. Для решения данной проблемы применяются бесконтактные датчики расстояния, закрепленные на опоре. Дат-

чик расстояния, показанный на функциональной схеме (рис. 2), построен на инфракрасном дальномере SHARP-GP2Y0A21YK0F и ультразвуковом датчике расстояния HC-SR04.

Задача перемещения привода на определенное расстояние L_x решается с помощью вспомогательных датчиков. Определяется начальное положение привода (L_0). Нулевым положением привода принимается его полностью убранное состояние. Таким образом, на входе алгоритма известны следующие данные: N_e – разрешение энкодера (импульсы/мм); L_0 – начальное положение привода (мм); L_x – требуемое положение привода (мм). С помощью подсчета импульсов энкодера определяется текущее пройденное расстояние и положение привода. Если количество полученных импульсов N , то текущее положение актуатора L_x , т. е. пройденное им расстояние с учетом начальной позиции равно

$$L_x = L_0 + \frac{N}{N_e}.$$

Для адаптации вертикальных опор шагающей машины к поверхности необходимо предусмотреть плавное опускание опоры при приближении к несущей поверхности. При управлении двигателем постоянного тока с помощью ШИМ-сигналов минимальная величина заполнения ШИМ-сигнала, при которой возможно вращение двигателя на минимальной скорости, обозначается как PWM_{min} (%), а максимальная степень заполнения ШИМ-сигнала – PWM_{max} (%). Для плавной остановки двигателя в нужном положении необходимо сформировать соответствующий закон изменения ШИМ-сигнала при приближении к заданному положению. Расстояние, с которого следует начать замедление, обозначается как δL (мм), а зависимость изменения коэффициента заполнения ШИМ-сигнала от расстояния как $PWM(L_x)$.

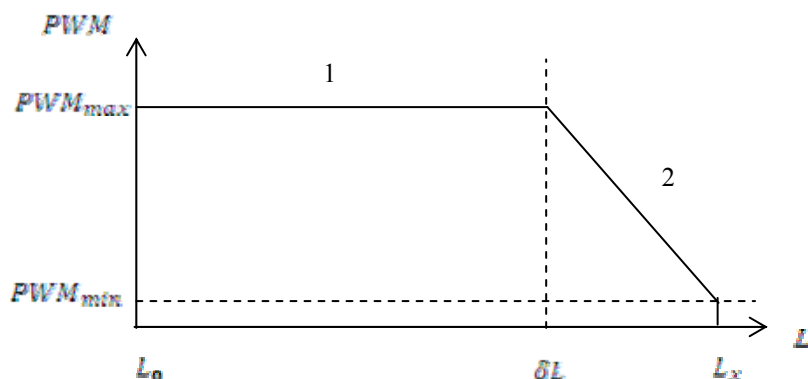


Рис. 4. График изменения ШИМ-сигнала

На рис. 4 представлен график линейного закона изменения ШИМ-сигнала в зависимости от приближения привода к заданному положению. График состоит из двух участков: 1 – рав-

номерное движение с максимально возможной скоростью; 2 – участок замедления.

В данном примере закон изменения ШИМ-сигнала можно записать в виде:

$$PWM(L_x) = \begin{cases} PWM_{\max} & \text{при } L_0 < L_x \leq \delta L \\ PWM_{\max} - \frac{(PWM_{\max} - PWM_{\min})}{(L - \delta L)}(L_x - \delta L) & \text{при } L_x > \delta L \end{cases}$$

При реализации приведенного алгоритма требуется решить задачу поддержания частоты вращения привода на заданном значении, так как реальная скорость вращения двигателя может меняться даже при неизменной величине заполнения ШИМ-сигнала. Данное явление может происходить при изменении значения напряжения, питающего привод, люфте механизмов актуатора и по другим причинам. Рассмотренный алгоритм управления реализован на языке программирования C++, а для создания проекта выбрана среда разработки KeilVision.

Поддержание заданной скорости привода является типичной задачей регулирования, решаемой классическим ПИД-регулятором. ПИД-регулятор управляет процессом, основываясь на его истории состояний и скорости изменения. В этом случае при действии статического возмущения система становится астатической, а динамические свойства системы управления улучшаются. Возможная ошибка учитывается тремя составляющими: в настоящем времени пропорциональной составляющей, опираясь на ее изменение в прошлом, интегральной составляющей и, прогнозируя ее будущее изменение, дифференциальной составляющей.

Общий вид формулы простого ПИД-регулятора для управления одномерным объектом [5]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}.$$

Для дискретной реализации алгоритма ПИД-регулятора удобно перейти к форме:

$$U(n) = K_p E(n) + K_p K_{ip} T \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{K_p K_{dp}}{T} (E(n) - E(n-1)).$$

где T – время дискретизации; E – функция ошибки.

Часто в качестве параметров ПИД-регулятора используются постоянные интегрирования и дифференцирования, имеющие размерность времени:

$$T_i = \frac{1}{K_{ip}} \text{ и } T_d = K_{dp}.$$

Используя замену

$$K_i^{discr} = \frac{K_p T}{T_i}, \quad K_p^{discr} = \frac{K_p T_d}{T},$$

можно записать:

$$U(n) = K_p E(n) + K_i^{discr} \sum_{k=0}^n E(k) + K_p^{discr} (E(n) - E(n-1)).$$

На рис. 5 представлена структурная схема системы автоматического управления линейного актуатора с энкодерным датчиком обратной связи по скорости вращения. Скорость привода вычисляется путем обработки сигнала с энкодера актуатора на микроконтроллере, управляющим всей системой. Сигналы управления (УШИМ) двигателем формируются мостовым усилителем мощности на интегральной схеме VNH2SP30-E.

Подбор коэффициентов ПИД-регулятора может производиться как экспериментально, так и путем синтеза регулятора согласно методам теории автоматического управления по модели реальной системы [5, 6].

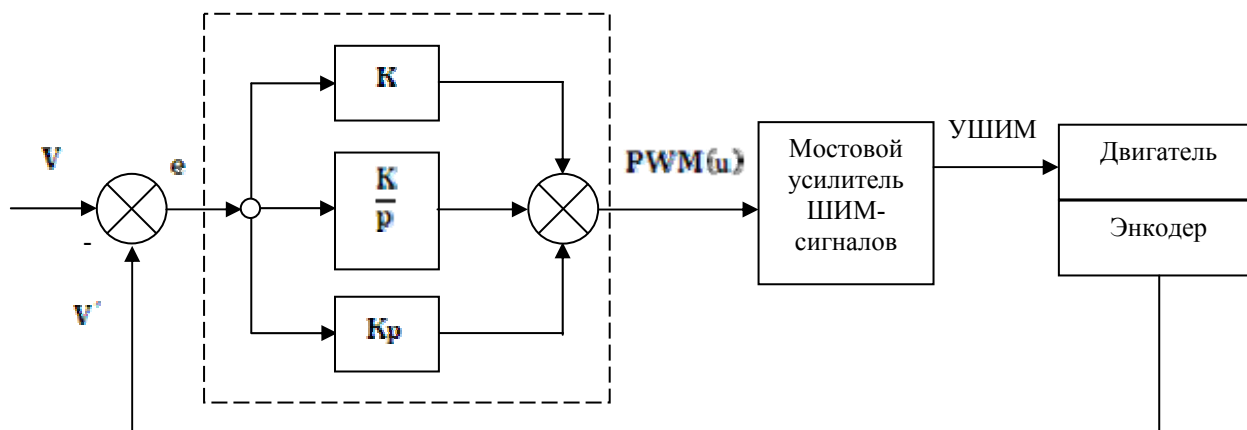


Рис. 5. Структурная схема системы автоматического управления

Дискретный ПИД-регулятор считает рассогласование, вычисляет и выдает управляющий сигнал за время выборки T . Алгоритм дискретного ПИД-регулятора описан в библиотеке `pid.h` [7]. С помощью этих программ моделировались ступенчатый и линейный законы изменения скорости перемещения штока линейного привода на этапе замедления. Установлено, что дифференциальная составляющая пренебрежимо малая величина, а угол наклона линейной функции незначительно влияет на характер переходных процессов.

Заключение

Предложенный алгоритм позволяет решить задачу управления линейным приводом в различных ситуациях, требующих точного позиционирования и плавной остановки. Достаточно просто изменить предложенный алгоритм для поддержки не только плавного замедления, но и плавного пуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварийно-спасательный робот высокой профильной проходимости / В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Еременко, П. В. Федченков, В. М. Герасун, И. А. Несмиянов, В. В. Дяшкин-Титов, В. Е. Павловский // Экстремальная

робототехника : труды Междунар. научн.-техн. конф. – СПб. : Политехника-сервис, 2011. – С. 138–141.

2. Жога В. В. Аппаратная реализация бортовой системы управления шагающим роботом с ортогональными движителями / В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Еременко, А. А. Кравчук // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 19 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 24. – С. 29–36.

3. Жога В. В. Динамика маршевых режимов движения робота с ортогональными движителями / В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Филимонов, Д. В. Голубев // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 8. – С. 14–22.

4. Жога В. В. Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов, А. В. Еременко // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 6. – С. 28–32.

5. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2009. – 609 с.

6. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / В. Я. Ротач. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.

7. Лебедев, М. Б. CodeVision AVR: пособие для начинающих / М. Б. Лебедев. – М. : Додэка-XXI, 2008. – 592 с.

УДК 629.1.03

А. В. Малолетов, Е. С. Брискин

УПРАВЛЕНИЕ ЦИКЛОВЫМ ШАГАЮЩИМ ДВИЖИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ШАРНИРНОГО ЧЕТЫРЕХЗВЕННИКА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ДЛИНОЙ КОРОМЫСЛА*

Волгоградский государственный технический университет

maloletov@gmail.com, dtm@vstu.ru

Решена задача синтеза законов управления цикловым шагающим двигателем, основанным на четырехзвенных механизмах шагания с управляемой длиной коромысла, обеспечивающих прямолинейность траектории стопы в опорной фазе с учетом требования минимизации неравномерности горизонтальной скорости стопы.

Ключевые слова: шагающая машина, шагающий робот, шагающий движитель, механизм шагания, робототехника, управление движением.

A. V. Maloletov, E. S. Briskin

CONTROL OF CYCLIC WALKING MOVER BASED ON THE FOUR-LINK MECHANISM WITH VARIABLE-LENGTH ROCKER

Volgograd State Technical University

Solved the problem of synthesis of control laws cyclic walking mover based on the four-link mechanism with controlled length of rocker ensures straight foot path in the supporting phase with the requirement to minimize uneven horizontal velocity of the foot.

Keywords: walking vehicle, walking robot, walking mover, mechanism of walking, robotics, control of motion.

Введение

Цикловые шагающие движители, построенные на основе четырехзвенных рычажных механизмов шагания (рис. 1, а), обладают как достоинствами, так и недостатками, по сравнению с другими типами шагающих движителей. Среди достоинств можно отметить высокую надежность, простоту управления [1, 2]. Среди недостатков – неизменяемая траектория опор-

ной точки и связанное с этим ограничение в профильной проходимости [3], значительные вертикальные перемещения корпуса на каждом шаге, неравномерность горизонтального движения [4], неустойчивость курсового движения [5], необходимость учитывать особенности движителя при построении программных движений корпуса машины [6].

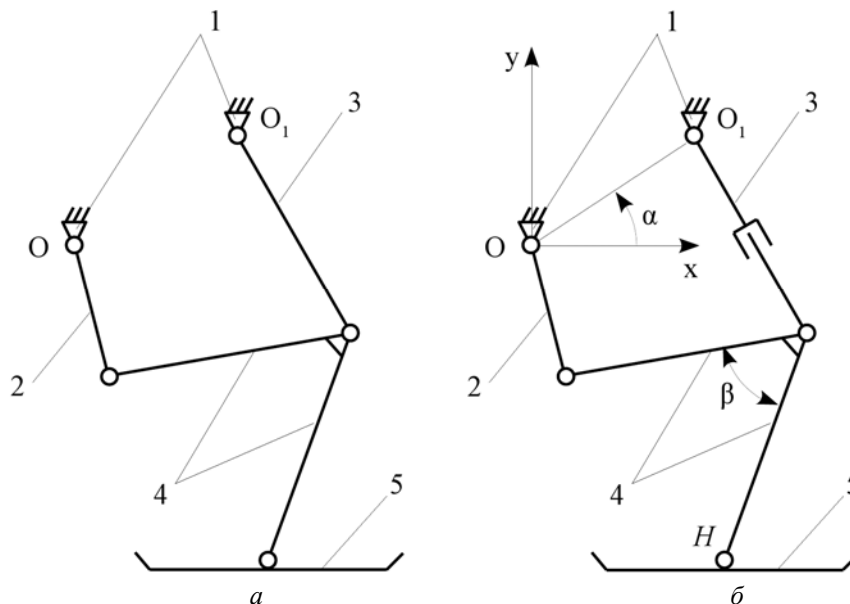


Рис. 1. Механизмы шагания:

а – четырехзвенный механизм; б – четырехзвенный механизм с изменяемой длиной коромысла;
1 – опора (корпус машины); 2 – кривошип; 3 – коромысло; 4 – шатун; 5 – стопа

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках базовой части госзадания № 2014/16 (проект № 3012)

Требования, предъявляемые к цикловым шагающим движителям, являются противоречивыми, поэтому известные способы улучшения показателей, основанные на использовании дополнительных механизмов в трансмиссии [7] или в подвеске движителя [8], а также на оптимизации управления движением механизмов [3, 9, 10], не устраняют указанные недостатки в полной мере. Отдельные показатели можно значительно улучшить, используя шестизвенные рычажные механизмы шагания [11, 12]. Синтез аналогичного по свойствам механизма другого типа [13, 14] потенциально позволяет устранить все указанные недостатки, однако требует существенного усложнения системы управления, а его практическое использование затруднено с технологической точки зрения.

1. Постановка задачи

Ставится задача управления цикловым шагающим движителем, основанным на четырехзвенных механизмах шагания с управляемой длиной коромысла (рис. 1, б).

Такой движитель может работать в двух режимах. В одном режиме дополнительная степень свободы в коромысле реализуется и при надлежащем управлении позволяет эффективно решать проблемы проходимости, энергетической эффективности и комфортабельности. В другом режиме длина коромысла фиксируется, и движитель работает с одной управляемой степенью свободы, аналогично исходному механизму (рис. 1, а). Система управления такого движителя усложняется по сравнению с исходным цикловым движителем, но остается суще-

ственно проще, чем системы управления многостепенными шагающими движителями.

2. Геометрия и кинематика механизма шагания

Вводится система отсчета Oxy , связанная с корпусом машины (рис. 1, б). Через $l_1, l_2, l_3, l_{42}, l_{45}$ обозначаются соответствующие длины звеньев механизма. Через α и β обозначаются соответственно угол между осью x и направлением на точку O_1 и угол между частями 4 звена. Через φ обозначается угол поворота кривошипа, измеряемый от положительного направления оси x . Механизм имеет две управляемые степени свободы, в качестве независимых обобщенных координат выбираются угол φ и длина l_3 .

Решение геометрической задачи позволяет записать любые координаты механизма (например, координаты опорной точки H , как функции независимых обобщенных координат):

$$\begin{aligned} x_H &= x_H(\varphi, l_3), \\ y_H &= y_H(\varphi, l_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Основной характеристикой циклового шагающего движителя является вид траектории опорной точки в относительном движении относительно корпуса машины. При значениях геометрических параметров, соответствующих размерам движителей шагающей машины «Восьминог», и фиксированном значении l_3 ($l_1=846$ мм; $l_2=268$ мм; $l_3=620$ мм; $l_{42}=620$ мм; $l_{45}=620$ мм; $\alpha=54^\circ$; $\beta=71^\circ$) траектория опорной точки имеет вид, показанный на рис. 2.

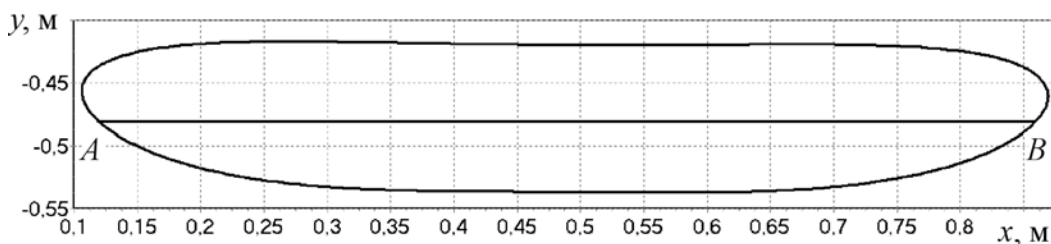


Рис. 2. Траектория опорной точки в относительном движении относительно корпуса машины.

Горизонтальная линия AB – уровень смены ног

В составе шагающих машин «Восьминог» рассмотренные механизмы шагания сгруппированы попарно в шагающие движители. При этом кривошипы механизмов шагания жестко связаны и развернуты друг относительно друга на 180 градусов. Таким образом, шагающий движитель имеет две стопы, точки крепления которых движутся по одинаковым траекториям

в противофазе друг к другу. Переступание происходит в тот момент, когда одна из стоп находится в положении A , а вторая – в положении B (рис. 2).

Разница между уровнем смены ног и нижней точкой траектории определяет вертикальные перемещения корпуса машины на каждом шаге. Для указанных размеров механизма вер-

тикальные перемещения составляют 56 мм и требуют значительных энергозатрат.

В отсутствие управления длиной коромысла и при постоянной угловой скорости вращения кривошипа горизонтальная скорость опорной точки на нижнем опорном участке траектории (и, соответственно, корпуса машины) изменяется за цикл примерно в три раза (рис. 3). При соответствующем управлении угловой скоростью кривошипа можно добиться равномерного движения машины в горизонтальном направлении. Однако это требует увеличения и уменьшения угловой скорости дважды за один оборот кривошипа по доста-

точно сложному закону, что значительно усложняет систему управления и подходит не для всех типов двигателей.

В то же время абсолютная горизонтальная скорость опорной точки второго механизма шагания, который находится в фазе переноса, меняется согласно графику 2 рис. 3. В моменты переступания эта скорость уменьшается до нуля, что означает безударный отрыв и безударное касание стопы с грунтом. Следует отметить, что безударный отрыв и касание происходит только в горизонтальном направлении. В вертикальном направлении от удара избавиться не удастся.

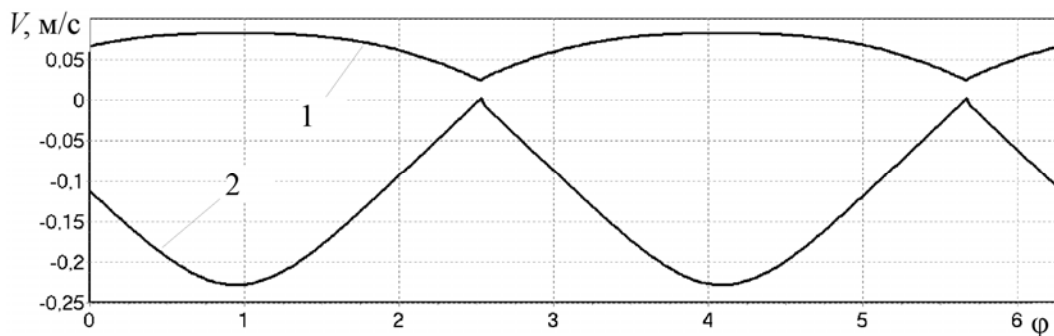


Рис. 3. Горизонтальная скорость стопы в относительном движении в опорной фазе (1) и скорость стопы в абсолютном движении в фазе переноса (2) в зависимости от угла поворота кривошипа

3. Управление траекторией стопы в опорной фазе

Варьируя длину коромысла в относительно небольшом диапазоне (± 40 мм от базового значения $l_3 = 620$ мм), можно получить сдвиг траектории опорной точки в вертикальном направлении примерно ± 50 мм от первоначальной траектории. Область доступных положений показана на рис. 4.

Для устранения недостатка движителя, связанного с вертикальными перемещениями

корпуса машины, строятся законы управления ведущими звеньями. В пределах опорной фазы длина коромысла изменяется относительно базового размера так, что вертикальная координата опорной точки остается постоянной и равной уровню переступания. В пределах фазы переноса длина коромысла фиксируется в базовом значении, и опорная точка движется по исходной траектории. Угловая скорость кривошипа остается постоянной в течение всего цикла.

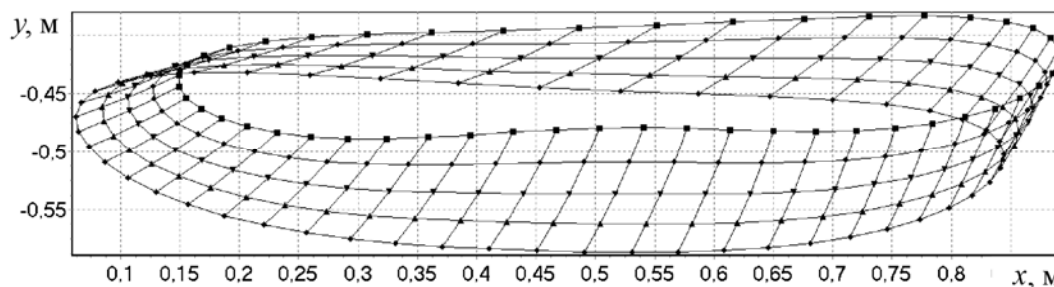


Рис. 4. Область возможных положений опорной точки механизма при управлении двумя приводами относительно корпуса машины

Таким образом, управление сводится к получению закона изменения длины коромысла

как функции от угла поворота кривошипа. Синтез этого закона осуществляется в результате

решения обратной задачи кинематики. Требуемая траектория показана на рис. 5, а полученный закон изменения длины коромысла – на рис. 6.

Полученный закон управления позволяет устранить вертикальные перемещения корпуса машины. Однако неравномерность горизонтальной скорости увеличивается по сравнению с ба-

зовым механизмом. Кроме того, абсолютная горизонтальная скорость стопы в момент наступания на грунт значительно отличается от нуля. Обеспечить равномерность горизонтальной скорости можно за счет управления приводным двигателем, однако эффективнее добиться уменьшения неравномерности при постоянной угловой скорости вращения двигателя.

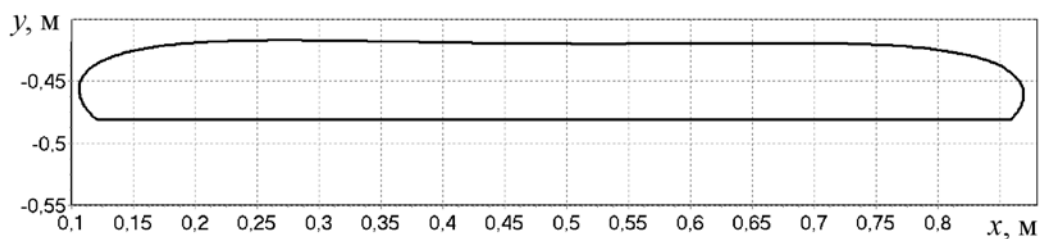


Рис. 5. Траектория опорной точки относительно корпуса, обеспечивающая отсутствие вертикальных перемещений машины на каждом шаге

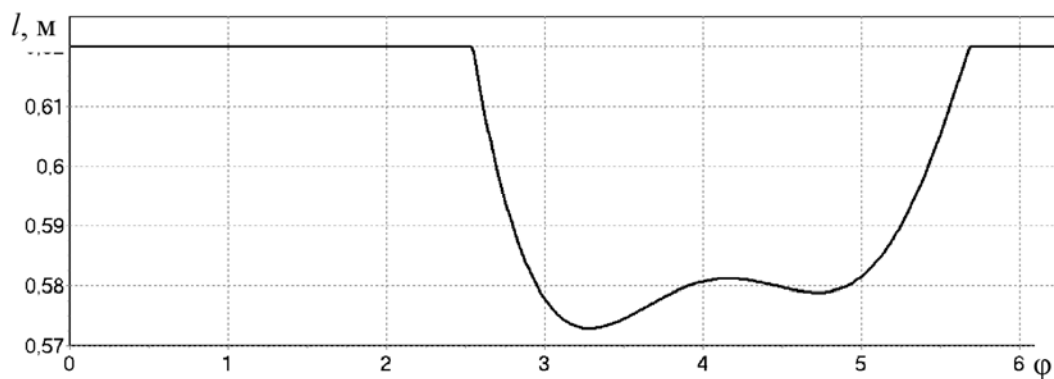


Рис. 6. Закон управления длиной коромысла в зависимости от угла поворота кривошипа, требуемого для траектории, показанной на рис. 5.

4. Управление горизонтальной скоростью в опорной фазе

Анализ зависимости горизонтальной скорости от угла поворота кривошипа (рис. 7) показывает, что низкие значения скорости наблюдаются на сравнительно небольшом участке траектории в конце опорной фазы. А на большей части опорного участка, в том числе и в его начале,

скорость близка к максимальной. Следует отметить, что понятия «начало» и «конец» опорной части являются условными и в данном случае соответствуют вращению кривошипа против часовой стрелки. При вращении кривошипа в противоположном направлении начало и конец опорного участка меняются местами.

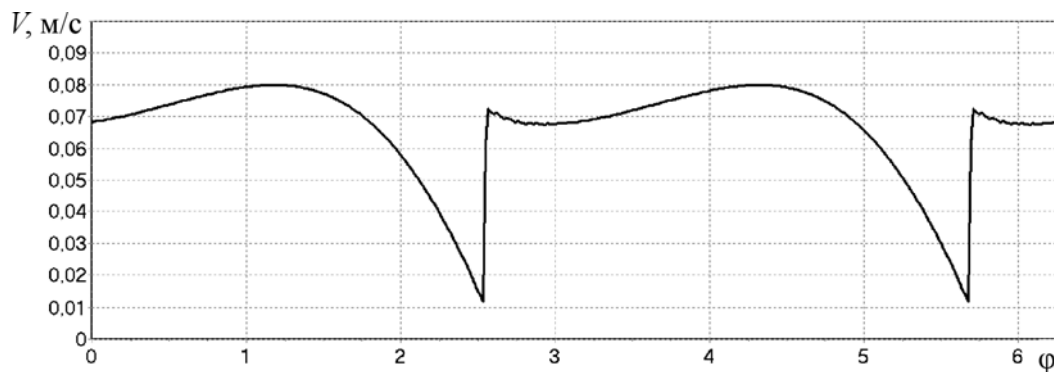


Рис. 7. Горизонтальная скорость стопы в относительном движении в опорной фазе в зависимости от угла поворота кривошипа, соответствующая закону управления коромыслом, показанному на рис. 7

Для устранения отмеченного недостатка за счет соответствующего управления длиной коромысла фазы начала и окончания опорного участка траектории смещаются так, что опорный участок начинается и заканчивается при меньших значениях угла поворота кривошипа. При этом на закон управления накладывается условие: длина прямолинейного участка траектории должна соответствовать 180 градусам поворота кривошипа, что обеспечит нахождение в контакте с грунтом в каждый момент времени только одной ноги.

Изменение фазы начала опорного участка влияет на неравномерность горизонтальной скорости. Определяя неравномерность горизонтальной скорости на опорном участке как отношение разности максимального $v_{\max}$ и минимального $v_{\min}$ значения к среднему v_{med} значению:

$$\eta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\text{med}}}, \quad (2)$$

можно получить зависимость неравномерности от начальной фазы (рис. 8) и выбрать оптимальную фазу.

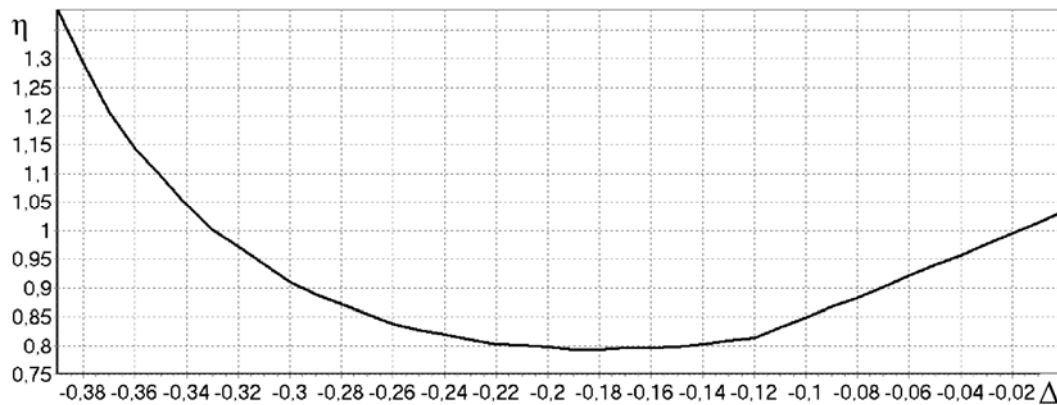


Рис. 8. Неравномерность горизонтальной скорости в зависимости от сдвига начальной фазы опорного участка траектории

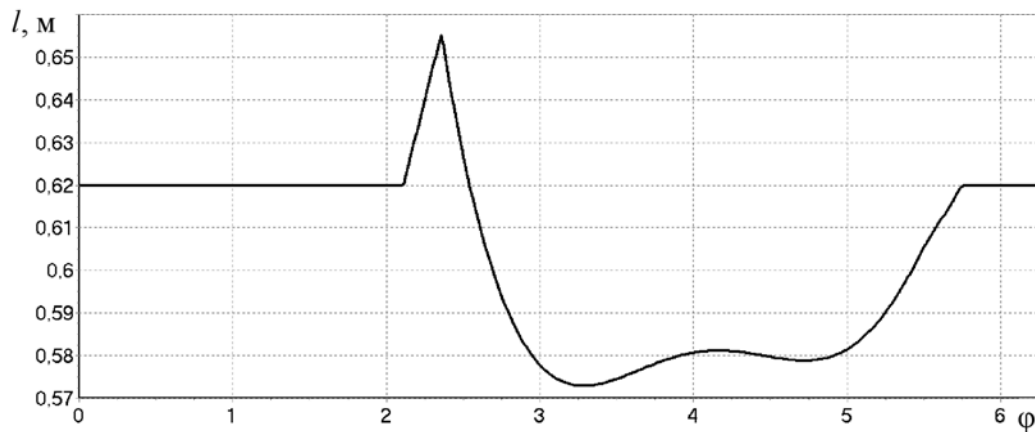


Рис. 9. Закон управления длиной коромысла

Один из возможных законов управления, соответствующий сдвигу начальной фазы на $-0,18$ рад, показан на рис. 9.

Траектория опорной точки в относительном движении, скорости опорной точки показаны на рис. 10 и 11.

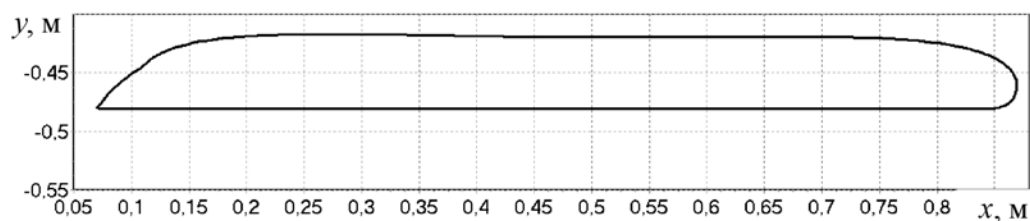


Рис. 10. Траектория опорной точки

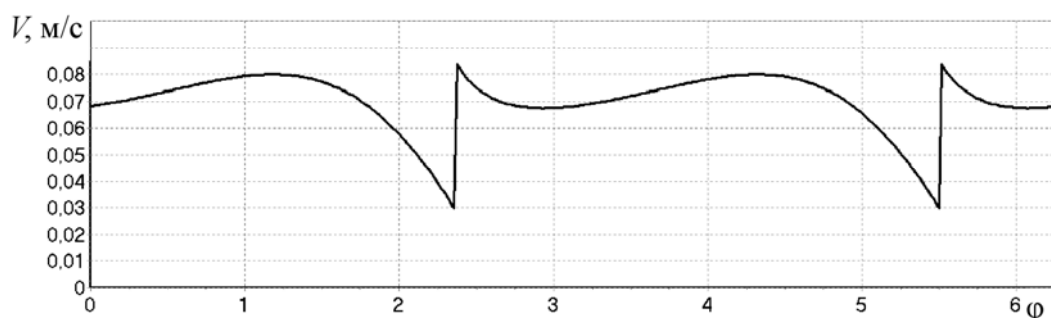


Рис. 11. Горизонтальная скорость стопы в относительном движении в опорной фазе, соответствующая закону управления коромыслом, показанному на рис. 9

Следует отметить, что при синтезированном законе управления длиной коромысла абсолютная горизонтальная скорость стопы в момент переступания отличается от нуля. Таким образом, имеет место удар стопы по грунту в горизонтальном направлении.

5. Выводы

Рассмотренный шагающий движитель на основе шарнирного четырехзвенника с изменяемой длиной коромысла позволяет управлять траекторией движения опорной точки, обеспечивая адаптацию движителя к грунту, увеличивая профильную проходимость шагающей машины и устраняя вертикальные перемещения корпуса машины при ходьбе.

Неравномерность горизонтальной скорости остается на том же уровне, что и для базового шагающего движителя с фиксированной длиной коромысла, следовательно не наблюдается улучшения курсовой устойчивости машины. В то же время возникает удар стопой по грунту в момент наступания, отсутствующий у базового движителя и приводящий к повышенным нагрузкам на детали механизма.

Таким образом, использование дополнительной управляемой степени свободы может быть оправданным в тех случаях, когда по эксплуатационным соображениям требуется обеспечить горизонтальность движения корпуса, или в тех случаях, когда требуется большая высота шага.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мобильный робототехнический комплекс на базе многоопорной шагающей машины: динамика движений / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, А. В. Тельдеков // Мехатроника : Механика. Автоматика. Электроника. Информатика. – 2001. – № 3. – С. 19–27.
2. Шагающая машина «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов, К. В. Шаров, Н. Е. Фролова, Д. Н. Покровский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 48.
3. Брискин, Е. С. О выборе рациональных алгоритмов управления движением шагающих машин / Е. С. Брискин, А. В. Малолетов, А. Ю. Савин // Искусственный интеллект. – 2001. – № 3. – С. 593–598.
4. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч. 2. Динамика движения шагающих машин серии «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 6. – С. 19–26.
5. Курсовая устойчивость шагающей машины «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. А. Шурыгин, В. В. Жога, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1–3. – С. 56–58.
6. Выбор алгоритма управления автономным движением шагающей машины с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Д. Н. Покровский, Н. Г. Шаронов, В. А. Шурыгин // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – С. 357.
7. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями: монография / Е. С. Брискин, В. В. Жога, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов ; под ред. Е. С. Брискина. – М.: Машиностроение, 2009. – 191 с.
8. Чернышев, В. В. Многофункциональный механизм поворота для транспортно-технологических шагающих машин / В. В. Чернышев, А. В. Малолетов // Изв. вуз. Машиностроение. – 2001. – № 1. – С. 48–52.

9. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, А. В. Малолетов, В. В. Чернышев // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2014. – № 1. – С. 18–25.

10. Задачи поиска энергетически эффективных алгоритмов движения шагающих машин / Калинин Я. В., Устинов С. А., Шкутан Д. В. // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 24 (127). – С. 36–38.

11. Six Link Mechanisms for the Legs of Walking Machines Bessonov A. P., Umnov N. V., Korenovsky V. V. and others // Thirteenth CISM – IFToMM Symposium on the Theory and Practice of Robots and Manipulators – Ro.Man.Sy. 2000: Book of Abstracts, July 3–6, 2000. – Zakopane, Poland, 2000. – P. 347–354.

12. Методы синтеза многозвенных механизмов движителей и рулевых устройств шагающих транспортных средств / Кореновский В. В., Морозов Н. Г., Сильвестров Э. Е. // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 24 (127). – С. 47–52.

13. Брискин, Е. С. Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А. В. Леонард, А. В. Малолетов // Теория механизмов и машин. – 2011. – Т. 9. № 17. – С. 14–24.

14. Разработка системы управления для поворотно-циклового шагающего движителя / Леонард А. В., Павловский В. Е. // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 24 (127). – С. 52–57.

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
Волгоградского государственного технического университета
№ 12 (139), 2014 г.

С е р и я «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
Выпуск 21

Межвузовский сборник научных статей

Редактор *Л. Н. Рыжих*
Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2014 г. (научные издания). Поз. № 14н.
Подписано в печать 03.09.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,96. Уч.-изд. л. 21,20.
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 полупетельный.

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*, *b*, 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.