

<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>1</b>
Анализ распределения интервалов между выбросами случайного процесса и возможность построения систем ближней локации с шумовой синхронизацией	<i>Лебедев Е.Г., Серикова М.Г.</i> 1
Расчет перестраиваемого зеркального объектива для импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора	<i>Новоселов Е.В., Беспалов В.Г.</i> 6
Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания	<i>Коняхин И.А., Копылова Т.В.</i> 9
Исследование влияния формы сферического отражателя на точность измерения перемещений поршня в цилиндре клапана	<i>Горбачёв А.А., Кулешова Е.Н.</i> 12
<b>ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА .....</b>	<b>17</b>
Статистические свойства гипотез, порождаемых нейронной сетью со связями, реализуемыми методом голографии Фурье	<i>Бекяшева З.С., Васильев В.Н., Павлов А.В.</i> 17
Фокусирующие свойства фрактальных зонных пластинок	<i>Музыченко Я.Б., Зинчик А.А., Стафеев С.К.</i> 22
Волноводные наноструктуры во внешнем электрическом поле	<i>Матвеев Д.Г.</i> 28
<b>АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ .....</b>	<b>32</b>
Формирование интервальных векторно-матричных модельных представлений антропокомпонентов-операторов в составе сложных динамических систем	<i>Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В.</i> 32
Выделение информативных признаков сигналов сейсмических сенсоров пассивной локации	<i>Козлов Э.В., Левковская Т.В.</i> 36
Точечный спектр оператора Шредингера для двух соединенных полукристаллов с потенциалами Кронига–Пенни	<i>Скорынина А.Н.</i> 41
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА.....</b>	<b>47</b>
Особенности процесса изготовления прецизионных узлов гироскопов	<i>Яковлева С.А., Гаврюсов В.И., Щербак А.Г.</i> 47
<b>КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>51</b>
Решение задач экологического нормирования с применением информационных технологий	<i>Веденина Н.В.</i> 51
Алгоритм анализа геофизической обстановки	<i>Демин А.В., Войток Т.Е., Климанов В.А.</i> 56
Реалистичное моделирование свободной водной поверхности на адаптивных сетках типа «восьмеричное дерево»	<i>Никитин К.Д.</i> 60
Методы маркирования цифровых изображений в частотной области	<i>Тропченко А.Ю., Ван Цзянь</i> 64
Инструментальный комплекс для проектирования параллельных масштабируемых программ численных расчетов	<i>Исупов К.С., Князьков В.С.</i> 68
Валидация автоматов с переменными на функциональных языках программирования	<i>Малаховски Я.М., Корнеев Г.А.</i> 73
Система порождения документов в форматах HTML, MHT и WORD PROCESSING ML	<i>Деев Д.В., Окуловский Ю.С.</i> 77
Разработка проблемно-ориентированных процессоров	<i>Ковязин Р.Р., Постников Н.П.</i> 81
Метод количественной оценки контраста цифрового изображения	<i>Беззубик В.В., Белащенко Н.Р., Никифоров В.О.</i> 86
<b>СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....</b>	<b>89</b>
Алгоритм вычисления пороговых значений для повышения автоматизма систем распознавания графических образов	<i>Гатчин Ю.А., Москаленко С.В.</i> 89
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>94</b>
Исследование влияния параметров зондов сканирующего зондового микроскопа на визуализацию рельефа поверхности биологических объектов	<i>Стоняга А.В., Лобова И.Н.</i> 94
<b>МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.....</b>	<b>98</b>
Подходы к обеспечению информационной безопасности в открытых распределенных мультиагентных виртуальных бизнес-средах	<i>Маслобоев А.В.</i> 98
<b>НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ .....</b>	<b>104</b>
Автоматизация системы управления виртуальной образовательной средой	<i>Куркин А.В., Шеламова Т.В.</i> 104
<b>ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ .....</b>	<b>110</b>
Конкурентоспособность малого бизнеса Смоленской области: отраслевой и кластерный анализ	<i>Чугунова Е.В.</i> 110
Роль стратегических решений в системе управления коммерческой организацией	<i>Васюхин О.В., Зарубина Ж.Н.</i> 114
Концептуальные основы обеспечения конкурентоспособности предприятия	<i>Павлова Е.А., Сушилова Ю.Н.</i> 117
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ.....</b>	<b>120</b>
Оптимизация расположения пучка осей при экспериментальном определении элементов тензора инерции	<i>Шаховал С.Н., Мельников Г.И.</i> 120
Параметрическая оптимизация сложных технологических процессов оптического производства с использованием технологий искусственных нейронных сетей	<i>Соловьев Д.В., Бондаренко И.Б.</i> 121
Оценка ущерба от воздействия компьютерных атак на территориально-распределенные сети, использующие защищенные мобильные автоматизированные рабочие места	<i>Алексеев Д.А.</i> 122
Интеллектуальные технологии распределенных вычислений для моделирования сложных систем	<i>Марьин С.В., Ларченко А.В., Ковальчук С.В.,</i> 123 <i>Князьков К.В., Болгова Е.В., Бухановский А.В.</i>
Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики морских объектов в экстремальных условиях эксплуатации	<i>Безгодов А.А., Иванов С.В., Бухановский А.В.</i> 125
<b>SUMMARY .....</b>	<b>127</b>



**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР.....**

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ .....**

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,  
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартамян,  
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин,  
к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова, д.т.н., профессор А.В. Демин,  
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),  
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,  
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,  
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,  
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,  
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.т.н., профессор П.П. Парамонов,  
д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин, д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина,  
д.т.н. О.А. Степанов, д.т.н., профессор В.Л. Ткалич,  
д.т.н., профессор А.А. Шалыто, д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь Г.О. Артемова

Редактор Н.Ф. Гусарова

Перевод Н.Г. Лещикова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО, комн. 330

Телефон / факс (812) 233 45 51

<http://books.ifmo.ru/ntv/>

E-mail: [karmanov@mail.ifmo.ru](mailto:karmanov@mail.ifmo.ru)

УДК 535:621.373.826

### АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ВЫБРОСАМИ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ЛОКАЦИИ С ШУМОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Е.Г. Лебедев, М.Г. Серикова

Исследуются законы распределения вероятностей длительности интервалов между выбросами нормальных флуктуаций при различных энергетических спектрах процесса и разных отсчетных уровнях. Рассмотрена возможность применения полученных результатов в системах ближней лазерной локации.

**Ключевые слова:** ближняя оптическая локация, выбросы случайного процесса.

#### Введение

Функционирование систем ближней оптической локации сопровождается рядом трудностей, обусловленных спецификой работы в ближней зоне. Как правило, эти устройства функционируют в условиях пространственного перемещения взаимодействующих объектов относительно друг друга, что приводит к дефициту времени обработки информации [1]. Кроме того, в системах ближней оптической локации время запаздывания сигнала сопоставимо с его длительностью. Естественно, что в этом случае возникает возможность использовать для приема отраженного сигнала временной интервал между двумя шумовыми выбросами на выходе приемного устройства. Это позволило бы уменьшить уровень срабатывания решающего устройства и снизить требуемое отношение сигнала к шуму, а, следовательно, повысить энергетическую эффективность системы.

Целью данной работы является анализ распределения интервалов между выбросами случайного процесса при различных передаточных функциях приемно-усилительного тракта и исследование возможности использования шумовой синхронизации излучения в системах ближней локации.

#### Формулировка проблемы поиска распределений интервалов между выбросами случайного процесса

Рассмотрим задачу нахождения функции распределения и плотности вероятности длительности интервалов  $\tau$  между последовательными пересечениями заданного уровня  $C$  с траекторией дифференцируемого нормального случайного процесса с нулевым средним значением (рис. 1) при различных энергетических спектрах его и различных уровнях срабатывания  $C$ .

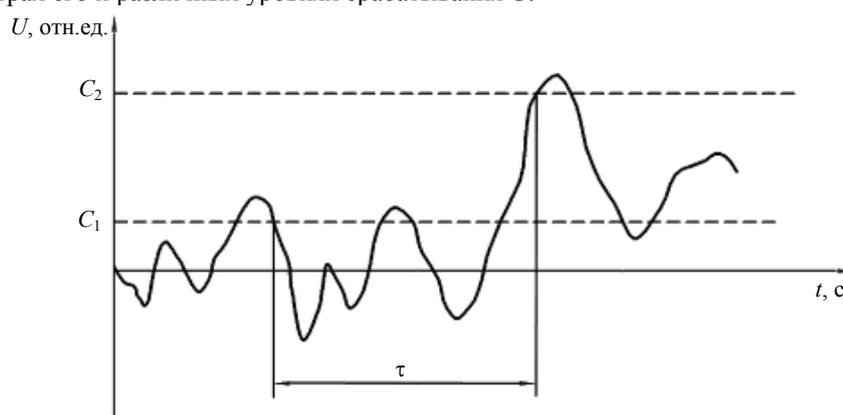


Рис. 1. Определение длительности между выбросами случайного процесса в общем случае:  $\tau$  — длительность интервала между выбросами случайного процесса;  $C_1$ ,  $C_2$  — уровни пересечения, задающие начало и конец интервала между выбросами соответственно

В общем виде задача о нахождении плотности вероятности и функции распределения для выбросов флуктуаций, мало отличающихся от нормальных, дана в работе [2]. Сложность общего аналитического решения задачи не позволяет использовать полученные выражения в инженерных расчетах, а замена точной формулы упрощенной связана с некоторыми погрешностями, которые трудно оценить аналитически. Ко-

нечное заключение о степени приближения результатов расчета к действительности можно получить в результате сопоставления с экспериментальными данными [3]. Для этого целесообразно провести моделирование работы измерительного прибора определения требуемых характеристик (анализатора).

**Описание математической модели анализатора**

Можно обозначить несколько обязательных требований, предъявляемых к модели анализатора:

- возможность устанавливать различные параметры генерации шума;
- возможность менять частоту пропускания фильтра;
- возможность изменять величину порога срабатывания анализатора.

Кроме того, необходимо, чтобы схема была достаточно универсальна, т.е. позволяла бы анализировать интервалы между выбросами не только для одного уровня, но и для двух, не равных друг другу уровней (рис. 1). Возможная схема построения такого анализатора представлена на рис. 2.

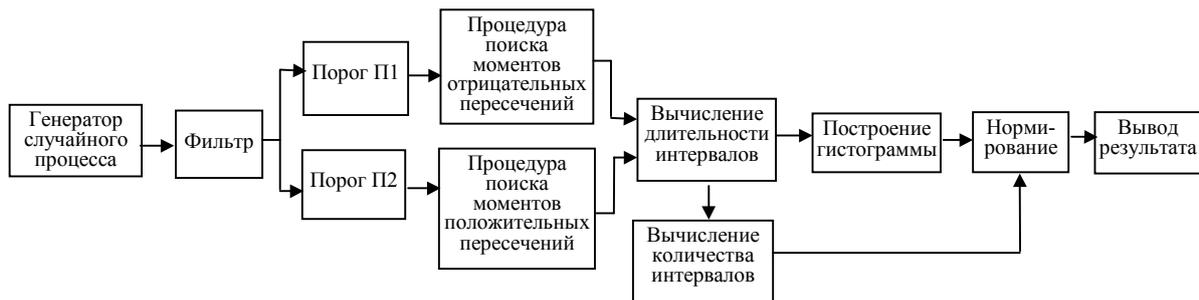


Рис. 2. Схема анализатора интервалов между выбросами

Представленная схема анализатора была реализована в среде LabView. С помощью полученного виртуального прибора был исследован характер поведения распределений при изменении уровней срабатывания и постоянной фильтра (рис. 3).

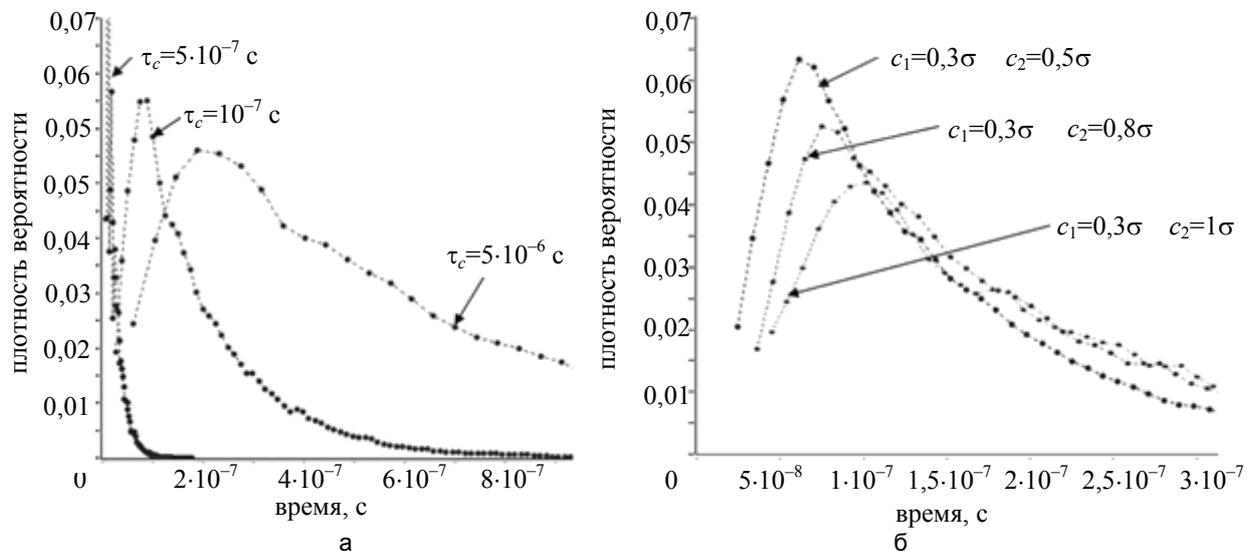


Рис. 3. Характер поведения распределений при изменении параметров анализатора: плотность вероятности при изменении постоянной времени фильтра (а); плотность вероятности при изменении разницы между уровнями срабатывания (б)

Из данных, представленных на рис. 3, видно, что с увеличением постоянной времени фильтра, а также при увеличении разницы между уровнями срабатывания анализатора длительность интервалов увеличивается, а пик распределения смещается в область более низкой вероятности.

**Принцип построения системы ближней оптической локации с шумовой синхронизацией**

Вышеизложенные результаты могут быть применены при решении различных задач – как радиотехнических, так и оптоэлектронных. Применительно к оптической локации знание законов распределения интервалов между выбросами случайного процесса может быть использовано для реализации системы

ближней локации с шумовой синхронизацией момента излучения. Примерная схема построения такой системы и временные диаграммы, поясняющие принцип ее работы, представлены на рис. 4 и 5.

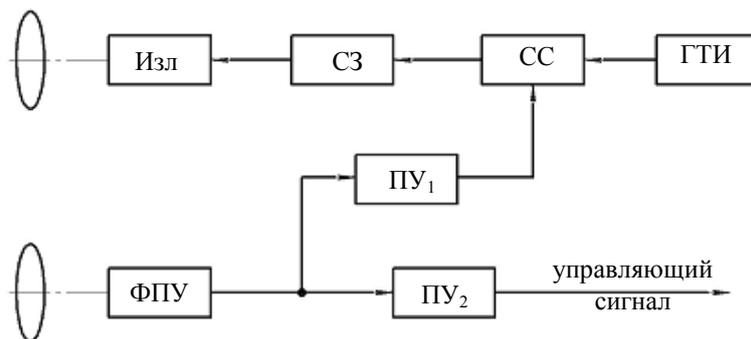


Рис. 4. Схема приемо-передатчика с шумовой синхронизацией: ГТИ – генератор тактовых импульсов, Изл – излучатель, определяющий требуемую частоту посылок излучения, ПУ<sub>1</sub> и ПУ<sub>2</sub> – пороговые устройства, первое из которых срабатывает по спаду входного сигнала, а второе по фронту, СЗ – схема запуска излучателя, СС – схема совпадений, ФПУ – фотоприемное устройство

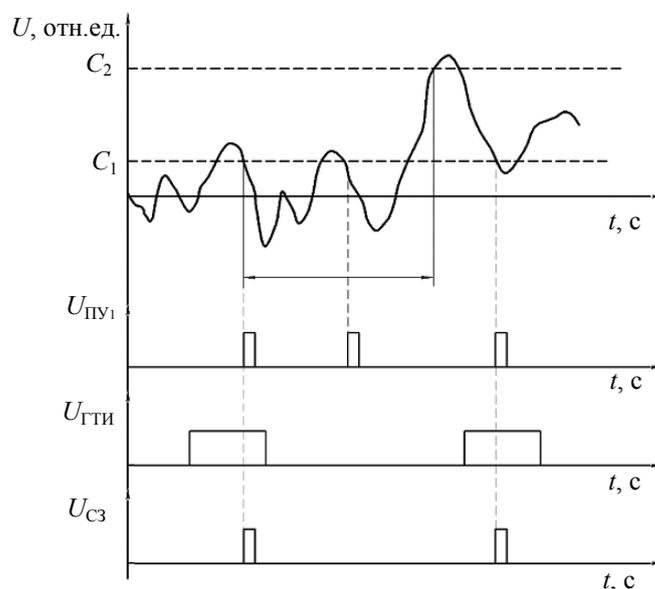


Рис. 5. Временные диаграммы работы предлагаемой системы с шумовой синхронизацией:  $U$ ,  $U_{ПУ1}$ ,  $U_{ГТИ}$ ,  $U_{СЗ}$  – сигналы на выходах фотоприемного устройства, первого порогового устройства, генератора тактовых импульсов и схемы запуска соответственно

Принцип действия такой системы следующий. С выхода фотоприемного устройства ФПУ шумы приемного устройства поступают одновременно на два пороговых устройства, ПУ<sub>1</sub> и ПУ<sub>2</sub>, с уровнями срабатывания  $C_1$  и  $C_2$  ( $C_2 > C_1$ ). Сигнал с ПУ<sub>1</sub>, фронт которого соответствует моменту пересечения уровня  $C_1$  шумами приемного устройства с отрицательной производной, предназначен для запуска излучающего устройства. При превышении порога  $C_1$  открывается схема совпадения СС, на второй вход которой подаются импульсы от генератора тактовых импульсов ГТИ. Сигнал от схемы совпадения СС включает схему запуска, и формируется импульс излучения. При превышении порогового уровня  $C_2$  пороговое устройство ПУ<sub>2</sub> формирует управляющий сигнал, по которому происходит дальнейшее функционирование системы.

#### Определение средней частоты посылок импульсов излучения и вероятности ложной тревоги для приемо-передатчика с шумовой синхронизацией

Частота излучения в представленной схеме приемо-передатчика определяется частотой пересечения случайным процессом уровня срабатывания  $C_1$  с отрицательной производной (рис. 5). Известно, что среднюю частоту пересечений можно определить по следующему выражению [4]:

$$N(C_1) = \frac{1}{\pi} \sqrt{-R''(0)} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{C_1 - m}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $C_1$  – величина уровня срабатывания;  $m$  – математическое ожидание случайного процесса;  $\sigma$  – дисперсия случайного процесса;  $R''(0)$  – значение второй производной от корреляционной функции процесса в нуле.

Для фильтра с экспоненциальной передаточной характеристикой, заданной выражением

$$K(j\omega) = \exp \left( -\frac{\omega^2}{4 \cdot \pi^2} \tau_c^2 \right), \quad (2)$$

где  $\tau_c$  – постоянная фильтра, корреляционная функция определяется выражением

$$R(\tau) = \exp \left( -\frac{\pi}{2\tau_c^2} \tau^2 \right). \quad (3)$$

Тогда вторая производная равна

$$R''(0) = -\frac{\pi}{\tau_c^2}. \quad (4)$$

Таким образом, искомая частота пересечений определяется как

$$N(c) = \frac{1}{\pi} \sqrt{-\frac{\pi}{\tau_c^2}} \cdot \exp(-0,5c^2), \quad (5)$$

где  $c = \frac{C_1}{\sigma}$  – величина относительного уровня срабатывания. Характер полученной зависимости показан на рис. 6.

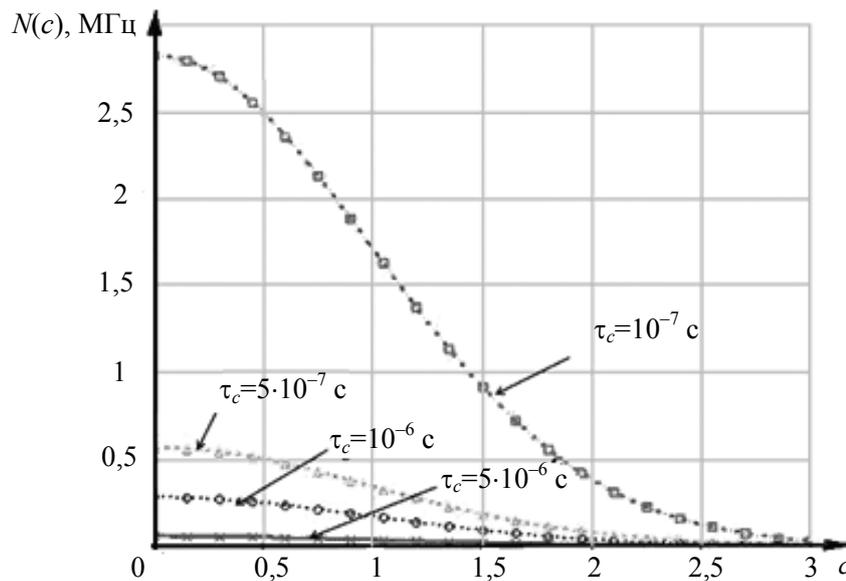


Рис. 6. Зависимость средней частоты пересечений уровня с положительной производной от величины этого уровня  $c$  и постоянной фильтра  $\tau_c$

Из рис. 6 видно, что для увеличения частоты облучения необходимо понижать уровень  $c$  и уменьшать постоянную времени фильтра.

Вероятность ложной тревоги рассчитывается как площадь под графиком плотности распределения вероятности  $P(\tau)$  длительности интервалов между выбросами в интервале времени  $[0, T]$  (рис. 7), где время  $T$  определяется максимальной дистанцией промаха.

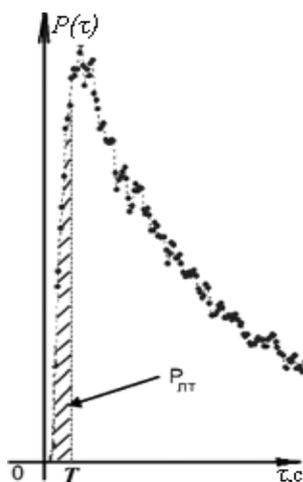


Рис. 7. К определению вероятности ложной тревоги

### Выводы

Рассмотрены плотности вероятностей интервалов между выбросами широкополосного нормального случайного процесса при различных уровнях ограничения и различных передаточных функциях приемно-усилительного тракта. Показано, что возможно использовать системы ближней локации, в которых запуск лазерного излучателя осуществляется спадом шумового выброса на выходе приемно-усилительного тракта, а прием отраженного сигнала осуществляется на интервале между выбросами случайного процесса. Такой подход позволяет существенно снизить уровень срабатывания решающего устройства и, естественно, уменьшить энергетические затраты. Анализ распределения интервалов между выбросами показывает, что требования к частоте посылок излучения и вероятности ложной тревоги находятся в противоречии. Однако эти противоречия могут быть разрешены использованием системы, в которой запуск излучения осуществляется от пересечения спада шумового выброса более низкого уровня, а принятие решения о наличии сигнала – более высоким уровнем.

Работа осуществлялась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### Литература

1. Мусьяков М.П., Миценко И.Д., Ванеев Г.Г. Проблемы ближней лазерной локации: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 295 с.
2. Тихонов В.И. Распределение выбросов нормальных флуктуаций по длительности // Радиотехника и электроника. – 1956. – Т. 1. – № 1. – С. 23–33.
3. Лебедько Е.Г., Аверьянов Г.А., Егоров А.С., Романов А.М., Хайтун Ф.И. Определение дифференциальных законов распределения интервалов между выбросами случайного процесса // Приборы и техника эксперимента. – 1971. – № 6.
4. Тихонов В.И., Хименко В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. – Л.: Наука, 1987. – 304 с.

*Лебедько Евгений Георгиевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, [eleb@rambler.ru](mailto:eleb@rambler.ru)

*Серикова Мария Геннадьевна*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [serikovamg@gmail.com](mailto:serikovamg@gmail.com)

УДК 535-92, 535-14, 608.3

## РАСЧЕТ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОГРАФА-ИНТРАВИЗОРА

Е.В. Новоселов, В.Г. Беспалов

Представлены результаты моделирования перестраиваемого зеркального объектива для импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора с использованием программы Zemax.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, рефлектометр, спектрограф-интравизор, зеркальный объектив.

### Введение

Излучение терагерцового (ТГц) диапазона имеет уникальные характеристики: многие вещества являются прозрачными для данного излучения. В сравнении с видимыми или инфракрасными волнами ТГц излучение может проникать в органические материалы, такие как кожа, пластики, одежда или бумага. Вследствие низкой энергии ТГц фотона оно не вызывает повреждений, связанных с ионизирующими излучениями (такими, как рентгеновское или УФ излучение). Благодаря этим свойствам данный вид излучения идеально подходит для неразрушающей диагностики, что необходимо, например, при контроле содержимого багажа в аэропортах, обнаружении прослушивающего оборудования либо тайников в помещениях, а также в медицине для исследования тканей человека [1]. В то же время ТГц диапазон охватывает актуальную область колебательных, вращательных и трансляционных линий широкого класса органических молекул, что важно для целей спектроскопии и диагностики материалов [2].

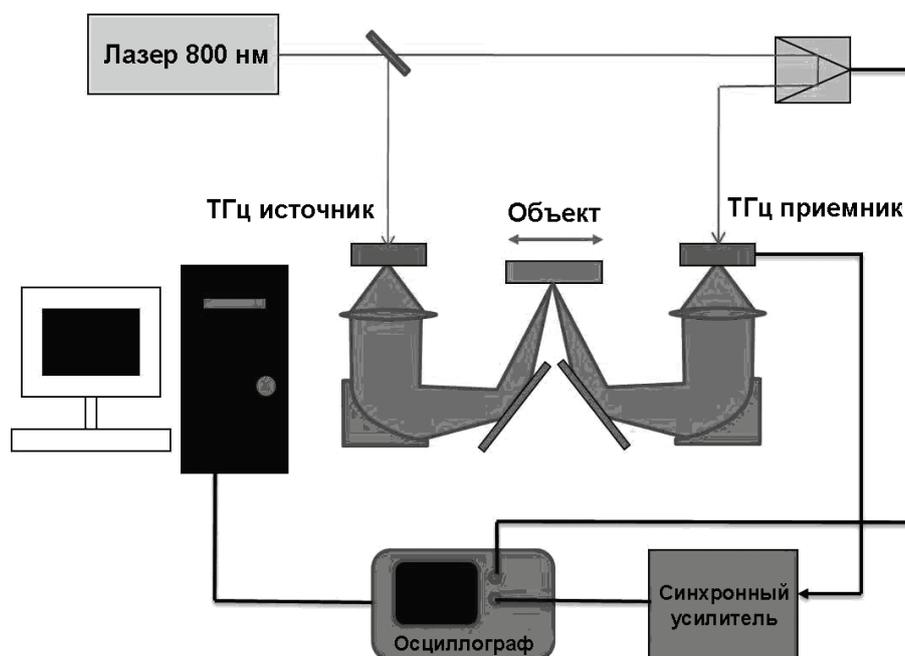


Рис. 1. Схема терагерцового рефлектометра, использующая параболические зеркала для фокусировки ТГц излучения

### Фокусировка терагерцового излучения

В настоящее время для фокусировки ТГц излучения наиболее часто применяются схемы, использующие внеосевые параболические зеркала.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки, использованной в работе [3]: для генерации ТГц излучения выращенный при низкой температуре кристалл GaAs облучался импульсным излучением лазера на титане с сапфиром с длиной волны 800 нм, длительностью 80 фс и частотой следования импульсов 80 МГц. Образец помещался на моторизованную платформу, которая позволяла осуществлять линейное сканирование. Фокусировка и сбор отраженного излучения осуществлялись при помощи систем, использующих линзы и внеосевые параболические зеркала.

Недостатком использования параболических зеркал является сложность расчета и юстировки; кроме того, представленные в литературе фокусирующие системы обычно не являются перестраиваемыми.

Целью данной работы является разработка оптической схемы (рис. 2) для проведения экспериментов по исследованию термобарьерного покрытия турбинных лопаток.



через ТГц поляризационный делитель. Далее излучение фокусируется на электрооптический детектор (ЭО) – кристалл теллурида кадмия, вырезанный по направлению [100]. При попадании одновременно пробного пучка фемтосекундного излучения и пучка ТГц излучения на электрооптический кристалл CdTe ТГц импульс наводит в кристалле двулучепреломление для пробного пучка вследствие электрооптического эффекта [5]. Величина двулучепреломления прямо пропорциональна напряженности электрического поля ТГц волны в данный момент  $E(t)$ . Измерение двулучепреломления производится устройством, состоящим из четвертьволновой пластины, призмы Волластона, балансного фотодетектора и синхронного усилителя, управляемого от оптико-механического модулятора, помещенного в пучок накачки. Сигнал с синхронного усилителя поступает на цифровой вольтметр, что позволяет производить измерения с помощью персонального компьютера.

**Перестраиваемый зеркальный объектив**

Перестраиваемый зеркальный объектив состоит из двух зеркал и собирающей линзы. Одно из зеркал радиусом 250 мм является сферическим и имеет радиус кривизны 450 мм. Преимуществом использования для фокусировки сферического зеркала является уменьшение габаритов объектива. Второе зеркало – плоское, радиусом 40 мм.

В качестве материала для собирающей линзы был выбран полиметилпентен (ТРХ) [6]. Он прозрачен для излучения в ультрафиолетовом, видимом и дальнем инфракрасном диапазонах. Его показатель преломления равен  $1,460 \pm 0,006$ , и он практически не зависит от длины волны. Оптические потери в материале очень низкие вплоть до миллиметровых волн. Дисперсия показателя преломления полиметилпентена приведена в таблице. Расчет проводился для длины волны 500 мкм. Для аппроксимации показателя преломления использовалась формула Конради.

$\lambda$ , мкм	$n$
0,633	1,4630
24	1,4568
60	1,4559
300	1,4600
667	1,4600
1000	1,4650
3191	1,4660

Таблица. Дисперсия показателя преломления полиметилпентена

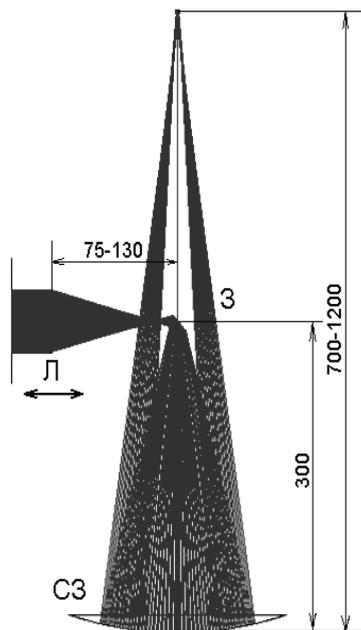


Рис. 4. Схема перестраиваемого зеркального объектива: Л – линза; З – зеркало; СЗ – сферическое зеркало. Размеры указаны в миллиметрах

Для расчета объектива использовалась программа Zemax [7], применяемая при проектировании оптических систем. Программа Zemax позволяет моделировать и рассчитывать оптические и оптико-механические системы различной сложности методом трассировки лучей. В результате получено, что наиболее оптимальный результат по таким параметрам, как минимальный размер объектива, минимальный размер пятна фокусировки и максимальная величина апертуры сферического зеркала, достигается при использовании линзы с радиусом кривизны обеих поверхностей 100 мм и толщиной 10 мм. Рассчитанный объектив обеспечивает перестройку глубины фокусировки на 500 мм. На рис. 4 приведена схема рассчитанного объектива, смоделированного в программе Zemax.

### **Заключение**

В результате компьютерного моделирования в программе Zemax рассчитаны параметры зеркального объектива для импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора, удовлетворяющего заданным требованиям: фокусировка излучения на длине волны 500 мкм, изменение расстояния фокусировки на 500 мм. В дальнейшем планируется изготовление необходимых деталей перестраиваемого зеркального объектива, создание импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора и проведение на нем экспериментов.

Работа выполнялась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № П872.

### **Литература**

1. Dragoman D., Dragoman M. Terahertz field and application // Progress in Quantum Electronics. – 2004. – V. 28. – P. 1–66.
2. Fitzgerald A. J. et al. An introduction to medical imaging with coherent terahertz radiation // Phys. Med. Biol. – 2002. – V. 47. – P. 3727–3734.
3. Chia-Chu Chen et al. Pulsed-terahertz reflectometry for health monitoring of ceramic thermal barrier coatings // Opt. Exp. – 2010. – V. 18. – № 4. – P. 3477–3486.
4. Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Денисюк И.Ю., Козлов С.А., Крылов В.Н., Лукомский Г.В., Петров Н.В., Путилин С.Э. Методы генерации сверхширокополосных ТГц импульсов фемтосекундными лазерами. // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 10. – С. 34–41.
5. Cook D.J., Hochstrasser R.M. Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air // Optics Letters. – 2000. – V. 25. – № 16. – P. 1210–1212.
6. ТГц материалы: сайт ЗАО «Тидекс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://tydex.ru/ru/products/thz\\_optics/thz\\_materials/](http://tydex.ru/ru/products/thz_optics/thz_materials/), свободный. Яз. рус. (дата обращения 05.10.2010).
7. ZEMAX-EE: сайт «ZEMAX Development Corporation» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.zemax.com/index.php?option=com\\_content&task=category&ionid=12&id=49&Itemid=132](http://www.zemax.com/index.php?option=com_content&task=category&ionid=12&id=49&Itemid=132), свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.10.2010).

**Новоселов Евгений Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [eugene.novoselov@gmail.com](mailto:eugene.novoselov@gmail.com)

**Беспалов Виктор Георгиевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, [vic-torbespaloff@gmail.com](mailto:vic-torbespaloff@gmail.com)

УДК 681.786

## **ТРЕХКООРДИНАТНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ АВТОКОЛЛИМАТОР С УВЕЛИЧЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ**

**И.А. Коныхин, Т.В. Копылова**

Рассмотрен трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с тетраэдрическим отражателем, два двугранных угла между гранями которого имеют малое отступление от 90°. Установлено, что такой автоколлиматор, построенный по схеме с переотражением пучка при использовании дополнительного плоского зеркала, реализует измерения угла скручивания с увеличенной чувствительностью. Проведен анализ влияния погрешности измерения вследствие влияния поворота отражателя на коллимационные углы.

**Ключевые слова:** трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор, угол скручивания, тетраэдрический отражатель, чувствительность измерения угла скручивания.

### **Введение**

Для решения метрологических (связанных с угловыми измерениями) задач эффективны трехкоординатные оптико-электронные автоколлиматоры, позволяющие контролировать положение объекта относительно двух осей, перпендикулярных оптической оси автоколлиматора (коллимационные оси), и

третьей оси – оптической оси автоколлиматора (оси скручивания), т.е. контроля поворотов объекта относительно трех взаимно перпендикулярных осей [1, 2].

В известной схеме трехкоординатного автоколлиматора в качестве контрольного элемента используется тетраэдрический отражатель (ТО), у которого два из двугранных углов между отражающими гранями имеют заданное отступление от 90°. При отражении такой ТО разделяет падающий по оси пучок автоколлиматора на две пары пучков, одна из которых может использоваться для измерения угла скручивания. Коллимационные углы измеряются по части пучка, отраженной от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала. Каждый из пучков пары для измерения угла скручивания  $\Theta_3$  составляет с осью объектива автоколлиматора угол  $\Delta$ , который численно равен коэффициенту передачи между углом поворота ТО на угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления и, соответственно, определяет чувствительность измерения скручивания.

Величина параметра  $\Delta$  в известной схеме измерения ограничена угловым полем автоколлиматора. По этой причине трехкоординатный автоколлиматор [2] не обладает достаточной для практического применения чувствительностью к повороту на угол скручивания вследствие малости коэффициента передачи  $\Delta$ , величина которого ограничена угловым полем типовых автоколлиматоров (например, для автоколлиматора АК-0,5 с угловым полем 12 угл. мин. коэффициент передачи по скручиванию  $\Delta=0,0035$ , что значительно меньше чувствительности  $\Delta_3=2$  для коллимационных углов при использовании плоского зеркала). Указанное обстоятельство определяет необходимость исследований по увеличению чувствительности измерения угла скручивания трехкоординатными автоколлиматорами.

### Основные положения

Пусть в ТО два двугранных угла между отражающими гранями имеют равные отклонения  $\delta_2 = \delta_3 = \delta$  от 90° (рис. 1, а). Падающий на такой отражатель параллельный пучок расщепляется на две пары пучков, причем отклонения одной из них при поворотах определяются в основном углом скручивания, что позволяет реализовать независимое измерение этого угла.

Используемые для измерения скручивания пучки симметричны относительно оси падающего пучка, лежат с ним в одной плоскости и отклонены от оси объектива автоколлиматора на равные углы  $\Delta$ . Отраженные пучки строят в фокальной плоскости объектива автоколлиматора изображения 1, 2 марки автоколлиматора (рис. 1, б).

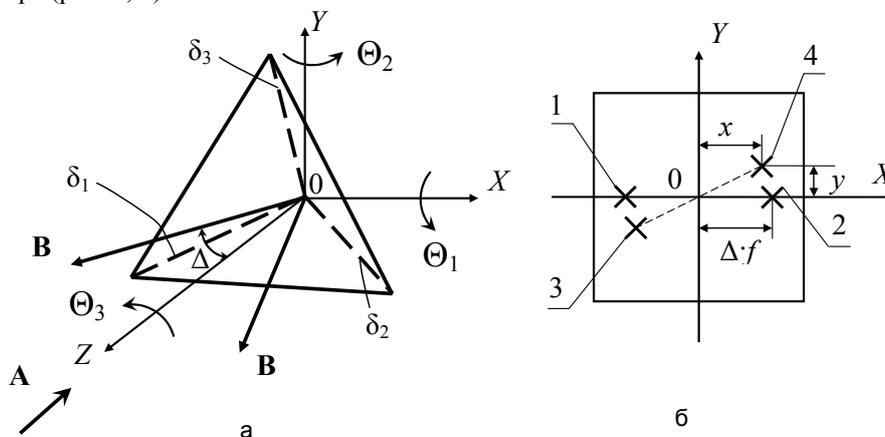


Рис. 1. а – тетраэдрический отражатель; б – изображение марки автоколлиматора в фокальной плоскости приемного объектива: 1, 2 – при  $\Theta_3=0$ ; 3, 4 – при  $\Theta_3 \neq 0$

При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  (рис. 1, а) относительно осей  $OX, OY, OZ$  изображения 1, 2 сместятся на величину  $\pm y$ , пропорциональную углу  $\Theta_3$  (изображения 3, 4 на рис. 1, б). В этом случае орты **В** отраженных пучков с учетом величин второго порядка малости будут равны

$$\mathbf{B}_{1,2} = \begin{bmatrix} \pm \Delta \mp \frac{\Delta \cdot \Theta_1^2}{2} \pm \frac{\Delta \cdot \Theta_2^2}{2} \mp \Delta \cdot \Theta_3^2 \\ \pm \Delta \cdot \Theta_3 + \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_1}{2} \\ 1 - \frac{\Delta^2}{2} + \Theta_2^2 - \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\Theta_1, \Theta_2$  – коллимационные углы;  $\Theta_3$  – угол скручивания;  $\Delta$  – угол отклонения отраженного пучка от оптической оси автоколлиматора, определяющий матрицу действия отражателя:

$$M_{1,2} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{\Delta^2}{2} & 0 & \mp \Delta \\ 0 & -1 & 0 \\ \pm \Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Как следует из выражения (1), по величине составляющей орта  $B_y$ , пропорциональной смещению у изображения марки, для любого пучка пары рассматриваемый ТО с некоторой погрешностью реализует измерения угла скручивания  $\Theta_3$  в соответствии с алгоритмом:

$$\Theta_3 = \frac{B_y}{\Delta}. \quad (3)$$

Погрешность влияния коллимационных углов при измерении скручивания равна

$$\delta_{\Theta_3} = \frac{\Delta \cdot \Theta_1}{2}. \quad (4)$$

Для повышения чувствительности  $\Delta$  при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем предлагается использовать схему с переотражением пучка, реализуемым дополнительным плоским зеркалом 3 (рис. 2, а).

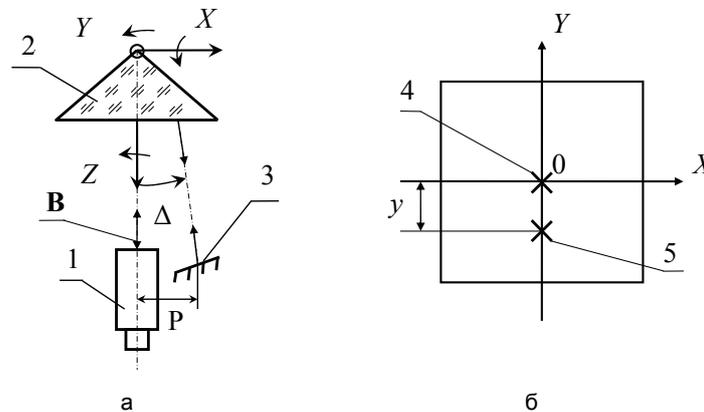


Рис. 2. а – схема автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания: 1 – автоколлиматор, 2 – тетраэдрический отражатель, 3 – плоское зеркало; б – изображение марки на матрице: 4 – изображение марки при  $\Theta_3=0$ ; 5 – изображение марки при  $\Theta_3 \neq 0$

В результате отраженный ТО пучок минует приемный объектив и, после отражения от зеркала 3, направляется вновь на ТО. После повторного отражения от ТО (позиция 2 на рис. 2, а) формируется изображение 4 марки (рис. 2, б) в фокальной плоскости объектива автоколлиматора.

Поворот объекта, с которым связан ТО, на малые углы  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  вокруг осей  $OX, OY, OZ$  приводит к смещению изображения марки 4 на величину  $-y$  относительно центра анализатора (изображение 5 на рис. 2, б). Для данной схемы орт  $\mathbf{B}$  (рис. 2, а) отраженного пучка с учетом величин второго порядка малости будет равен

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_1^2 + \frac{11 \cdot \Delta \cdot \Theta_3^2}{2} \\ -2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 - \Delta^2 \cdot \Theta_1 + \Delta \Theta_1 \cdot \Theta_2 \\ 1 + \Theta_1^2 + 2 \cdot \Theta_2^2 - \Theta_3^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Погрешность измерения скручивания вследствие влияния коллимационных углов равна

$$\delta_{\Theta_3} = \frac{|-\Delta \cdot \Theta_1 + \Theta_1 \cdot \Theta_2|}{2}. \quad (6)$$

При практической реализации схемы с переотражением пучка величина  $P$  выноса зеркала составила 100 мм, что на дистанции до ТО 3000 мм определяет величину угла  $\Delta=0,034$  рад. Тогда в соответствии с выражением (5) коэффициент передачи равен  $K=2 \cdot \Delta=0,068$ , что практически в 20 раз больше по сравнению с чувствительностью измерения в схеме без переотражения пучка.

При этом относительная величина погрешности измерения вследствие влияния коллимационного угла при диапазоне измерения  $\Theta_{1\max} = \Theta_{2\max} = 10$  угл. мин. осталась практически неизменной (с точностью до малого слагаемого  $\Theta_1 \cdot \Theta_2 \approx 10^{-5}$  рад).

### **Заключение**

В ходе проведенного анализа было установлено, что модернизированная схема автоколлиматора с дополнительным зеркалом позволяет увеличить чувствительность измерения угла скручивания. При этом реализуется независимое измерение угла скручивания с незначительной по величине погрешностью вследствие влияния коллимационных углов.

Исследования по рассмотренной тематике выполняются при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### **Литература**

1. Коняхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатный автоколлиматор // Опτικο-механическая промышленность. – 1980. – № 3. – С. 19.
2. Коняхин И.А., Панков Э.Д. Трехкоординатный автоколлиматор повышенной точности // Опτικο-механическая промышленность. – 1982. – № 8. – С. 41.

*Коняхин Игорь Алексеевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, igor@grv.ifmo.ru  
*Копылова Татьяна Валерьевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, fleur3310@rambler.ru

УДК 681.78

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОРШНЯ В ЦИЛИНДРЕ КЛАПАНА А.А. Горбачёв, Е.Н. Кулешова**

Рассмотрен расчет погрешности, вносимой формой сферического отражателя в измерение линейных перемещений поршня в цилиндре клапана. Проведен анализ данной погрешности, выявлены зависимости этой погрешности от радиуса отражателя. Установлено, что данная погрешность составляет 0,15 мм, что значительно влияет на точность результата измерения перемещения. Предложен способ компенсации выявленной погрешности на программном уровне.

**Ключевые слова:** измерение линейных перемещений поршня, опτικο-электронная система, сферический отражатель, линейные перемещения.

### **Введение**

Часто возникает необходимость проверки работоспособности подвижных элементов оборудования, например, поршня в цилиндре клапанов различного назначения, золотника в вентиле и т.д. Обычно подвижные элементы располагаются в труднодоступных местах, и проконтролировать их работу контактным способом во время движения не представляется возможным. В таких ситуациях на помощь приходят опτικο-электронные приборы и системы. Они позволяют наблюдать в реальном времени за протекающими процессами, автоматизировать процесс снятия данных, реализовать оперативное и точное измерение бесконтактным способом и повысить достоверность получаемых данных [1, 2].

Основной задачей, решаемой при создании такого рода систем, является уменьшение погрешности прибора, которая составляет десятые, а в некоторых случаях и сотые доли миллиметра (диапазон контролируемых поперечных смещений поршней клапанов или золотников вентилях при этом составляет десятки миллиметров). Другая задача, которую необходимо решить, – это создание измерительной системы при ограниченных габаритных размерах.

### **Опτικο-электронная система измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана**

Для решения задачи измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана на кафедре опτικο-электронных приборов и систем в СПбГУ ИТМО была разработана опτικο-электронная система [3]. Такая система позволяет контролировать перемещения в диапазоне  $\pm 5$  мм с погрешностью 0,05 мм.

Система представляет собой видеоблок, который состоит из источников излучения (ИИ), приемника оптического излучения (ПОИ) и оптической системы (рис. 1).

Принцип работы такой системы заключается в следующем: ИИ создают первичное изображение на контрольной метке (КМ), жестко закрепленной на поршне, вторичное изображение формируется оптической системой на ПОИ. Блок обработки, подключенный к видеоблоку, производит анализ совокупности изображений КМ и расчет ее перемещения, скорости и ускорения, т.е. определяет перемещение, скорость и ускорение поршня.

КМ может быть двух типов – активного и пассивного. КМ активного типа представляет собой источник излучения – полупроводниковый излучающий диод (ПИД) [4] или лазер. Изображение источника строится на ПОИ видеоблока. Напряжение питания можно подводить как от аккумуляторных батарей, так и от специального блока питания. Ограниченные габаритные размеры КМ и использование аккумуляторных батарей приводит к усложнению конструкции самой КМ. К тому же время работы источника от аккумуляторных батарей мало по сравнению с общим циклом измерений. Использование КМ с блоком питания усложняет ее монтаж на поршень клапана. Кроме этого, в процессе измерений провода могут переломиться, что не позволит зафиксировать положение КМ с поршнем.

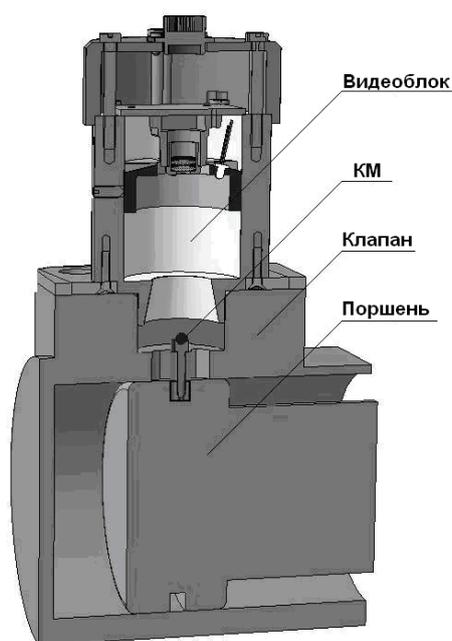


Рис. 1. Внешний вид опико-электронной системы для измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана

Перечисленные недостатки КМ активного типа предполагают использование для системы контроля положения поршня в цилиндре клапана КМ пассивного типа (сферический или тетраэдрический отражатели). Тетраэдрический отражатель представляет собой призму в виде тетраэдра, закрепленную в держателе. Однако проведенные эксперименты показали, что использование подсветки для КМ такого вида не позволяет создать необходимую освещенность на приемнике оптического излучения видеоблока для фиксации перемещения поршня.

КМ в виде сферического отражателя работает подобно выпуклому сферическому зеркалу. Система, работающая с использованием КМ подобного типа, описана в [5]. При том же источнике излучения КМ в виде металлического сферического отражателя создает достаточную освещенность. В этом случае необходимо учитывать возникающую при использовании подобной КМ погрешность.

### **Лабораторный стенд**

Создан лабораторный стенд и проведены эксперименты с использованием ПИД и КМ в виде сферического отражателя (рис. 2). Ниже приведены результаты экспериментального исследования.

На рис. 3 видно, что показания перемещения отличаются для КМ пассивного типа и ПИД, хотя задаваемое с помощью подвижки перемещение в обоих случаях одинаково. Следовательно, помимо погрешностей, присутствующих в обоих случаях, при использовании КМ пассивного типа возникает дополнительная погрешность. При задаваемом смещении 10 мм эта погрешность составляет 0,15 мм (87 пикселей), что, безусловно, влияет на результат измерений перемещений объекта. Таким образом, в случае использования КМ пассивного типа в виде сферического отражателя необходимо учитывать возникающую при использовании подобной КМ погрешность.

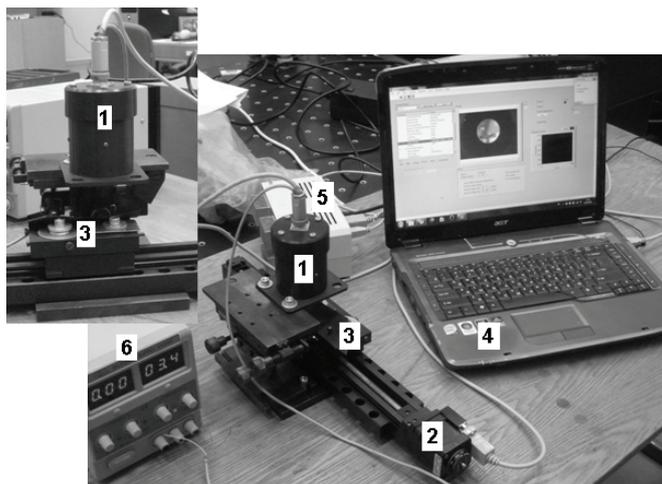


Рис. 2. Лабораторный стенд: 1 – ОЭС измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана; 2 – электрическая подвижка, имитирующая перемещения поршня; 3 – КМ; 4 – блок обработки и питания ОЭС; 5 – блок питания подвижки; 6 – блок питания ПИД в ОЭС

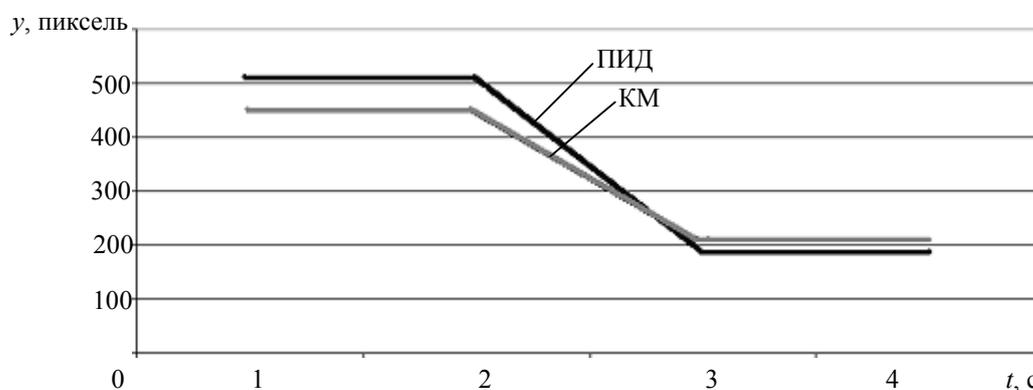


Рис. 3. Графики перемещения объекта, полученные с помощью ПИД и КМ

### Влияние формы сферического отражателя на точность измерения перемещений поршня в цилиндре клапана

КМ в виде сферического отражателя работает подобно выпуклому сферическому зеркалу. Определим величину влияния сферического отражателя на погрешность измерения перемещения поршня в клапане. Рассмотрим сечение шарика плоскостью (рис. 4), содержащей оптическую ось (ОС)  $AO_1$  и ось излучения ИИ  $BO_1$ , направленного на КМ. В точке  $A$  располагается передняя главная плоскость объектива. В точке  $B$  установлен ИИ. Перемещение КМ происходит в плоскости, перпендикулярной плоскости рисунка. Величины  $l, d$  определяются на этапах конструирования и юстировки системы.

Далее рассмотрим два положения КМ в сечения  $\omega$  (рис. 4), отличающихся друг от друга на величину перемещения объекта  $y$  (величина перемещения отсчитывается от центра КМ в первом положении до центра КМ во втором положении, рис. 5).

На рис. 5: отрезки  $O_1D_1$  и  $O_2D_2$  равны радиусу КМ;  $y^*$  – истинное перемещение КМ;  $y$  – измеренное значение перемещения; точка  $B_1$  соответствует изображению точки  $B$  в первом положении КМ; точка  $B_2$  – во втором положении КМ.

Используя формулу выпуклого сферического зеркала, определим расстояние  $B_2D_2$  до изображения ИИ в смещенном положении:

$$MO_2 = O_1O_2 \frac{B_2O_2}{BO_2}, \quad B_2O_2 = D_2O_2 - D_2B_2, \quad \frac{2}{D_2O_2} = \frac{1}{D_2B_2} + \frac{1}{BD_2}, \quad D_2B_2 = \frac{D_2O_2 \cdot BD_2}{2BD_2 - D_2O_2}.$$

Далее найдем величину  $\Delta y$ , которая определяет погрешность измерения перемещения, вносимую сферическим отражателем:

$$B_2O_2 = D_2O_2 \frac{BD_2 - D_2O_2}{2BD_2 - D_2O_2}, \quad BO_2 = \sqrt{O_1O_2^2 + BO_1^2}, \quad B_2O_2 = D_2O_2 \frac{BO_2 - 2D_2O_2}{2BO_2 - 3D_2O_2}.$$

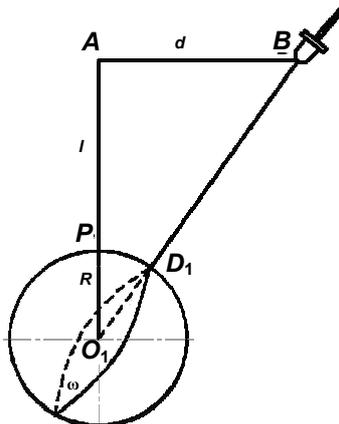


Рис. 4. Упрощенное изображение КМ и ИИ

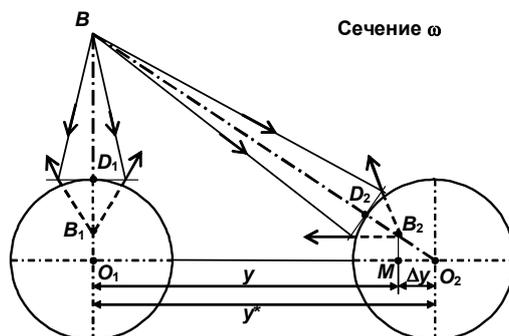


Рис. 5. Смещение КМ в сечении ω

В соответствии с обозначениями, принятыми на рис. 4 и рис. 5, запишем:

$$\Delta y = y^* - y, \quad \Delta y = y \cdot R \frac{\sqrt{y^2 + (l+R)^2 + d^2} - 2R}{2\sqrt{y^2 + (l+R)^2 + d^2} - 3R} \cdot \frac{1}{\sqrt{y^2 + (l+R)^2 + d^2}}.$$

Величина погрешности измерения перемещения КМ  $\Delta y$  при различных значениях радиуса КМ представлена на рис. 6. Из рис. 6 видно, что с увеличением радиуса КМ погрешность измерения перемещения возрастает. При ограниченном диапазоне перемещения зависимость погрешности от радиуса сферического отражателя носит линейный характер.

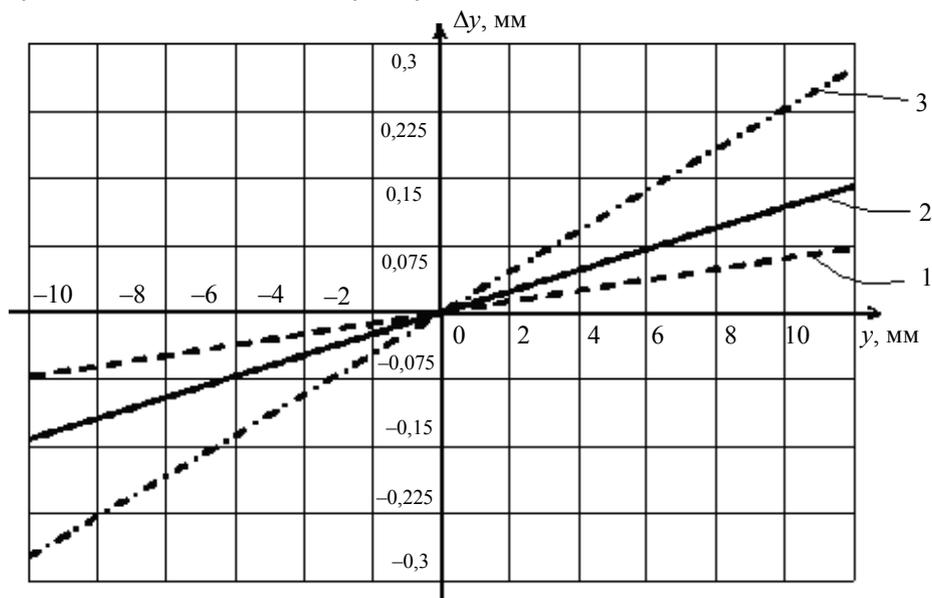


Рис. 6. Расчетная зависимость величины погрешности измерения  $\Delta y$  от величины измеренного перемещения  $y$  при различных значениях радиуса КМ  $R$ : 1 –  $R = 1$  мм; 2 –  $R = 2$  мм; 3 –  $R = 4$  мм

Исходя из конструкции клапана, радиус КМ составляет 2 мм. Из графика видно, что при радиусе КМ  $R = 2$  мм и при измеренном перемещении 9,7 мм погрешность, вносимая формой отражателя, составляет 0,1 мм, а погрешность данной системы, заявленная в технических требованиях, не должна превышать 0,05 мм. Таким образом, полученную погрешность нужно учесть. Снижения погрешности можно достичь путем компенсации. Компенсацию данной погрешности следует выполнять с помощью программы в блоке обработки. Следует ввести поправочный коэффициент, который в зависимости от параметров системы будет автоматически корректировать результат измерений. На рис. 7 представлены усредненные результаты эксперимента после введения поправочного коэффициента. Как видно, разность в определении перемещения объекта с помощью ПИД и пассивной КМ сократилась.

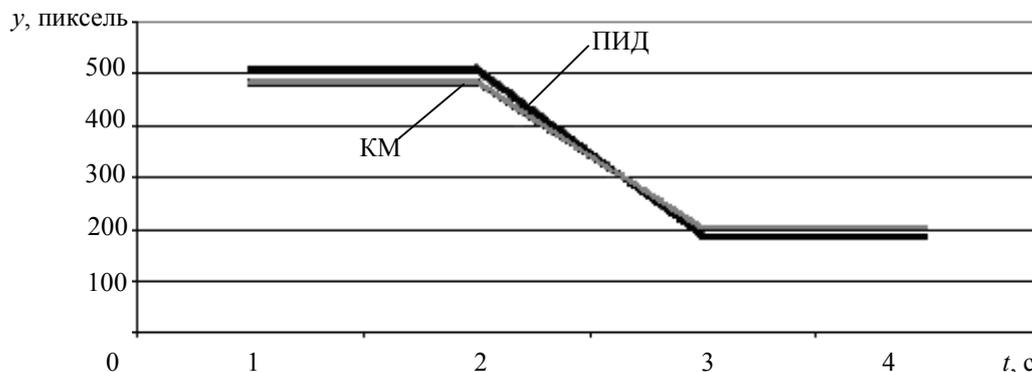


Рис. 7. Графики перемещения объекта, полученные с помощью КМ и ПИД с учетом введенного поправочного коэффициента

Зная конструктивные и оптические параметры системы, можно вычислить величину поправочного коэффициента при использовании сферического отражателя.

#### Заключение

Вносимая сферическим отражателем погрешность влияет на общую погрешность измерения перемещения поршня в цилиндре клапана. При ограниченном диапазоне перемещения зависимость погрешности от радиуса сферического отражателя носит линейный характер. Предложен способ компенсации данной погрешности с помощью поправочного коэффициента, вводимого в программу обработки изображений, используемую для измерения линейных перемещений поршня в цилиндре клапана.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной ЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

#### Литература

1. Анисимов А.Г., Коротаев В.В., Кулешова Е.Н. О возможности адаптации теории распределенных измерительных систем к оптико-электронным системам // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – № 7. – С. 86.
2. Горбачев А.А., Коняхин И.А., Мусяков В.Л., Тимофеев А.Н. Исследование особенностей построения инвариантных оптико-электронных систем с единым матричным полем анализа // Оптический журнал. – 2007. – Т. 72. – № 12. – С. 24–29.
3. Кулешова Е.Н. Оптико-электронная система контроля линейного перемещения поршня клапана на основе анализа совокупности изображений // Сборник трудов конференции молодых ученых. Вып. 1. Оптехника и оптическое приборостроение. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2009. – С. 334–337.
4. Алеев А.М., Араканцев К.Г., Тимофеев А.Н., Ершова К.Б., Петуховский В.В., Петуховский С.В., Холин А.Е. Оптико-электронная система контроля положения железнодорожного пути относительно реперных меток / Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 9. – С. 18–22.
5. Устройство для измерения малых перемещений. РФ, патент RU 2165070. МПК G 01 B 11/00. Автор: Петров Е.Н. (RU). Номер заявки 99109451/28. Дата публикации – 10.04.2001.

**Горбачёв Алексей Александрович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, gorbachyov@grv.ifmo.ru

**Кулешова Екатерина Николаевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, enkuleshova@mail.ru

УДК 004.387; 535.417

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИПОТЕЗ, ПОРОЖДАЕМЫХ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ СО СВЯЗЯМИ, РЕАЛИЗУЕМЫМИ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ**

З.С. Бекашева, В.Н. Васильев, А.В. Павлов

Применительно к выдвигению гипотез нейронной сетью (НС) со связями, формируемыми методом голографии Фурье, исследовано влияние фильтрации, возникающей вследствие ограниченности динамического диапазона голографической регистрирующей среды, используемой для записи матрицы связей, на статистические характеристики паттерна внутренней репрезентации (ПВР) гипотезы.

**Ключевые слова:** голография, нейронная сеть.

**Введение**

Одна из актуальных задач искусственного интеллекта – реализация механизмов творческого мышления. Известно, что творческие способности зависят в основном от двух факторов – развитости образного мышления [1–4] и способности к переходу к хаотической динамике нейронной активности [5–7]. Один из подходов к реализации образного мышления основан на том, что при восприятии информации в коре мозга формируются картины нейронной активности – ПВР воспринимаемой информации. Если информация воспринимается как задача, то это паттерн условий задачи. Мозг как НС обрабатывает эти паттерны.

Основываясь на этих послылках, в работах [8–10] был сформулирован подход к реализации механизма решения творческих задач НС с двунаправленными связями, формируемыми методом голографии Фурье (рис. 1). Подход основан на генерации в режиме хаотической динамики множества паттернов – гипотез, из которых по критерию адекватности условиям задачи должен быть выбран один (или ни одного) паттерна решения задачи. Можно выделить два аспекта проблемы адекватности:

- адекватность паттерна условий задачи реальности, обусловленная свойствами сенсоров и трактов, преобразующих воспринимаемую извне информацию в ПВР;
- адекватность ПВР гипотезы паттерну условий задачи, обусловленная свойствами НС как реальной физической схемы голографии Фурье с обращением волновых фронтов. Этот пункт специфичен именно для предложенного метода [8–10].

В работе рассмотрен второй аспект проблемы адекватности в плане изменений статистических свойств паттернов, обусловленных ограниченностью динамического диапазона регистрирующих сред для записи голограммы Фурье. Исследований изменения статистических моментов изображений в таком ключе авторам не известно.

**Механизм формирования гипотез и факторы, влияющие на адекватность гипотезы условиям задачи**

Свойства ПВР гипотез, порождаемых НС (рис. 1) в режиме хаотической динамики, определяются тем, что связи слоев репрезентации  $R$  и корреляции  $C$  реализуются голограммой Фурье, которая описывается выражением

$$H_{R \rightarrow C}(v_x, v_y) = F^*(\text{Im}_R(x, y)), \quad (1)$$

где  $(v_x, v_y)$  – пространственные частоты,  $*$  – комплексное сопряжение,  $F$  – символ преобразования Фурье,  $\text{Im}_R(x, y)$  – эталонный ПВР. При предъявлении в слое  $R$  ПВР задачи  $\text{Im}_{per}(x, y)$ , в слое  $C$  формируется функция корреляции  $\text{Im}_{per}(x, y)$  и  $\text{Im}_R(x, y)$

$$C(\xi, \eta) = \text{Im}_{per}(x, y) \otimes \text{Im}_R(x, y) = F(F(\text{Im}_{per}(x, y))F^*(\text{Im}_R(x, y))),$$

где  $\xi, \eta$  – координаты в плоскости корреляций, а преобразования Фурье – только прямые, поскольку обратное преобразование Фурье здесь физически нереализуемо. На этапе обратного прохождения света  $C \rightarrow H \rightarrow R$  необходима инверсная голограмма, реализующая метод десвертки

$$H^{inv}(v_x, v_y) = \left( \frac{1}{(F(\text{Im}_R(x, y))F^*(\text{Im}_R(x, y)))} \right) F^*(\text{Im}_R(x, y)). \quad (2)$$

Тогда, в предположении линейности фазосопрягающего зеркала в плоскости  $C$ , ореол вокруг восстановленного в слое  $R$   $\text{Im}_R(x, y)$  описывается выражением

$$\text{Im}(x_k, y_l) = F\left(\frac{F(C(x_k + \xi, y_l + \eta))}{F^*(\text{Im}_R(x, y))}\right), \quad (3)$$

где  $(x_k, y_l)$  – координаты в плоскости  $R$  вне области определения  $\text{Im}_R(x, y)$ . В [11] показано, что выражение (3) может быть получено из известной в теории случайных процессов модели линейного предсказателя [12].

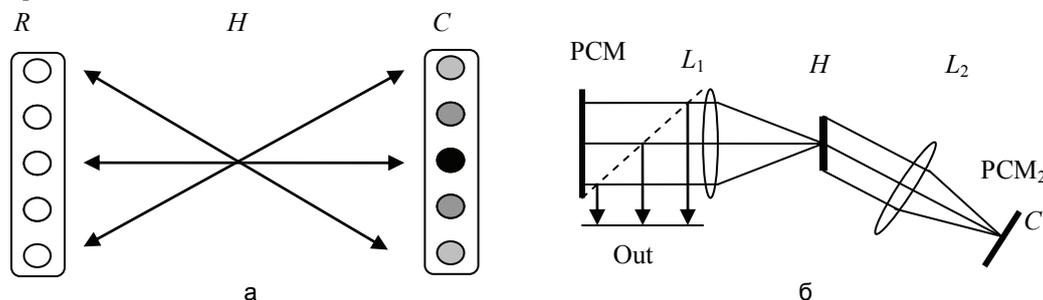


Рис. 1. Схема двухслойной нейронной сети с матрицей двунаправленных связей (а) и ее реализация методом голографии Фурье (б), где  $R$  – слой репрезентаций;  $C$  – слой корреляций;  $L_1$  и  $L_2$  – Фурье-преобразующие линзы с фокусными расстояниями  $f$ ;  $H$  – матрица межнейронных связей (голограмма);  $\text{PCM}_1$  и  $\text{PCM}_2$  – фазосопрягающие зеркала во входной и корреляционной плоскостях

Для перехода к хаотической динамике по сценарию Фейгенбаума среда в слое  $C$  должна иметь нелинейность  $NI$  [13], тогда для итерации  $N$  выражение (3) примет вид

$$\text{Im}_N(x_k, y_l) = F\left(\frac{F(NI(C_{N-1}(x_k + \xi, y_l + \eta)))}{F^*(\text{Im}_R(x, y))}\right). \quad (4)$$

В силу ограниченности динамического диапазона регистрирующих сред голограммы Фурье (1) и (2) записываются только в ограниченном интервале частот. Соответственно, и гипотезы (3) и (4) строятся не для исходного  $\text{Im}_{per}(x, y)$ , а для ПВР, профильтрованного голограммами.

Эта фильтрация влияет на статистические характеристики порождаемых ПВР гипотез. В частности, реальная информация обычно нестационарна, т.е. ПВР задачи неоднороден. Таким образом, изменение однородности ПВР гипотезы снижает адекватность порожденной гипотезы условиям задачи. В связи с этим представляет интерес оценка влияния фильтрации на статистические характеристики ПВР применительно к свойствам реальных сред. В данной работе для упрощения выкладок примем допущение о разделимости переменных в функции, описывающей ПВР, и, соответственно, используем термины процесс и стационарность. Рассмотрим по отдельности влияние фильтрации на стационарность по математическому ожиданию и дисперсии.

### Анализ влияния частотной фильтрации на стационарность

**Влияние фильтрации на стационарность по математическому ожиданию (МА).** МА  $m_x$  случайного процесса  $p(x)$  в Фурье-плоскости определяется как

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \exp(-j\omega_0 x) dx = F(0),$$

где  $F(v)$  – Фурье-спектр;  $\omega$  – круговая частота  $\omega = 2\pi v$ ,  $v$  – частота;  $j$  – мнимая единица. Поскольку реализация  $\text{Im}(x)$  имеет конечную длину  $L$ , оценка стационарности определяется не только нулевой частотой, но и некоторым интервалом низких частот. Представим реализацию  $\text{Im}(x)$  случайного процесса суммой  $n+1$  гармоник  $X_i$ :

$$\text{Im}(x) = \sum_{i=0}^n X_i(x) = \sum_{i=0}^n \exp\left(-\frac{i}{A}\right) \sin(\omega_i x + \varphi_i),$$

где  $A$  – параметр, описывающий спад экспоненциального спектра;  $\omega_i$  – круговая частота  $i$ -ой гармоники;  $\varphi_i$  – случайная фаза. МА реализации равно

$$\begin{aligned} m(\text{Im}(x)) &= \int_0^L (\text{Im}(x)) dx = \sum_{i=0}^n \exp\left(-\frac{i}{A}\right) \int_0^L \sin(\omega_i x + \varphi_i) dx = \\ &= \sum_{i=0}^n \exp\left(-\frac{i}{A}\right) \frac{1}{L\omega_i} (\cos(\varphi_i) - \cos(\omega_i L + \varphi_i)). \end{aligned}$$

Введем оценку нестационарности реализации следующим образом:

$$Vn_m = \left| \left( m(\text{Im}_l(x)) - m(\text{Im}_r(x)) \right) \right| = \left| \sum_{i=0}^n \exp\left(-\frac{i}{A}\right) \frac{2}{L} \left( \int_0^{\frac{L}{2}} \sin(\omega_i x + \varphi_i) dx - \int_{\frac{L}{2}}^L \sin(\omega_i x + \varphi_i) dx \right) \right| = \left| \sum_{i=0}^n \exp\left(-\frac{i}{A}\right) \frac{2}{L\omega_i} \left( -2 \cos\left(\omega_i \frac{L}{2} + \varphi_i\right) \cdot \left(1 - \cos\left(\omega_i \frac{L}{2}\right)\right) \right) \right| \quad (5)$$

Нетрудно видеть, что для гармонического сигнала оценка равна нулю, если

$$\cos\left(\omega_1 \frac{L}{2}\right) = \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} \frac{L}{2}\right) = 1, \quad (6)$$

$$\frac{L}{2T_1} = 1 + k, k \in Z$$

где  $Z$  – множество натуральных чисел. Таким образом, оценка (6) зависит от нижней частоты среза  $\nu_{\min}$ . Поскольку спектральная плотность реальных изображений уменьшается с частотой, нестационарность реализации обусловлена преимущественно низкочастотными компонентами, период которых  $T_\nu$  сравним с длиной реализации  $L$ . Условие (6) актуально при малом отношении  $L$  к периоду нижней частоты  $T_{\min}$ . Зависимость оценки (6) от  $\nu_{\min}$  при малых  $L/T_{\min}$  немонотонна – при удалении частоты с периодом, кратным  $L$ , самая низкая из оставшихся частот определит рост нестационарности. При  $L/T_{\min} \gg 1$  условие (6) уже не играет большой роли, зависимость становится монотонной.

При полосовой фильтрации для высоких частот  $L/T_{\min} \gg 1$  их вклад в оценку (6) заведомо невелик. Однако при ослаблении высоких частот увеличивается радиус корреляции  $\tau_{corr}$  у вершины корреляционной функции, вследствие этого при вычислении оценки как функции обобщенной частоты  $L/\tau_{corr}$  оценка при измерении  $\tau_{corr}$  у вершины может при полосовой фильтрации расти быстрее, чем при высокочастотной.

**Влияние фильтрации на стационарность по дисперсии.** Дисперсия  $d$  реализации, введенной выше, определяется как

$$D(\text{Im}(x)) = D\left(\sum_{i=0}^n X_i(x)\right) = \sum_{i=0}^n D(X_i(x)) + 2 \sum_{i<j} C_{i,j}(0),$$

где  $C$  – кросс-корреляционная функция  $i$ -ой и  $j$ -ой гармоник. Рассмотрим поведение одной гармоники на ограниченном отрезке  $L$ . Оценку нестационарности для  $i$ -ой гармоники введем следующим образом:

$$Vn_D = \left| D(\text{Im}_l(x)) - D(\text{Im}_r(x)) \right| = \left| \frac{2}{L} \int_0^{\frac{L}{2}} \left( \exp\left(-\frac{1}{N}\right) \sin\left(2\pi\nu_i x + \varphi_i\right) \right)^2 dx - \frac{2}{L} \int_{\frac{L}{2}}^L \left( \exp\left(-\frac{1}{N}\right) \sin\left(2\pi\nu_i x + \varphi_i\right) \right)^2 dx \right| = \left| \frac{1}{4\pi\nu_i L} \exp\left(-\frac{2}{N}\right) \left( \sin\left(4\pi\nu_i \frac{L}{2} + 2\varphi_i\right) \left(1 - \cos(2\pi\nu_i L)\right) \right) \right|. \quad (7)$$

Для стационарности гармонической реализации достаточно выполнения условия

$$1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} L\right) = 0, \quad \frac{L}{T_1} = K,$$

где  $T_1$  – период анализируемой частоты;  $K$  – целое число.

Таким образом, получаем зависимость, аналогичную (6), – преобладающее влияние на оценку оказывают низкие частоты.

### Численное моделирование влияния фильтрации на стационарность

**Условия численного моделирования.** При моделировании использованы реализации случайных процессов со спектрами, характерными для ряда реальных процессов и полей, – экспоненциальным

$$F(\nu) = \exp\left(-\frac{|\nu|}{3}\right)$$

и экспоненциальным с локальным максимумом

$$F(\nu) = \exp\left(-\left|\frac{\nu-15}{3}\right|\right).$$

Оценки стационарности (а не нестационарности, как в предыдущем разделе) вычислялись как функции обобщенной пространственной частоты:

$$V_M \left( \frac{L}{\tau_{corr}} \right) = 1 - \left( \frac{(m(\text{Im}_l) - m(\text{Im}_r))^2}{D} \right) \quad (8)$$

по МА и

$$V_D \left( \frac{L}{\tau_{corr}} \right) = 1 - \left( \frac{(D(\text{Im}_l) - D(\text{Im}_r))^2}{\max(D(\text{Im}_l), D(\text{Im}_r))^2} \right) \quad (9)$$

по дисперсии, соответственно. В последнем случае нестационарность вводилась следующим образом:

$$\text{Im}_n(x) = \text{Im}(x) \exp\left(-\frac{x}{200}\right).$$

Моделировались три типа фильтров.

1. Сигмоидальная функция

$$f(v) = \left( 1 + \exp\left(-\frac{v}{a}\right) \right)^{-1},$$

которая часто используется в теории искусственных НС в качестве активационной функции искусственного нейрона.

2. Функция Гаусса

$$f(v) = \exp\left(-\frac{(v + v_0)^2}{\rho}\right).$$

3. Сумма двух функций Гаусса

$$f(v) = \frac{\exp\left(-\frac{(v + v_0)^2}{\rho}\right) + \exp\left(-\frac{(v - v_0)^2}{\rho}\right)}{\exp\left(-\frac{(2v_0)^2}{\rho}\right) + 1},$$

симметрично смещенных относительно нулевой частоты. Эти фильтры адекватно аппроксимируют передаточные характеристики реальных голограмм Фурье.

Моделировались методы фильтрации, реализуемые при записи голограмм Фурье:

- сдвиг частоты максимума пропускания фильтров в высокочастотную область при сохранении формы фильтрующей функции;
- изменение формы фильтрующей функции при постоянной частоте максимума;
- дополнительная (к вышеописанным фильтрам) режекция низких частот.

**Результаты численного моделирования.** При фильтрациях имеет место изменение формы глобальных максимумов корреляционных функций (ГМКФ) (рис. 2).

При сигмоидальном фильтре происходит сужение ГМКФ, заострение вершины. При фильтрациях Гаусса и суммы двух функций Гаусса изменяется форма ГМКФ – увеличивается радиус у вершины за счет уменьшения пропускания в высокочастотной области, а также уменьшается радиус у основания как результат уменьшения пропускания в низкочастотной области. При сигмоидальном фильтре радиус корреляции убывает быстрее, чем при фильтрации Гаусса, вследствие меньшего пропускания в области высоких частот у фильтра Гаусса.

Результаты численного моделирования подтвердили, что определяющую роль в оценках стационарности по двум первым статистическим моментам играют низкие частоты. При добавлении прямоугольного фильтра высоких частот наблюдались затухающие с ростом обобщенной пространственной частоты осцилляции оценки.

Для примера на рис. 3 приведены зависимости оценок (8) и (9) для описанных методов настройки фильтров. Для удобства сравнения оценки нормированы и приведены к одному интервалу значений [0, 1]. Различия в характере нарастания оценок по МА и дисперсии обусловлены тем, что оценка по математическому ожиданию определяется квадратом пропускания, а оценка по дисперсии – четвертой степенью пропускания.

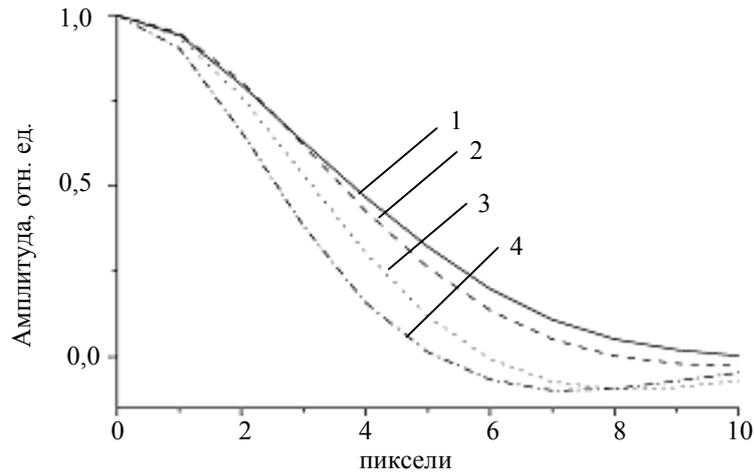


Рис. 2. Сечения глобальных максимумов корреляционных функций для фильтра – суммы двух функций Гаусса: 1 – до фильтрации; 2 – при фильтрации без сдвига и сужения,  $v_0=25$ ,  $\rho=620$ ; 3 – при сужении функции фильтра,  $v_0=25$ ,  $\rho=494$ ; 4 – при сдвиге функции фильтра,  $v_0=29,5$ ,  $\rho=620$

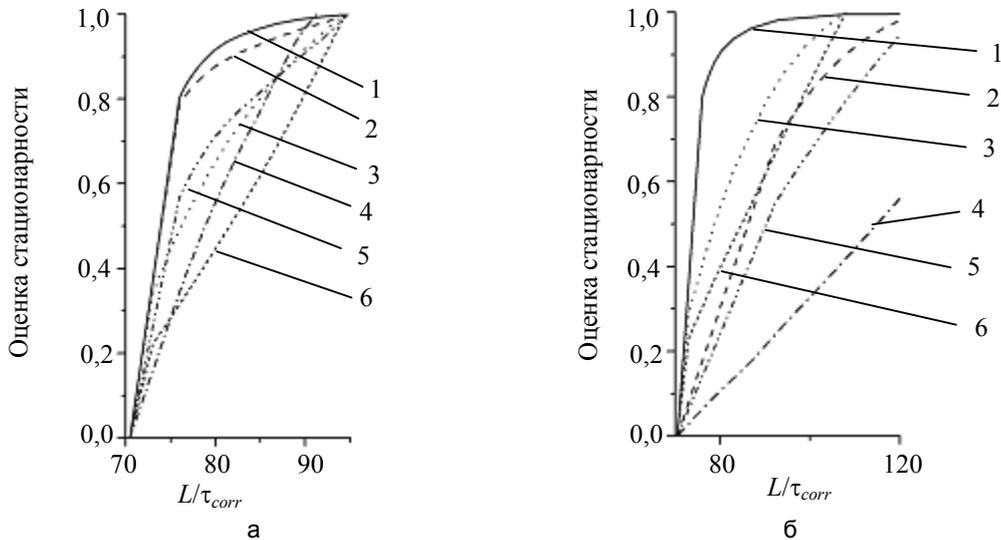


Рис. 3. Оценки стационарности при: сужении фильтрующей функции (а); изменении формы фильтрующей функции (б). Оценки стационарности по дисперсии и по матожиданию: 1, 4 – сигмоидальный фильтр; 2, 5 – фильтр Гаусса; 3, 6 – фильтр – сумма двух функций Гаусса

### Заключение

Ограниченность динамического диапазона регистрирующих сред, используемых для реализации связей нейронных слоев, имеет следствием повышение стационарности формируемых сетью ПВР гипотез по сравнению с характеристиками ПВР условий задачи. Повышение стационарности гипотезы может рассматриваться как снижение ее адекватности условиям задачи. Эффективность стационаризации гипотезы по двум первым статистическим моментам определяется, в первую очередь, степенью ослабления низких частот. Вывод о важности низкочастотного диапазона с точки зрения адекватности гипотезы условиям задачи коррелирует с предложенным в работе [14] методом порождения данной моделью НС индуктивной гипотезы, заключающимся в расширении спектрального диапазона матрицы связей в область низких частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ и РФФИ (проекты № 09-01-00165-а и 09-02-00223-а).

Авторы выражают благодарность профессору И.Б. Фоминых и профессору О.П. Кузнецову за ряд полезных обсуждений.

### Литература

1. Кузнецов О.П. Неклассические парадигмы в ИИ // Известия АН. Сер. Теория и системы управления. – 1995. – № 5. – С. 3–23.
2. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. Нейронные сети и экспертные системы: перспективы интеграции // Новости искусственного интеллекта. – 1996. – № 4. – С. 121–145.

3. Семинар «Отражение образного мышления и интуиции специалиста в системах искусственного интеллекта» // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 1. – С. 22–136; 1998. – № 3. – С. 64–100.
4. Фоминых И.Б. О технологии решения творческих задач // Сб. трудов VIII Национальной конференции по искусственному интеллекту «КИИ-2002». – М.: Физматлит, 2002. – Т. 1. – С. 519–525.
5. Фриман У.Дж. Динамика мозга в восприятии и сознании: творческая роль хаоса // В сб. «Синергетика и психология». Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 13–28.
6. Князева Е.Н. Методы нелинейной динамики в когнитивной науке // В сб. «Синергетика и психология». Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 29–48.
7. Комбс А. Сознание: Хаотическое и странно-аттракторное // В сб. «Синергетика и психология». Вып. 3. Когнитивные процессы. – М.: Когито-Центр, 2004. – С. 49–60.
8. Павлов А.В. О применимости голографических технологий в задаче моделирования творческого мышления // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте: Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Коломна, 28–30 мая 2007. – М.: Физматлит, 2007. – С. 282–290.
9. Павлов А.В. О возможности моделирования творческого мышления методом голографии Фурье // Труды XI Национальной конференции по искусственному интеллекту. – М.: URSS, 2008. – Т. 1. – С. 384–392.
10. Васильев В.Н., Павлов А.В. О применимости голографии Фурье в проблеме моделирования творческого мышления // Информационные системы и технологии. Теория и практика. Сб. Научных трудов. – Шахты: ГОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2009. – С. 91–100.
11. Павлов А.В. О применимости модели линейной регрессии к описанию Фурье-голографии // Оптика и спектроскопия. – 2005. – Т. 98. – № 6. – С. 1033–1037.
12. Grimmet G.R., Sterzaker D.R. Probability and Random Processes, Oxford. Oxford Sc. Publ., Clarendon Press, 1992. – 607 p.
13. Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
14. Павлов А.В. Реализация правдоподобных выводов на нейросетях со связями по схеме голографии Фурье // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 1. – С. 3–14.

- Бекяшева Зоя Салаватовна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, zoya.bekyasheva@phoi.ifmo.ru
- Васильев Владимир Николаевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ректор, vasilev@mail.ifmo.ru
- Павлов Александр Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст.н.с., pavlov@phoi.ifmo.ru

УДК: 535.42 517.443 515.12

## ФОКУСИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ФРАКТАЛЬНЫХ ЗОННЫХ ПЛАСТИНОК

**Я.Б. Музыченко, А.А. Зинчик, С.К. Стафеев**

Представлены результаты аналитического и компьютерного моделирования дифракции Френеля моно- и полихроматических источников света от зонных пластинок, обладающих фрактальной структурой. Показано, что в осевом распределении интенсивности возникают дополнительные максимумы интенсивности, число которых зависит от порядка генерации фрактала, а внутренняя структура фокусов обладает свойствами самоподобия. Продemonстрировано, что использование фрактальных зонных пластинок (ФЗП) позволяет уменьшить хроматические aberrации при их освещении белым светом по сравнению с обычными зонными пластинками Френеля. Моделирование было реализовано для фазовых ФЗП с различной размерностью и порядком генерации.

**Ключевые слова:** дифракция Френеля, зонные пластинки, фрактал, самоподобие, фрактальная размерность, формирование изображений, aberrации.

### Введение

Фракталы с момента их открытия Мандельбротом являются объектом пристального внимания ученых в различных областях научного знания, в том числе и в оптике [1]. В настоящее время большинство работ по оптике фракталов посвящено дифракции света в области Фраунгофера.

Известно, что распределение интенсивности света от фрактального объекта, также как и сам объект, обладает свойствами самоподобия, а по картине дифракции в дальней зоне можно определять некоторые свойства объекта, например, его фрактальную размерность [2–4]. Фрактальные дифракционные решетки обладают рядом преимуществ по сравнению с двумерными периодическими структурами, поскольку существенный вклад в суммарную интенсивность дифракционной картины вносят высокие пространственные частоты, соответствующие мельчайшим деталям фрактала. Данная особенность повышает возможности

методов неразрушающего контроля фазовых неоднородностей прозрачных объектов, основанных на регистрации эталонных тестовых изображений через объекты, искажающие волновой фронт [5].

В области дифракции Френеля теория фракталов нашла применение в создании ФЗП. Интерес к зонным пластинкам Френеля возобновился после того, как они стали ключевым элементом в формировании изображений в таких областях, как терагерцовая томография и мягкая рентгеновская микроскопия [6–7]. Недавно были представлены ФЗП, свойства которых отличаются от свойств обычных пластинок Френеля. В частности, в [8, 9] были представлены интересные экспериментальные результаты исследований, часть из которых не получила должного объяснения в рамках развитых авторами математических моделей. В [9–10] показано, что осевое распределение интенсивности от ФЗП обладает свойствами самоподобия, в распределении появляются дополнительные максимумы излучения. Существующие теоретические и экспериментальные исследования были проведены исключительно для амплитудных ФЗП, хотя для задач дифракции больший интерес представляют фазовые объекты. Кроме этого, вопросы влияния фрактальной размерности на распределение интенсивности остались неизученными. В данной статье представлены результаты аналитического расчета и компьютерного моделирования дифракции Френеля для монохроматических волн и белого света от амплитудных и фазовых ФЗП с различной размерностью и исследованы их фокусирующие свойства. Аналитический расчет проведен для амплитудных ФЗП, а математические модели были реализованы при помощи программы VirtualLab v4.6 компании LightTrans GmbH для фазовых ФЗП. Показано, что помимо главного и кратных фокусов, в осевом распределении интенсивности появляются дополнительные максимумы, число которых зависит от порядка генерации фрактала. При этом внутренняя структура фокусов является самоподобной. Проанализирована зависимость интенсивности света от осевой координаты для пластинок с различными размерностями и порядком генерации. Результаты моделирования полихроматического света от ФЗП показывают, что их использование позволяет уменьшить хроматические aberrации при формировании изображений. Адекватность и предсказательный потенциал созданных математических моделей доказаны их применением к реальным объектам и наблюдением особенностей в продольных и поперечных плоскостях распределений поля интенсивности и фазы.

#### Теоретические сведения и аналитический расчет дифракции Френеля от фрактальных зонных пластинок

Основой для построения ФЗП являются обычные зонные пластинки Френеля, которые представляют собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные кольцевые зоны, радиус которых при освещении плоской волной определяется формулой  $r_m = \sqrt{m\lambda b}$ , где  $m$  – номер зоны;  $\lambda$  – длина волны;  $b$  – расстояние до экрана. Фрактальную зонную пластинку можно представить как обычную, у которой отсутствуют или преобразованы некоторые зоны. Процесс удаления зон или их пространственного преобразования математически может быть представлен как итеративный процесс построения полос Кантора [1] (рис. 1). Определяющей характеристикой фрактальных объектов является их дробная размерность. Для геометрических фракталов размерность определяется формулой  $D = \frac{\ln N}{\ln(1/\mu)}$ , где  $N$  – число сегментов, остающихся после первой итерации,  $\mu$  – масштабирующий множитель [1]. Например, на первом этапе построения полос Кантора с фрактальной размерностью  $D = \ln 2 / \ln 3 = 0,631$  отрезок делится на три равных части (порядок генерации фрактала  $S=1$ ), средняя из которых удаляется, на втором такая же процедура происходит с двумя оставшимися отрезками ( $S=2$ ) и т.д.



Рис. 1. Этапы построения полос Кантора

Пусть на зонную пластинку с амплитудной функцией пропускания  $p(r_0)$ , где  $r_0$  – радиальная координата в плоскости объекта, падает плоская монохроматическая волна с длиной волны  $\lambda$ . Интенсивность излучения в плоскости  $(r, z)$ , где  $z$  – расстояние от пластинки,  $r$  – радиальная координата в плоскости экрана, описывается интегральным приближением Френеля [11]:

$$I(r, z) = \left( \frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_0^a p(r_0) \exp\left( \frac{i\pi}{\lambda z} r_0^2 \right) J_0\left( \frac{2\pi r r_0}{\lambda z} \right) r_0 dr_0 \right|^2, \quad (1)$$

где  $a$  – радиус внешнего кольца зонной пластинки. В частности, распределение интенсивности вдоль оптической оси, как следует из (1), описывается формулой

$$I(0, z) = \left( \frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_0^a p(r_0) \exp\left( \frac{i\pi}{\lambda z} r_0^2 \right) r_0 dr_0 \right|^2. \quad (2)$$

После введения новых переменных  $l = \left( \frac{r_0}{a} \right)^2 - 0,5$ ;  $q(l) = p(r_0)$  и  $u = \frac{a^2}{2\lambda z}$  получаем [11]:

$$I(0, u) = 4\pi^2 u^2 \left| \int_{-0,5}^{0,5} q(l) \exp(i2\pi ul) dl \right|^2. \quad (3)$$

Основываясь на самоподобии фрактальных структур и свойствах Фурье-преобразования, распределение интенсивности вдоль оптической оси может быть записано как [9–11]:

$$I(0, u, N, S) = 4 \sin^2 \left[ \frac{\pi u}{(2N-1)^S} \right] \prod_{i=1}^S \frac{\sin^2 \left[ \frac{2\pi N u}{(2N-1)^i} \right]}{\sin^2 \left[ \frac{2\pi u}{(2N-1)^i} \right]}, \quad (4)$$

где  $N$  – число сегментов, остающихся после итерации при построении фрактала;  $S$  – порядок генерации фрактала. В случае обычной зонной пластинки Френеля формула (4) принимает вид

$$I(0, u, N, S) = \frac{\sin^2 \left[ \frac{2\pi M u}{(2N-1)^S} \right]}{\cos^2 \left[ \frac{\pi u}{(2N-1)^S} \right]}, \quad (5)$$

где  $M$  – число прозрачных зон пластинки.

Аналитический расчет был проведен для трех порядков генерации амплитудной ФЗП, построенной по принципу полос Кантора с фрактальной размерностью  $D = \ln 2 / \ln 3 = 0,631$ . Соответствующая ей зонная пластинка Френеля состоит из 9 кольцевых зон, 5 из которых являются прозрачными (рис. 2, а). На первом порядке генерации удаляется  $(2N-1)$  средних зон, причем радиус первой зоны, который определяет положение главного фокуса пластинки, остается неизменным (рис. 2, б). На втором и третьем порядке генерации размер пластинки увеличивается, число зон 27 и 81 соответственно (рис. 2, в, г).

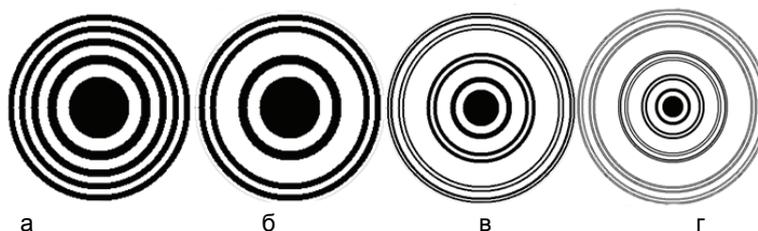


Рис. 2. Зонная пластинка Френеля (а); ФЗП с порядком генерации фрактала:  $S=1$  (б);  $S=2$  (в);  $S=3$  (г). Изображения в негативе

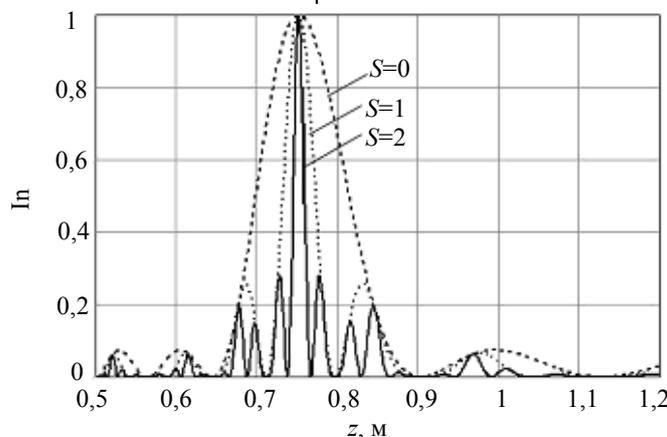


Рис. 3. Зависимость нормированного значения интенсивности  $I_n$  от осевой координаты  $z$  монохроматической плоской волны, дифрагировавшей на обычной пластинке Френеля ( $S=0$ ,  $a=1,9$  мм) и на ФЗП ( $S=1$ ,  $a=1,9$  мм;  $S=2$ ,  $a=3,29$  мм)

На рис. 3 показаны результаты аналитического моделирования дифракции в ближней зоне дифракции плоской монохроматической волны ( $\lambda = 532$  нм) для обычной зонной пластинки ( $S=0$ ,  $a=1,90$  мм) и двух порядков генерации ФЗП ( $S=1$ ,  $a=1,90$  мм;  $S=2$ ,  $a=3,29$  мм),  $a$  – радиус внешнего кольца пластинки. На рис. 3 представлена зависимость нормированного значения интенсивности  $I_n$  от осевой координаты окрестности главного фокуса. Из графика видно, что с ростом порядка генерации фрактала в спектре излучения возникают дополнительные максимумы, а внутренняя структура фокуса является самоподобной. Осевое распределение интенсивности является огибающей для каждого следующего порядка генерации фрактала; с увеличением параметра  $S$  излучение становится все более сфокусированным.

### Компьютерное моделирование дифракции Френеля от ФЗП

Компьютерное моделирование было реализовано при помощи программного обеспечения Virtual-Lab. ФЗП загружались в программу в виде кодированных фазовых двумерных распределений. Для их обработки были разработаны программные модули, реализующие особенности построения оптических схем для наблюдения дифракции Френеля с возможностью вариации глубины фазового сдвига, а также минимального шага его дискретизации. В состав программного модуля входил блок реализации итерационного алгоритма управления фрактальной размерностью и порядком генерации. Для моделирования были выбраны фазовые ФЗП, так как для практического применения они представляют намного больший интерес, благодаря возможности четырехкратного увеличения интенсивности излучения. В этом случае пластинка обладает единичной функцией пропускания, прозрачным зонам соответствует фазовый сдвиг  $\Delta\varphi=0$ , непрозрачным  $\Delta\varphi=\pi$ . Моделирование было реализовано для пластинок с тремя различными фрактальными размерностями. Основой для построения ФЗП с размерностью  $D = \ln 3 / \ln 5 = 0,683$  является обычная амплитудная зонная пластинка с 25 прозрачными зонами (рис. 4, а). На первом порядке генерации из пластинки удаляются две группы по пять прозрачных зон (рис. 4, б), на втором порядке генерации удаляется шесть прозрачных зон (рис. 4, в).

Положение главного фокуса зонной пластинки определяется формулой  $f_1 = r_1^2 / \lambda$ , где  $r_1$  – радиус первой зоны Френеля. В спектре излучения также возникают кратные фокусы  $f_n = f_1 / (2n - 1)$ ,  $n$  – целое число. Параметры моделирования:  $\lambda=532$  нм,  $r_1=0,630$  мм,  $f_1=0,752$  м. На рис. 4 (снизу) показаны зависимости распределения интенсивности от осевой координаты в окрестности главного фокуса зонной пластинки. С увеличением порядка генерации в распределении интенсивности возникают дополнительные максимумы излучения, внутренняя структура распределения является самоподобной. В отличие от аналитического моделирования, при таком построении ФЗП распределение интенсивности расширяется.

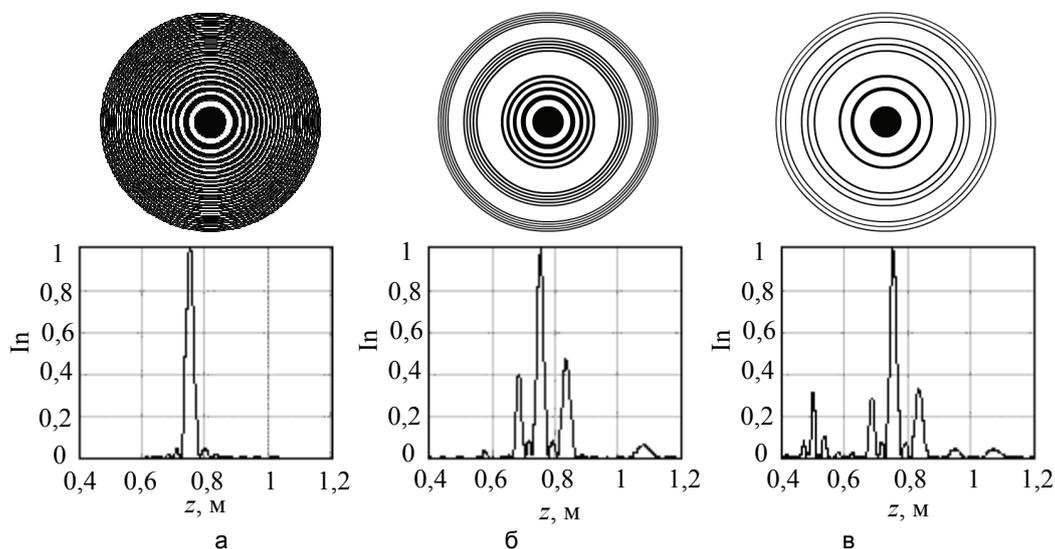


Рис. 4. Этапы построения ФЗП с размерностью  $D = \ln 3 / \ln 5 = 0,683$  (сверху, изображения в негативе) и осевое распределение интенсивности в окрестности главного фокуса (снизу): (а –  $S=0$ ; б –  $S=1$ ; в –  $S=2$ )

На рис. 5, 6 показаны процессы построения ФЗП с размерностями  $D = \ln 2 / \ln 3 = 0,631$  и  $D = \ln 2 / \ln 5 = 0,431$ , а также приведены зависимости распределения интенсивности от осевой координаты в окрестности главного фокуса. Как видно из рисунка, с ростом порядка генерации фрактала структура поля в околофокусном пространстве усложняется с сохранением масштабируемости. Из приведенных графиков можно увидеть, что с уменьшением значения фрактальной размерности распределение интенсивности

становится более сложным, число дополнительных максимумов и их относительная интенсивность увеличивается.

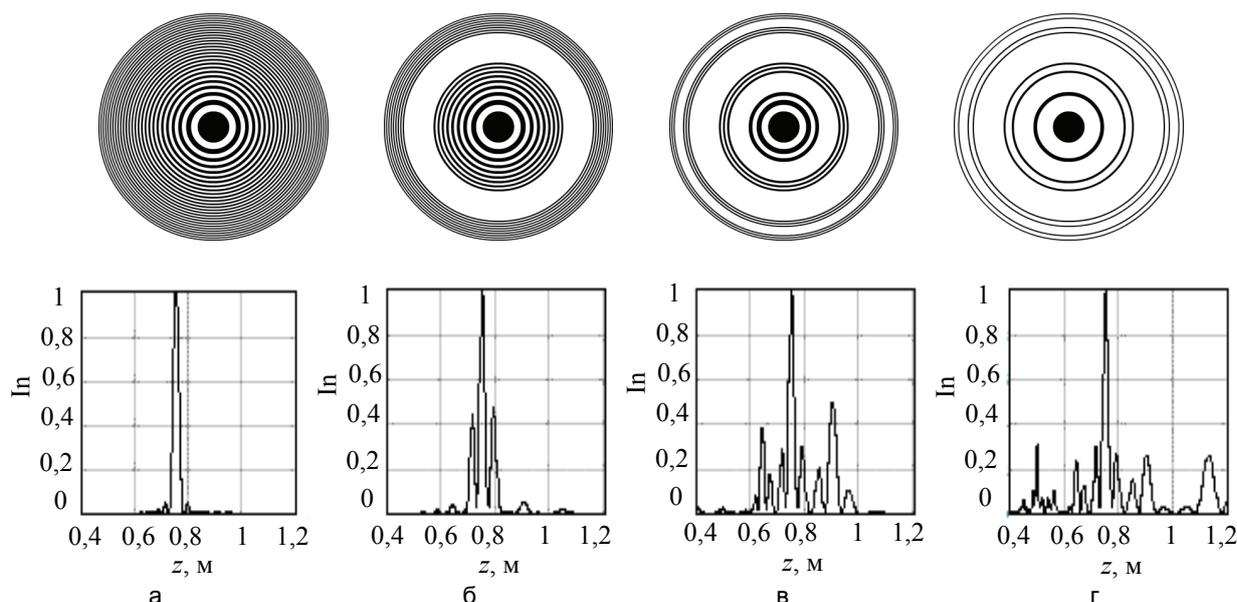


Рис. 5. Этапы построения ФЗП с размерностью  $D = \ln 2 / \ln 3 = 0,631$  (сверху, изображения в негативе) и осевое распределение интенсивности в окрестности главного фокуса (снизу): (а –  $S=0$ ; б –  $S=1$ ; в –  $S=2$ ; г –  $S=3$ )

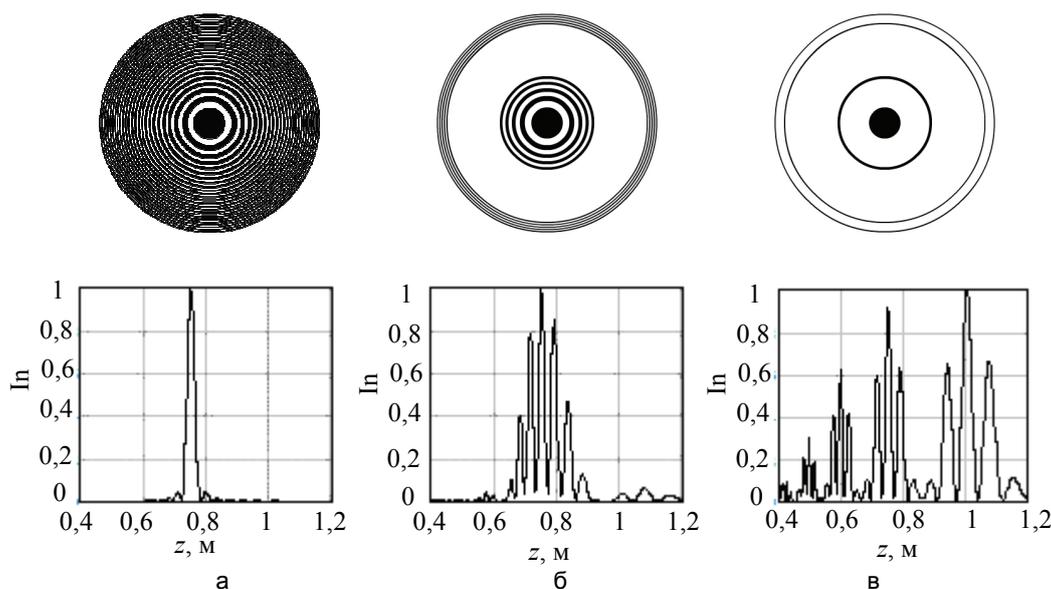


Рис. 6. Этапы построения ФЗП с размерностью  $D = \ln 2 / \ln 5 = 0,431$  (сверху, изображения в негативе) и осевое распределение интенсивности в окрестности главного фокуса (снизу): (а –  $S=0$ ; б –  $S=1$ ; в –  $S=2$ )

В структуре кратных фокусов зонной пластинки с ростом порядка генерации также возникают дополнительные максимумы с самоподобной структурой. Так как результаты моделирования для кратных фокусов совпадают с результатами для главного фокуса, в статье они не представлены.

Возникновение дополнительных фокусов в распределении интенсивности от ФЗП позволяет выдвинуть гипотезу об уменьшении хроматических aberrаций при освещении пластинок белым светом. Для проверки данной гипотезы было проведено моделирование дифракции от фазовой ФЗП с размерностью  $D = \ln 2 / \ln 3 = 0,631$  триплета длин волн 635 нм, 532 нм и 473 нм с удельным весом 1,05, 0,62 и 0,8 соответственно. Результаты моделирования для обычной зонной пластинки и второго порядка генерации ФЗП представлены на рис. 7.

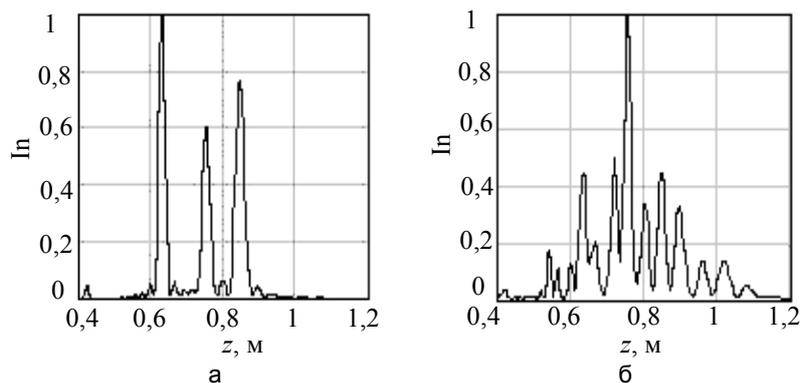


Рис. 7. Осевое распределение интенсивности для обычной (а) и фрактальной (б) зонной пластинки при их освещении белым светом

### Заключение

Представлены результаты аналитического расчета и компьютерного моделирования дифракции Френеля от ФЗП. Показано, что с ростом порядка генерации фрактала осевое распределение интенсивности усложняется, проявляя свойства самоподобия. Реализованные программные модули с настраиваемыми итерационными алгоритмами позволили обнаружить новые и ранее описанные особенности пространственных спектров ФЗП. Результаты моделирования дифракции Френеля полихроматического источника доказывают, что использование ФЗП позволяет минимизировать хроматические aberrации. Данное свойство может быть использовано во многих областях науки и техники, где существует потребность в формировании изображений высокого качества.

### Литература

1. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
2. Зинчик А.А., Музыченко Я.Б., Смирнов А.В., Стафеев С.К. Расчет фрактальной размерности регулярных фракталов по картине дифракции в дальней зоне // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 2. – С.17–24.
3. Uozumi J., Asakura T. Fraunhofer diffraction by Koch fractals: the dimensionality // Journal of Modern Optics. – 1999. – V. 38. – № 7. – P. 1335–1347.
4. Horvath P. Koch fractals in physical optics and their Fraunhofer diffraction patterns // Optics. – 2010. – V. 121. – P. 206–213.
5. Зинчик А.А., Музыченко Я.Б., Стафеев С.К. О принципах амплитудной и амплитудно-фазовой пространственной фильтрации // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 46–52.
6. Wang S., Zhang X. Terahertz tomographic imaging with a Fresnel lens // Opt. Photon. News. – 2002. – № 13. – P. 59.
7. Wang Y., Yun W., Jacobsen C. Achromatic Fresnel optics for wideband extreme-ultraviolet and X-ray imaging // Nature. – 2003. – № 424. – P. 50–53.
8. Saavedra G., Furlan W.D., Monsoriu J.A. Fractal zone plates // Opt. Lett. – 2003. – № 28. – P. 971–973.
9. Mendoza-Yero O. Fractal generalized zone plates // J. Opt. Soc. Am. A. – 2009. – V. 26. – № 5. – P. 1161–1166.
10. Музыченко Я.Б. Моделирование оптических явлений при помощи программного обеспечения VirtualLab // Компьютерные инструменты в образовании. – 2010. – №3. – С. 45–52.
11. Rodrigo J. A., Alieva T., Calvo M. L., Davis J. A. Diffraction by Cantor fractal zone plates // Journal of Modern Optics. – 2005. – V. 52. – № 18. – P. 2771–2783.

<i>Музыченко Яна Борисовна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, myb@rambler.ru
<i>Зинчик Александр Адольфович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, zinchik_alex@mail.ru
<i>Стафеев Сергей Константинович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, stafeevs@yahoo.com

УДК 517.938

## ВОЛНОВОДНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Д.Г. Матвеев

Рассмотрены системы из двухмерных и трехмерных плоских волноводов в однородном электрическом поле. Построены соответствующие математические модели, проанализированные с помощью метода прямой вариационной оценки. Продемонстрирована возможность управления положением связанного состояния электрона при помощи внешнего электрического поля в наноструктурах волноводного типа.

**Ключевые слова:** квантовые волноводы, связанные состояния, оценки спектра.

### Введение

Создание наноструктур с заданными свойствами является одним из наиболее развитых направлений современных исследований в области нанотехнологий [1]. Известные решения позволяют производить двух- и трехмерные структуры с определенным набором параметров и характеристик. Различные материалы и легирование предоставляют выбор граничных условий и режимов проводимости [2]. Примеси и пространственные неоднородности привносят дополнительные особенности в электронный транспорт, добавляя резонансы или связанные состояния [3]. Одним словом, технология производства структур различной сложности и размеров уже вышла на принципиально новый уровень и продолжает развиваться. Это ставит вопрос о возможности изменения свойств уже существующих структур для варьирования случаев использования и количества операций над кубитами, выполнимых с помощью конкретной реализации наноразмерной системы.

Одним из примеров решения данного вопроса может быть рассмотрение конкретной математической модели для фиксированной структурной системы с применением внешнего воздействия. Такая модель позволяет спрогнозировать результаты воздействия извне системы на ее ключевые особенности. Оценка зависимости от внешнего электрического поля связанного состояния в системе из двух волноводов, соединенных через отверстие, и является предметом настоящей статьи.

Построены две модели – для случая двухмерных волноводов с отверстием и для случая трехмерных плоских волноводов с квадратным соединительным окном. Начальными параметрами данных моделей являются их пространственные и размерные характеристики: толщина и ширина волноводов, длина и ширина отверстия. При введении поперечного электрического поля в качестве влияющего параметра появляется напряженность. Рассмотренные модели изображены на рис. 1, 2.

Будем оценивать положение собственного значения ниже границы непрерывного спектра для оператора Лапласа у построенных моделей. Известно, что в случае отсутствия электрического поля существует связанное состояние в спектре лапласиана подобной системы [4], что верно и при наличии периодических соединительных отверстий [5].

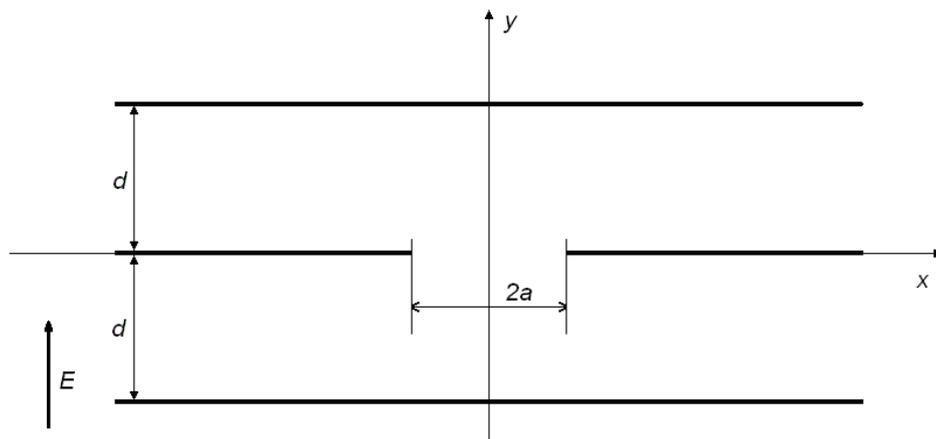


Рис. 1. Двухмерные волноводы с соединительным отверстием

Доказательство существования собственного значения и нахождение зависимости его положения от введенного поля позволят размышлять о возможности управления поведением структуры извне. Управление расположением связанного состояния ведет к управлению электронным транспортом в наноструктуре в принципе. А изменение свойств транспорта в реальном времени открывает путь для реализации квантовых операций любой сложности. Не стоит думать, что приведенная модель является собой решение всех проблем с квантовыми вычислениями [6], но, по крайней мере, она может рассматриваться

как непосредственное приближение для описания квантово-вычислительных устройств, а результаты дают толчок для продолжения исследований в области управления.

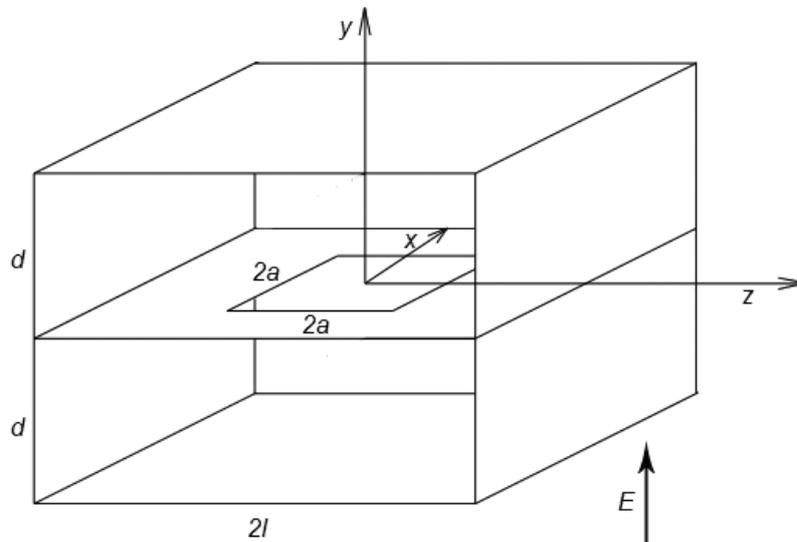


Рис. 2. Трехмерные волноводы с квадратным связующим окном

### Методы исследования

Основным методом, использованным при проведении доказательства, является метод прямой вариационной оценки (метод Ритца). Важной для исследования становится особенность этого метода, заключающаяся в предоставлении оценки сверху для уровня энергий оператора. Последовательность пробных функций приближает реальное решение со стороны верхней границы и предоставляет возможность оценивать его положение относительно границы непрерывного спектра. Действительно, нахождение пробной функции, для которой полученное собственное значение оператора будет расположено ниже обозначенной границы, утверждает о наличии связанного состояния в спектре, находящегося на равном или большем расстоянии от непрерывного спектра.

Построение пробной функции – один из наиболее важных этапов исследования. Полученная функция должна иметь правдоподобные зависимости от основных параметров системы и учитывать вклад электрического поля для поперечных компонент. Оценка, полученная с использованием достоверных функциональных зависимостей, дает возможность анализа пропорциональности результата свойствам системы и позволяет оценить вклад напряженности в изменение ширины зазора в спектре оператора Лапласа.

В случае двумерной модели достаточно определить поведение пробной функции на продолжении волноводов  $F(x, y)$  и в месте разрыва связующей поверхности  $G(x, y)$  для продольной  $x$  и поперечной  $y$  координаты. В трехмерном случае добавляется компонента  $Z(z)$  для описания пробной функции по координате  $z$  вне соединительного окна и компонента  $T(z)$ , характеризующая поведение электрона по координате  $z$  внутри окна. Таким образом, результирующая функция будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi(x, y, z) &= F(x, y, z) + G(x, y, z) \\ (2D: \psi(x, y) &= F(x, y) + G(x, y)) \\ F(x, y, z) &= \alpha U(x)V(y)Z(z), \quad G(x, y, z) = \eta P(x)R(y)T(z). \\ (2D: F(x, y) &= \alpha U(x)V(y), \quad G(x, y) = \eta P(x)R(y)) \end{aligned}$$

Выбор граничных условий для пробной функции зависит от типа материалов, используемых для квантовых волноводов. Условия Дирихле подходят для диэлектрических гетероструктур, а условия Неймана – для слоистых металлических наноструктур. Стоит отметить, что результаты исследования остаются актуальными при выборе любых из предложенных граничных условий.

Для получения оценки зазора в спектре оператора Лапласа  $H = -\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  необходимо до-

казать отрицательность разности собственного значения для приведенной функции и граничного собственного значения для непрерывного спектра:

$$\begin{aligned} H\psi &= \lambda_n \psi, \\ (H\psi, \psi) &= \lambda_0(\psi, \psi) \end{aligned}$$

$$\lambda_n = \frac{(H\psi, \psi)}{(\psi, \psi)}, \quad \lambda_n - \lambda_0 < 0,$$

$$\frac{(H\psi, \psi)}{(\psi, \psi)} - \lambda_0 < 0,$$

$$\frac{(H\psi, \psi) - \lambda_0(\psi, \psi)}{(\psi, \psi)} < 0,$$

где  $\lambda_n$  – собственное значение для выбранной пробной функции,  $\lambda_0$  – граница непрерывного спектра.

### Результаты

Доказательство нескольких предварительных лемм и основной теоремы в [7] приводят к интересным результатам.

1. Прослеживается зависимость положения собственного значения от ширины соединяющего отверстия в положительной степени, что подтверждает правильность результата предельным переходом к [4] при отсутствии внешнего поля.
2. Для двухмерного и трехмерного случая, демонстрируется приближенный вид влияния электрического поля как дополнительного члена пропорциональности.

Приведем вид основных результатов для двухмерного случая,

$$\delta \geq \frac{2^{12} a^4 \left( \frac{2m\lambda}{\hbar^2} + \frac{E^2}{16\lambda^2} \right)^2}{\pi^6 d^2 (2 + \varepsilon_1)^2 (2 + \varepsilon_2)},$$

и для трехмерного случая,

$$\delta \geq \frac{3 \cdot 2^{17} a^6 \left( \frac{2m\lambda}{\hbar^2} + \frac{E^2}{16\lambda^2} \right)^2}{\pi^{10} d^2 (3 + 2\varepsilon_1)^2 \|Z\|^4 (2 + \varepsilon_2)}.$$

Здесь  $m$  – масса электрона;  $\hbar$  – постоянная Планка;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – положительные константы.

Можно заметить, что в обоих случаях ширина зазора  $\delta$  не имеет явной пропорциональной зависимости от напряженности электрического поля. Этот факт имеет реальный физический смысл – исключение влияния внешнего поля вызовет не исчезновение связанного состояния, а лишь его перемещение в спектре оператора Лапласа, что хорошо согласуется с результатами [4].

С другой стороны, изменение внешнего воздействия посредством варьирования напряженности влечет за собой сдвиг собственного значения на контролируемое расстояние в выбранном направлении, позволяя управление характеристиками электронного транспорта в подобных системах.

Учитывая тот факт, что при изгибе плоских волноводов (включая слабый) связанные состояния могут переходить в резонансы [3], управление положением собственного значения может также иметь свое развитие в управлении положением резонансов системы, что является возможным продолжением исследования в этой области.

### Заключение

Результаты исследования дают основания полагать, что существует реальная возможность обеспечить динамическое изменение свойств электронного транспорта в наноструктурах волноводного типа. Использование данной возможности позволит добиться увеличения числа различных результатов взаимодействия частиц при прохождении системы и поведения частиц в самой системе.

Являясь приближением операции над кубитами, рассмотренная модель приводит к выводу о реальности контролируемых квантовых операций в устройствах подобного типа. А это есть достаточное обоснование, непосредственно приближающее нас в теории к созданию квантовых вычислителей революционно нового типа на практике.

### Литература

1. Алферов Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В., Копьев П.С., Сурис Р.А. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. – 2003. – С. 3–13.
2. J.C. Ho et al. Controlled nanoscale doping of semiconductors via molecular monolayers // Nature Mater. – 2008. – № 7. – 62 p.
3. Hynek Kovařík and Andrea Sacchetti. Resonance in twisted quantum waveguides // Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical. – 2007. – V. 40. – № 29.

4. Exner P. Laterally Coupled Quantum Waveguides // Cont. Math. – 1998. – V. 217. – P. 69–82.
5. Мельничук О.П., Попов И.Ю. Квантовые волноводы, связанные через периодическую систему малых отверстий: оценка запрещенной зоны // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28. – Вып. 8. – С. 69–73.
6. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. – М.: Мир, 2006. – 824 с.
7. Matveev D.G., Popov I.Yu. Bound Electron States in a System of Coupled Waveguides in a Transverse Electric Field // Technical Physics Letters. – 2009. – V. 35. – № 11. – P. 1007–1009.

*Матвеев Дмитрий Геннадьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, d.g.matveev@gmail.com

УДК 517/519:62.50:681.306

**ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫХ  
ВЕКТОРНО-МАТРИЧНЫХ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ  
АНТРОПОКОМПОНЕНТОВ-ОПЕРАТОРОВ В СОСТАВЕ  
СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Н.А. Дударенко, М.В. Полякова, А.В. Ушаков**

Ставится задача формирования векторно-матричного модельного описания (МО) сложной динамической системы (СДС) с антропокомпонентами-операторами на основе интервальных представлений. С использованием аппарата интервальной арифметики и алгебры формируется оценка роста значения относительной интервальности системных компонентов МО СДС при переходе от передаточных функций к векторно-матричному представлению метода пространства состояний. По полученным оценкам определяется степень применимости аппарата теории чувствительности в рамках функции чувствительности первого порядка для оценки вариаций функционалов вырождения СДС на угловых реализациях интервальных системных параметров критериальных матриц.

**Ключевые слова:** интервальный системный параметр, векторно-матричное представление, сложная динамическая система, оценка относительной интервальности, интервальность функционала вырождения.

**Введение**

Проблема, вынесенная в заголовок статьи, возникает, когда исследователь анализирует СДС на предмет ее возможного вырождения. Статья носит технологический характер и посвящена случаю, когда параметры системы – интервальные, причем построение критериальной матрицы опирается на векторно-матричное описание СДС.

В статье рассматривается процесс формирования интервальных векторно-матричных модельных представлений сложных динамических систем с антропокомпонентами-операторами, реализуемый по канонической двухшаговой схеме. Первый шаг этой схемы состоит в формировании передаточных функций антропокомпонентов-операторов с интервальными системными параметрами. Второй шаг состоит в переходе от аппарата передаточных функций к аппарату векторно-матричных представлений метода пространства состояний с использованием процедур интервальной алгебры, поэтому встает задача контроля роста относительной интервальности системных компонентов. Последнее обстоятельство авторами берется под особый контроль в связи с тем, что при решении задач оценки интервальности функционалов вырождения используется аппарат чувствительности в рамках функции чувствительности первого порядка, корректность применимости которого ограничена известными рамками [1].

**Формирование интервальных векторно-матричных модельных представлений  
антропокомпонентов-операторов в составе сложных динамических систем**

Сформируем интервальные векторно-матричные представления антропокомпонентов-операторов с учетом: эффективности их деятельности на различных этапах рабочей смены и характера возложенной на них функциональной нагрузки в технологическом процессе.

Рассмотрим варианты модельных описаний антропокомпонентов-операторов, относящихся к классу «информационных операторов» (ИО). Так, первый вариант модельного представления описывает поведение оператора в составе СДС, занятого в обработке информационного потока, характеризующегося заметной динамикой его модификации. Примерами первого варианта модельного описания антропокомпонентов-операторов являются представители таких профессий, как пилоты летательных аппаратов, механики-водители танков, водители транспортных средств и т.д.

Передаточная функция с интервальными системными параметрами для описания отношения «вход–выход» антропокомпонента-оператора первого варианта, полученная на основе библиографического анализа проблемы [2], обычно задается в форме

$$[W_{uoi}(s)] = \frac{[k_1]([T_{11}]s + 1)}{([T_{12}]s + 1)([T_{13}]s + 1)} \cdot e^{-[\tau_1]s}, \tag{1}$$

где  $[k_1]$  – интервальный коэффициент, характеризующий передачу воспринимаемой антропокомпонентом-оператором «картинной информации» в моторное движение конкретного физиологического органа информационного оператора;  $[T_{11}]$ ,  $[T_{12}]$ ,  $[T_{13}]$  – интервальные постоянные времени: дифференцирующего

звена, математически учитывающего способность упреждать (экстраполировать) развитие информационного процесса антропокомпонентом-оператором; процесса восприятия информации антропокомпонентом-оператором, вызванного несовершенством ее представления и адаптацией оператора к ней; инерционной реакции, вызванной нервно-мышечной динамикой физиологического органа антропокомпонента-оператора, соответственно;  $[\tau_1]$  – величина чистого запаздывания, определяемая тренированностью антропокомпонента-оператора. Значения интервальных величин:  $[k_1] = [0,75; 1,25]$ ;  $[T_{11}] = [1,35; 2,25]$ с;  $[T_{12}] = [15; 25]$ с;  $[T_{13}] = [0,81; 1,36]$ с;  $[\tau] = [0,15; 0,25]$ с.

Второй вариант модельного представления описывает поведение антропокомпонента-оператора в составе СДС, обрабатывающего информационный поток с заметным уровнем информационной однотипности и монотонности. Примерами этого модельного описания являются представители таких профессий, как диспетчеры дистанционного управления распределенными технологическими ресурсами, операторы автоматизированных рабочих мест; аналитики энергосистем, инерционных технологических процессов и т.д.

Передаточная функция с интервальными системными параметрами для описания отношения «вход–выход» антропокомпонента-оператора второго варианта, полученная на основе библиографического анализа проблемы [2], задается в форме

$$[W_{uo2}(s)] = \frac{[k_2]([T_{21}]s + 1)}{([T_{22}]s + 1)s} \cdot e^{-[\tau_2]s}, \quad (2)$$

где  $[k_2]$  – интервальный коэффициент, характеризующий передачу воспринимаемой «картинной информации» в моторное движение физиологического органа антропокомпонента-оператора;  $[T_{21}], [T_{22}]$  – интервальные постоянные времени:  $[T_{21}]$  характеризует способность антропокомпонента-оператора предвидеть развитие информационного процесса;  $[T_{22}]$  – совокупная временная оценка длительности процесса восприятия информации, вызванная несовершенством ее представления и уровнем адаптируемости к ней антропокомпонента-оператора (кроме того, она характеризует естественную задержку реакции антропокомпонента-оператора, связанную с динамикой нервно-мышечной системы человека);  $[\tau_2]$  – величина реакции запаздывания, определяемая тренированностью антропокомпонента-оператора;  $1/s$  – интегрирующее звено в передаточной функции отражает способность антропокомпонента-оператора накапливать опыт. Значения интервальных величин:  $[k_2] = [0,75; 1,25]$ ;  $[T_{21}] = [1,35; 2,25]$ с;  $[T_{22}] = [15; 25]$ с;  $[\tau] = [0,15; 0,25]$ с.

Теперь обратимся к модельному описанию класса «технологических операторов» (ТО) с интервальными системными параметрами. Примерами антропокомпонентов, принадлежащих этому классу, являются представители профессий, занятых в формировании материальных потоков, связанных с обработкой и формированием узлов и деталей, функциональное соединение которых образует готовый потребительский продукт. Для построения передаточной функции с учетом эффективности работы антропокомпонента-оператора в течение рабочей смены приведем кривую на рисунке [3].



Рисунок. Кривая эффективности деятельности антропокомпонента-оператора на разных этапах рабочей смены: ВР – темп «вработывания»; ОЭ – фаза оптимальной эффективности деятельности антропокомпонента; ПК – фаза полной компенсации; НК – фаза неустойчивой компенсации; КП – фаза конечного прорыва

Для модели ТО выделим темп «вработывания» и темп устavanja. Последний, согласно рисунку, формируется, начиная с этапа полной компенсации, и имеет место до конца рабочей смены. Выбранные факторы влияют в течение рабочей смены на производительность антропокомпонента-оператора. Учитывая их, передаточная функция с интервальными параметрами для модели ТО примет вид

$$[W_3(s)] = \frac{[T_{31}]s}{[T_{31}]s+1} \cdot \frac{1}{[T_{32}]s+1} \cdot \frac{1}{s}, \quad (3)$$

где  $[T_{31}]$ ,  $[T_{32}]$  – интервальные постоянные времени: нарастания усталости (спадание производительности труда) по экспоненциальному закону у антропокомпонента-оператора; нарастания производительности труда («вработывание») антропокомпонента-оператора с началом рабочей смены соответственно;  $1/s$  – интегрирующее звено, которое отражает процесс накопления результата выполнения технологического задания антропокомпонентом-оператором по обработке и формированию узлов и деталей, функциональное соединение которых образует готовый потребительский продукт.

Если воспользоваться экспоненциальной аппроксимацией отрезков кривой рисунка, то для постоянных времени можно записать  $[T_{31}] = [20850; 34750]с$ ;  $[T_{32}] = [600; 1800]с$ .

Охарактеризуем интервальные системные параметры передаточных функций антропокомпонентов типа ИО и ТО оценками их относительной интервальности постоянных времени, задаваемых в форме

$$[\delta_I T_{ij}] = \frac{|\Delta T_{ij}|}{|T_{ij0}|} \leq 0,25 \quad (i = \overline{1, 2}; j = \overline{1, 3}); \quad [\delta_I \tau_i] = \frac{|\Delta \tau_i|}{|\tau_{i0}|} \leq 0,25 \quad (i = \overline{1, 2}). \quad (4)$$

В соотношениях (4) заложены требования к величинам относительных интервальных оценок системных параметров, которые гарантируют обеспечение нормального функционирования СДС.

В ходе проведенной работы по формированию интервальных векторно-матричных модельных представлений сложных динамических систем с антропокомпонентами-операторами авторы сделали важное примечание: переход от аппарата передаточных функций к аппарату векторно-матричных представлений метода пространства состояний с использованием арифметических процедур приводит к накоплению относительных интервальностей композитарных матричных элементов, что наглядно представлено в таблице.

$\delta_I \{[\#]\} \%$	0	5	10	15	20	25	30	50
$\delta_I \{[*]\}^{-1} \%$	0	5	10	15	20	25	30	50
$\delta_I \{[(\circ)][(\bullet)]\} \%$	0	10,25	21	32,25	44,4	56,25	69	125
$\delta_I \{[(\bullet)][(*)]^{-1}\} \%$	0	5	19,8	29,33	38,46	47,05	55,04	80
$\delta_I \{[(\circ)][(\bullet)][(*)]^{-1}\} \%$	0	15,78	33,3	52,76	61,32	98,49	125,1	262,5

Таблица. Значения оценок относительных интервальностей композированных матричных компонентов

### Функционалы вырождения. Оценка их интервальности

Ограничимся динамической моделью ТО. Для него характерно то обстоятельство, что задание на рабочую смену математически представляет собой вынуждающую силу, а потому в качестве критериальной матрицы  $N$  следует брать матрицу  $N_e(t)$ , описывающую вынужденное движение системы по выходу [4], задаваемую в форме

$$N_e(t) = C(Te^{Et} - e^{Ft}T), \quad (5)$$

где матрица  $T$  удовлетворяет матричному уравнению Сильвестра [5]

$$TE - FT = GP, \quad (6)$$

а матрица  $E$  представляет собой матрицу состояний модели задающего воздействия  $g(t)$ .

Для контроля вырождения воспользуемся аппаратом функционалов вырождения [4], определяемых выражением

$$J_v(N) = \alpha_v \{N\} / \alpha_1 \{N\}; \quad v = \overline{m, 1}, \quad (7)$$

где  $N - (m \times m)$  – критериальная матрица антропокомпонента, участвующего в технологическом процессе сложной динамической системы, а  $\alpha_v \{N\}; \quad v = \overline{m, 1}$  – элементы алгебраического спектра сингулярных чисел матрицы  $N$ . Если критериальная матрица  $N$  оказывается интервальной, т.е. представляемой в форме

$$[N] = N_0 + [\Delta N], \quad (8)$$

где  $N_0$  – медианная составляющая интервальной критериальной матрицы  $[N]$  с фиксированными скалярными компонентами, а  $[\Delta N]$  – симметричный интервальный матричный компонент интервальной

критериальной матрицы  $[N]$ , то интервальным становится и каждый функционал  $J_v(N)$  вырождения критериальной матрицы  $N$ , для которого становится справедливой запись

$$J_v\{[N]\} = [J_v(N)] = J_{v0}(N) + [\Delta J_v(N)] = J_{v0}(N) + \left[ \underline{\Delta J_v(N)}; \overline{\Delta J_v(N)} \right] \quad (9)$$

и который можно охарактеризовать оценкой его относительной интервальности, вычисляемой в силу соотношения

$$\delta_I J_v = \left| \frac{[\Delta J_v]}{J_{v0}} \right|. \quad (10)$$

Введем гипотезу об относительной интервальности всех элементов модельного представления СДС с антропокомпонентами, которая состоит в предположении, что величина этой интервальности не нарушает возможности корректного использования аппарата теории чувствительности [1] в рамках функции чувствительности первого порядка.

### Оценка интервальных компонентов функционалов вырождения СДС с антропокомпонентами с помощью функции чувствительности сингулярных чисел

Осуществим параметризацию в соответствии с правилом: каждый элемент матрицы, имеющий интервальную природу, представим в форме зависимости его от относительного параметра  $q$  с номинальным значением  $q_0$ , равным нулю ( $q_0 = 0$ ), и вариацией, равной оценке относительной интервальности этого параметра, так что интервальный системный компонент  $[[*]]$  получает представление  $[[*]] = (*)_0 + [\Delta(*)] = [ \{(*)_0\} \cdot (1 - q_*) , \{(*)_0\} \cdot (1 + q_*) ] = [ \{(*)_0\} \cdot (1 \pm q_*) ] : |q_*| \leq \delta_I(*)$ .

**Утверждение.** Функция чувствительности  $\alpha_{iq_j}$  сингулярного числа  $\alpha_i(q) \in \sigma_\alpha\{N(q)\}$  к вариации  $j$ -го компонента  $q_j$ ;  $j = \overline{1, p}$ ;  $1 \leq p \leq (m \times m)$  вектора параметров  $q$  относительно его номинального значения  $q_0 = 0$  может быть вычислена в силу соотношения

$$\alpha_{iq_j} = (U^T)^i N_{q_j} V_i = (U^T N_{q_j} V_i)_{ii}. \quad \square \quad (11)$$

Доказательство утверждения приведено в [1]. ■

Представим функционал вырождения  $J_v(q)$  как функцию от векторного параметра  $q$  в мультипликативной форме

$$J_v(q) = \alpha_v\{q\} \cdot \alpha_1^{-1}\{q\}. \quad (12)$$

Тогда функция чувствительности  $J_{vq_j}$  функционала вырождения  $J_v(q)$  к вариации  $j$ -го элемента

$q_j$  вектора  $q$ , вычисляемая в силу определения  $J_{vq_j} = \left. \frac{\Delta J_v(q)}{\Delta q_j} \right|_{q=q_0} : j = \overline{1, p}$ , может быть представлена с

использованием функций чувствительности  $\alpha_{iq_j}$  сингулярных чисел  $\alpha_i(i = \overline{1, m})$  в форме

$$J_{vq_j} = \alpha_{vq_j} \cdot \alpha_1^{-1} - \alpha_v \cdot \alpha_1^{-2} \alpha_{v1q_j}. \quad (13)$$

Выражение (13) для функции чувствительности  $J_{vq_j}$  функционала вырождения  $J_v(q)$  позволяет записать для него полную вариацию  $\Delta J_v = \Delta J_v(\Delta q)$ , определяемую соотношением

$$\Delta J_v = S_v \Delta q, \quad (14)$$

где  $S_v = \text{row}\{J_{vq_j} : j = \overline{1, p}\}$  – матрица-строка функций чувствительности функционала вырождения  $J_v(q)$ ,  $\Delta q = \text{col}\{\Delta q_j : j = \overline{1, p}\}$  – вектор-столбец полных вариаций системных параметров.

В силу того, что  $\Delta q$  является интервальным, сохраняется интервальность полной вариации  $\Delta J_v = \Delta J_v(\Delta q)$  функционала вырождения, так что оказывается справедливой запись

$$[\Delta J_v] = \left[ \underline{\Delta J_v}, \overline{\Delta J_v} \right], \quad \underline{\Delta J_v} = -\overline{\Delta J_v}, \quad \overline{\Delta J_v} = \max_{\Delta q} \|\Delta J(\Delta q)\| = \sum_{i=1}^p J_{vq_j} |\Delta q_j| \text{sgn } J_{vq_j}. \quad (15)$$

Использование аппарата функций чувствительности сингулярных чисел критериальных матриц позволяет с помощью эффективной вычислительной процедуры конструировать интервальный компонент в форме (15) интервального функционала вырождения (9), порождаемого интервальностью критериальной матрицы, на основе представления (8).

### Заключение

Решена задача формирования интервальных векторно-матричных модельных представлений антропо-компонентов-операторов в составе сложных динамических систем. Для решения задачи оценки возможного вырождения СДС, в технологическом процессе которого участвуют антропокомпоненты-операторы с интервальными параметрами, с использованием интервальных функционалов вырождения сформирована эффективная вычислительная процедура, использующая возможности аппарата теории параметрической чувствительности алгебраического спектра сингулярных чисел критериальной матрицы.

### Литература

1. Никифоров В.О., Ушаков А.В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. – 218 с.
2. Jury E.I. and Pavlidis T. A Literature Survey of Biocontrol Systems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1963. – AC-8. – P. 210–217.
3. Шипилов А.И., Шипилова О.А. Высокая работоспособность персонала – забота кадровика // Кадры предприятия. – 2003. – № 3. – С. 7–15.
4. Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В. Вырождение производственной динамической системы, вызванное усталостью ее антропокомпонентов // Изв.вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 11. – С. 66–72.
5. Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В. Алгебраическая постановка задачи контроля системного вырождения сложных технических систем // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2010. – № 5. – С. 18–22.

*Дударенко Наталья Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, dudarenko@yandex.ru

*Полякова Майя Вячеславовна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, l2noch@mail.ru

*Ушаков Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Ushakov-avg@yandex.ru

УДК 004.931

## ВЫДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ СИГНАЛОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

Э.В. Козлов, Т.В. Левковская

Рассматривается анализ сейсмических сигналов в интеллектуальных системах пассивной локации с точки зрения выделения информативных признаков. Описывается разработанный алгоритм выделения информативных признаков сейсмических сигналов для движущихся объектов. Результаты тестирования алгоритма позволяют сделать заключение о целесообразности его использования в интеллектуальных системах охраны объектов и территорий.

**Ключевые слова:** сейсмические сигналы, информативные признаки, классификация движущихся объектов.

### Введение

Одним из актуальных направлений развития интеллектуальных сейсмических систем охраны периметра является повышение достоверности обнаружения и классификации типа нарушителя (человек, группа людей, наземная техника) в условиях воздействия многочисленных помеховых факторов природно-климатического, биологического и техногенного характера [1–4].

При движении человека либо техники возникают сейсмические волны, которые можно условно разделить на две составляющие – вертикальную и горизонтальную. Горизонтальная сейсмическая волна (поверхностная волна, рэлеевская волна) распространяется вдоль границы раздела грунта и воздуха. Именно она регистрируется сейсмическими сенсорами и в дальнейшем подвергается обработке. Распространение волны вдоль границы раздела сред обуславливает ее характеристики, которые зависят от многих факторов: вида грунта и его состояния, анизотропии, состояния подстилающей поверхности и других факторов. При анализе такого рода сигналов необходимо учитывать наличие естественных микросеймов (строительство, деревья, ЛЭП, дороги). Таким образом, полезный сигнал от нарушителя возникает в условиях многочисленных помеховых факторов [2, 3]. Причем диапазоны основных характеристик полезных сигналов и помех, как правило, перекрываются.

По поверхностной волне можно отследить расстояние до нарушителя при использовании нескольких сейсмодатчиков (или косы сейсмических сенсоров), однако в настоящей работе такая цель не ставилась.

### Описание алгоритма выделения информативных признаков сейсмических сигналов

Целью данной работы является разработка алгоритма выделения информативных признаков для классификации движущихся объектов (человек, группа людей, автомобиль) по сигналам сейсмических сенсоров пассивной локации. Информативные признаки должны быть инвариантны к шумам реальной фоновой обстановки. Немаловажным фактором является время выполнения алгоритма.

На рис. 1 представлена общая схема алгоритма обработки сигналов в экспериментальной системе пассивной локации.

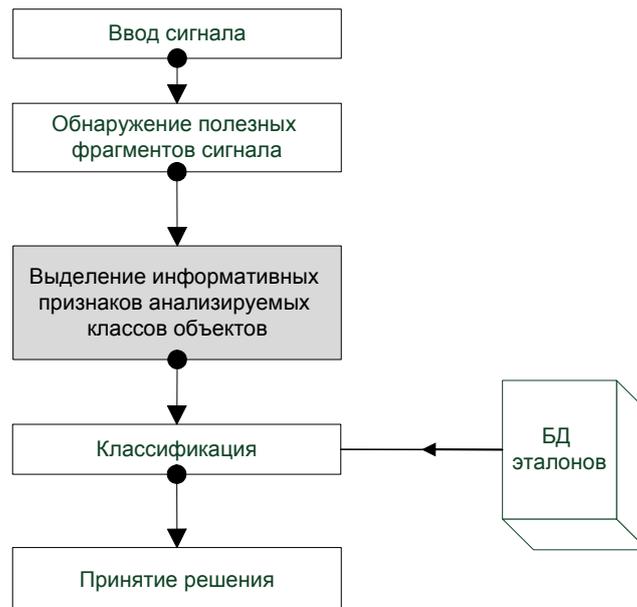


Рис. 1. Основные этапы обработки сигналов в экспериментальной системе пассивной локации

Процесс обработки сейсмических сигналов можно разделить на этапы:

1. ввод сигналов, предварительно записанных в файл;
2. обнаружение движущихся объектов (выявление отличий полезных сигналов и окружающего фона) [5];
3. формирование информативного и компактного признакового пространства;
4. в процессе классификации выполняется сравнение информативных признаков обнаруженных фрагментов полезного сигнала с эталонами;
5. в качестве решения выбирается тип объекта, для которого количественная оценка соответствия с эталоном максимальна.

### Характеристики сейсмических сигналов

При отсутствии движущегося объекта на выходе сейсмического сенсора присутствуют случайные сигналы (сейсмические шумы), которые накладываются на квазипериодические импульсные сигналы, возникающие при движении человека. Увеличение и спад амплитуды огибающей последовательности импульсов по мере приближения человека к сенсору и при удалении от него осуществляются по закону, близкому к экспоненциальному. Скорость нарастания и убывания сейсмического сигнала, возникающего при движении наземной техники, гораздо медленнее, чем при движении человека или группы людей. При этом полезный сигнал характеризуется отсутствием ярко выраженной периодичности.

Спектр сигнала определяется типом объекта, скоростью движения, расстоянием между движущимся объектом и местом установки сейсмического сенсора, зоной обнаружения (чувствительностью) сейсмоприемника [1]. Спектральные составляющие сигнала в диапазоне частот от 0 до 80 Гц обусловлены воздействием на грунт одиночного нарушителя. При движении группы людей спектр сигнала сейсмического сенсора расширяется в высокочастотную область. Спектр сигнала, вызванного движением наземной техники, перекрывает всю область полезных сигналов без характерных максимумов. Спек-

тральные составляющие свыше 200–300 Гц практически малоразличимы на фоне естественных микросейсмов, поскольку приповерхностный слой грунта играет роль фильтра низких частот, т.е. сильнее поглощает высокие частоты.

Анализ характеристик сейсмических сигналов позволяет определить признаковое пространство для классификации движущихся объектов. Для распознавания классов объектов – человек, группа людей, легковой автомобиль – целесообразно использовать спектральное описание в частотном диапазоне до 300 Гц и характеристики периодичности сигнала – количественную оценку и значение периода следования импульсов сейсмических сигналов, фиксируемых при движении человека в зоне обнаружения.

### Анализ периодичности

Для оценки периодичности сигнала широко применяются корреляционные методы, суть которых заключается в сравнении соседних фрагментов сигнала и определении степени их подобия. Степень подобия (оценка периодичности) и значение периода на интервале обнаруженного полезного фрагмента сигнала оцениваются путем расчета и анализа кратковременных автокорреляционной функции (АКФ) или функции среднего модуля разности, использование которых обеспечивает снижение вычислительных и временных затрат по обработке сигналов. Экспериментальные исследования дали достаточно близкие результаты при использовании обоих типов функций.

Период шагов человека составляет в среднем 0,6 с (750 отсчетов сигнала при  $F_{\text{дискр}}=1250$  Гц). Учитывая возможную скорость передвижения объектов, диапазон поиска периодичности сейсмических сигналов целесообразно выбрать 0,2–0,8 с (256–1024 отсчетов). Для реализации автокорреляционных методов длительность анализируемого фрагмента должна быть больше минимум в 2 раза (2048 отсчетов), что ведет к значительным вычислительным и временным затратам по обработке сигналов. Объем вычислений существенно сократится при расчете АКФ по энергии сигнала для заданного интервала времени.

Обнаруженные с помощью разработанного двухступенчатого алгоритма детектирования [5] полезные фрагменты сейсмических сигналов показаны на рис. 2. Вертикальные маркеры соответствуют начальной и конечной границам обнаруженных полезных фрагментов сигналов. Сигналы, оцифровывались с  $F_{\text{дискр}}=1250$  Гц, 16 бит на отсчет, анализировались кадрами длительностью 256 отсчетов (0,2 с) со сдвигом окна анализа на 1/4 (0,05 с).

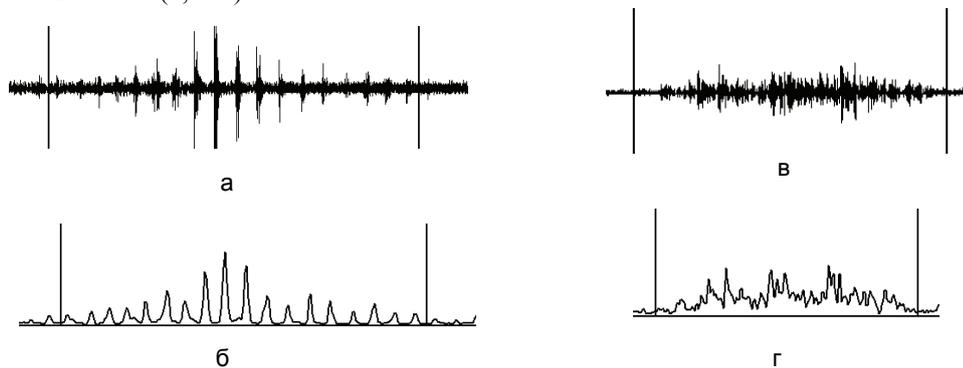


Рис. 2. Результат работы алгоритма детектирования полезного сигнала: от человека – осциллограмма сигнала (а); энергия сигнала (б); от автомобиля – осциллограмма сигнала (в); энергия сигнала (г)

График изменений покadroвых значений энергии сигнала от человека (рис. 2, а, б) имеет квазипериодический характер и содержит информацию о периодичности анализируемого фрагмента сейсмического сигнала. Максимальное значение АКФ в заданном диапазоне поиска периода сигнала, равном 32 кадрам анализа ( $32 \times 64 = 2048$  отсчетов сигнала), является количественной оценкой периодичности сигнала, период сигнала соответствует аргументу кратковременной АКФ, при котором она принимает максимальное значение. В качестве интегральных характеристик периодичности обнаруженного полезного фрагмента сигнала выбирается медианное значение. На данном этапе исследований значения периода сигнала не анализировались.

### Спектральный анализ

Анализ спектрограмм полезных сейсмических сигналов от человека показал, что мгновенные спектры, полученные дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) в моменты времени между импульсами, по форме схожи со спектром окружающего фона. В связи с этим предлагается усредненный спектр рассчитывать как взвешенную сумму мгновенных спектров с учетом покadroвых значений спектральной энергии. Взвешенный таким образом спектр в большей степени содержит информацию о полезных от-

резках (кадрах) сигнала, соответствующих энергетическим всплескам, уменьшая при этом вклад мгновенных спектров на интервалах между импульсами. На рис. 3 изображены нормированные и усредненные путем взвешивания ДПФ-спектры полезных сейсмических сигналов, зарегистрированных при движении человека и легкового автомобиля в зоне обнаружения сенсора.

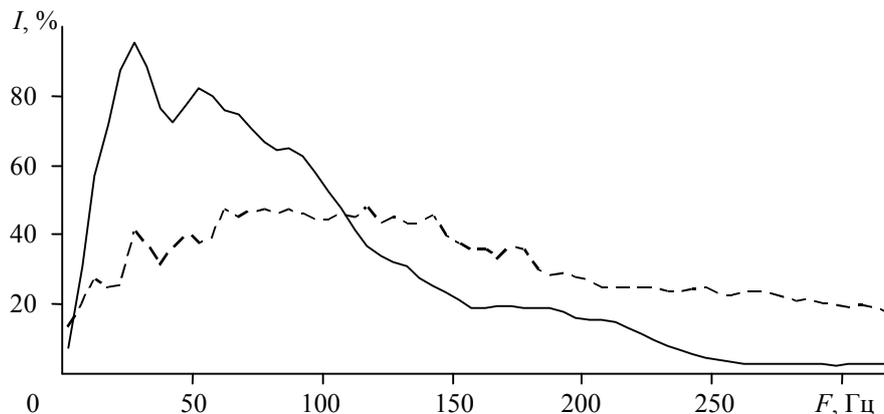


Рис. 3. Нормированные и усредненные путем взвешивания ДПФ-спектры сейсмических сигналов, зафиксированных при движении человека и автомобиля:  
 — идущий человек; - - - движущийся автомобиль

Сравнительный анализ нормированных и усредненных путем взвешивания на интервале обнаруженных фрагментов полезного сигнала ДПФ-спектров, исходных и очищенных от шума сигналов, показывает целесообразность их использования для распознавания анализируемых классов движущихся объектов.

### Результаты исследований

Для проверки работы алгоритма выделения информативных признаков были записаны сейсмические сигналы при движении в зоне обнаружения сенсоров следующих классов объектов: человек, группа людей (3–5 человек), автомобиль. В качестве приемников сигналов были использованы сейсмические сенсорные модули, чувствительный элемент которых – классический точечный преобразователь геофон [4]. В результате обработки сейсмических сигналов было обнаружено 184 полезных фрагмента, из них: 63 – при движении объектов класса «человек», 56 – «группа людей», 65 – «автомобиль». Эталоны анализируемых классов объектов были рассчитаны путем усреднения информативных признаков для 1/3 реализаций. Оценка надежности классификации (отношение правильно распознанных полезных фрагментов сигналов к общему количеству обнаруженных фрагментов, выраженное в процентах) была получена для оставшейся части обнаруженных полезных фрагментов сигналов. В табл. 1–3 приведены результаты классификации движущихся объектов по спектральному описанию, оценке периодичности, обобщенным типам информативных признаков. Следует отметить, что результаты получены для сигналов, зафиксированных при движении одних и тех же объектов в одинаковых климатических условиях.

Представленные в табл. 1–3 результаты демонстрируют достаточно хорошее разделение движущихся объектов «человек» и «автомобиль». Объекты класса «группа людей» занимают промежуточное положение. Использование обоих типов информативных признаков улучшает надежность классификации.

Тип объекта	Эталоны		
	человек	группа людей	автомобиль
человек	<b>80,95</b>	19,05	0,00
группа людей	12,5	<b>73,21</b>	14,29
автомобиль	0,00	24,62	<b>75,38</b>

Таблица 1. Надежность классификации движущихся объектов по спектральному описанию

Тип объекта	Эталоны		
	человек	группа людей	автомобиль
человек	<b>90,48</b>	9,52	0,00
группа людей	17,86	<b>71,43</b>	10,71
автомобиль	0,00	12,31	<b>87,69</b>

Таблица 2. Надежность классификации движущихся объектов по оценке периодичности

Тип объекта	Эталоны		
	человек	группа людей	автомобиль
человек	<b>90,48</b>	9,52	0,00
группа людей	12,5	<b>82,14</b>	5,36
автомобиль	0,00	13,85	<b>86,15</b>

Таблица 3. Надежность классификации движущихся объектов по спектральному описанию и оценке периодичности

В [2] приведены характеристики ряда периметровых охранных систем (IREMBASS DT-562A, MA 2772 CLASSIC), которые позволяют обнаруживать и классифицировать движущиеся объекты. Вероятность правильной классификации составляет не более 0,8–0,85. В обзорах подобного рода оборудования [6] сообщается, что достоверность классификации движущихся объектов (человек, группа людей, колесная техника) периметровой системой охраны ЭМЗУ Рубеж-М превышает 0,8. Производители периметровых систем охраны не публикуют данных о надежности классификации. Это связано с необходимостью адаптации систем к различным природно-климатическим условиям. Сравнительный анализ оценок классификации существующих интеллектуальных периметровых систем пассивной локации и полученные результаты тестирования алгоритма выделения информативных признаков сейсмических сигналов позволяют сделать вывод о целесообразности его использования для классификации движущихся объектов.

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований амплитудно-временных и амплитудно-частотных характеристик сигналов, разработанных алгоритмов обнаружения и распознавания движущихся объектов были определены основные этапы обработки сигналов [7]: обнаружение полезных фрагментов сигнала; выделение информативных признаков обнаруженных полезных фрагментов сигнала; сравнение с эталоном; принятие решения.

Наряду с традиционно используемыми спектральными параметрами набор информативных признаков включает характеристики периодичности. Классификация анализируемых типов движущихся объектов (человек, группа людей, автомобильная техника) на основе совместного анализа спектров и оценки периодичности повышает надежность распознавания.

В процессе выполнения работы было установлено, что реализация алгоритмов обнаружения и классификации движущихся объектов по сигналам сейсмических сенсоров пассивной локации должна основываться на достаточном объеме статистических данных, полученных в результате испытаний системы сенсорных средств на охраняемом объекте в разное время года, при различных погодных условиях.

Дальнейшие исследования включают сбор и анализ сигналов при движении объектов по разным видам грунта в разные сезоны года, уточнение способов (алгоритмов) выделения информативных признаков полезных сигналов, применение алгоритмов кластеризации для создания эталонов анализируемых классов движущихся объектов, выбор критерия принятия решения с учетом информативности каждого из признаков.

Основные результаты получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы «Разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки информации для решения многопараметрической задачи идентификации воздействия по классам» программы Союзного государства «Функциональная СВЧ электроника-2» (№20071866).

### Литература

1. Звездинский С.С. Периметровые маскируемые сейсмические средства обнаружения // Специальная техника. – 2004. – № 2. – С. 20–28; – № 3. – С. 26–37.
2. Звездинский С.С. Быстроразвертываемые средства обнаружения и системы охранной сигнализации // Специальная техника. – 2003. – № 5. – С. 11–23.
3. Звездинский С.С., Иванов В.А. Повышение информативности пассивных периметровых средств обнаружения // Современные технологии безопасности. – 2005. – № 1. – С. 9–18.
4. Введенский Б.С. Оборудование для охраны периметров. – М.: Мир безопасности, 2002. – 112 с.
5. Козлов Э.В., Левковская Т.В. Двухступенчатый алгоритм обнаружения движущихся объектов по сигналам сенсорных модулей // Сборник трудов VI конференции молодых ученых. Вып. 6. Информационные технологии. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 3–8.
6. Козинный А., Косарев А., Матвеев В. Нарушителя выдаст колебание грунта // БДИ. – 2006. – № 4. – С. 74–77.

7. Левковская Т.В., Козлов Э.В. Обработка сейсмических сигналов в интеллектуальных системах пассивной локализации // Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники: Материалы X международной научно-технической конференции. – Таганрог – Москва – Донецк, 2009. – С. 93–96.

- Козлов Эдуард Викторович* – Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики, младший научный сотрудник, kozloveduard@mail.by  
*Левковская Татьяна Вячеславовна* – Национальная академия наук Беларуси, Объединенный институт проблем информатики, старший научный сотрудник, tanya@newman.bas-net.by

УДК 517.938

## ТОЧЕЧНЫЙ СПЕКТР ОПЕРАТОРА ШРЕДИНГЕРА ДЛЯ ДВУХ СОЕДИНЕННЫХ ПОЛУКРИСТАЛЛОВ С ПОТЕНЦИАЛАМИ КРОНИГА-ПЕННИ

А.Н. Скорынина

В рамках модели Кронига-Пенни рассматривается спектральная задача для двух соединенных одномерных полукристаллов. Изучаются два способа их соединения. Показывается существование связанных состояний. Описывается зависимость собственных значений энергии от параметров системы. Используется теория матриц монодромии.

**Ключевые слова:** спектр, одномерный оператор Шредингера, периодический потенциал, полукристалл.

### Введение

Состояние квантового электрона в одномерном кристалле описывается одномерным стационарным уравнением Шредингера с периодическим потенциалом  $p(x)$ :

$$-f''(x) + f(x)p(x) = Ef(x), \quad E \in \mathbb{R}. \quad (1)$$

Случай, когда потенциал представляет собой периодический набор дельта-функций с периодом  $T$ ,

$$p(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \alpha \delta(x - nT), \quad (2)$$

носит название модели Кронига-Пенни [1].

С математической точки зрения задача (1, 2) сводится [2] к изучению дискретного спектра оператора Шредингера

$$H = -\frac{d^2}{dx^2} \quad (3)$$

с областью определения

$$\text{dom } H = \left\{ f \in H^{2,1}(\mathbb{R}) \cap H^{2,2}(\mathbb{R} - \Lambda) \mid f'(nT+) - f'(nT-) = \alpha f(nT), n \in \mathbb{Z} \right\},$$

$$\Lambda = \{nT, n \in \mathbb{Z}\}. \quad (4)$$

В работе [1] были получены соотношения для волновых функций и энергетического спектра в случае потенциала (2), а также установлено, что энергетический спектр представляет собой чередующиеся последовательности разрешенных и запрещенных энергетических зон. Таким образом, волновое уравнение (1) имеет решение в виде незатухающих волн только для определенных разрешенных энергетических зон. Задача (1) с потенциалами вида (2) рассматривалась в [2]. В работе доказано, что оператор (3) имеет абсолютно непрерывный спектр. Описаны зоны спектра, доказано, что они не вырождены. К работам, посвященным данной теме, относятся [3–9].

В [3] изучены спектральные асимптотики оператора (3) для положительной части его спектра, доказано, что спектр оператора – чисто абсолютно непрерывный и заполняет бесконечное число зон, разделенных лакунами. В статье [4] рассмотрен оператор вида

$$H_1(t) = -\frac{d^2}{dx^2} + p_1(x, t) + q_1(x, t),$$

где  $p_1$  – периодический потенциал;  $q_1$  – потенциал с компактным носителем на бесконечной прямой. Доказано, что спектр оператора состоит из абсолютно непрерывной части плюс конечное число простых собственных значений в каждой неограниченной непустой спектральной лакуне. Определены асимптотики собственных значений.

При  $0 \leq x < +\infty$  имеем модель полубесконечного кристалла, которая изучалась в [2, 4, 10]. Общим для перечисленных выше работ было использование теоремы Блоха, на основе которой строилось продолжение волновой функции на период. Другим подходом является решение уравнения Шредингера с помощью матрицы монодромии. Этот способ применяется, например, в [3, 11].

Большой интерес представляет модель двух полукристаллов, соединенных в нуле. В [6] изучены спектральные свойства оператора

$$H_2(t) = -\frac{d^2}{dx^2} + q_2(x, t)$$

в пространстве  $L_2(R)$ , где потенциал определен следующим образом:

$$q_2 = \begin{cases} p_2(x+t), & x > 0, \\ p_2(x), & x < 0, \end{cases}$$

$p_2$  – периодический потенциал и  $t \in R$  – параметр сдвига. В работе доказывается, что для каждого  $t$  абсолютно непрерывный спектр состоит из интервалов, разделенных лагунами, приводится доказательство того факта, что в каждой непустой лагуне существует одно собственное значение и один резонанс.

В работе [11] решается уравнение (1), где

$$p(x) = \begin{cases} q_{per}(x), & x \leq 0, \\ q_{def}(x), & x \in (0, 1), \\ q_{per}(x-1), & x \geq 1, \end{cases}$$

здесь  $q_{per}$  – периодический потенциал. Изучается существование точечного спектра в лагунах существенного спектра и определяется количество таких собственных значений.

Целью данной работы является изучение дискретного спектра оператора (3) для соединенных полукристаллов с областью определения (4). При этом используются матрицы монодромии. В работе рассматриваются два варианта соединения полукристаллов: наличие и отсутствие дельта-функции в точке соединения; указываются ограничения на параметры модели, при которых спектр соответствующего оператора дискретный.

### Общая схема построения решения

Пусть имеет место следующее соотношение:

$$\begin{pmatrix} f(T) \\ f'(T) \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} f(0) \\ f'(0) \end{pmatrix}.$$

Тогда  $\mathbf{M}$  называется матрицей монодромии. Она служит для продолжения решения на всю прямую.

Сначала рассмотрим модель одного полукристалла. Решим уравнение (1) на отрезке  $[0, T]$  при потенциале (2). Если потенциал нулевой, то матрица монодромии имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}_0 = \begin{pmatrix} \cos kT & \frac{\sin kT}{k} \\ -k \sin kT & \cos kT \end{pmatrix},$$

где  $k = \sqrt{E}$ . Исходная задача отличается от предыдущей наличием дельта-функции в точке  $x = T$ , что эквивалентно выполнению условия

$$f'(T+0) - f'(T-0) = \alpha f(T).$$

Матрица монодромии для задачи с бесконечным потенциальным барьером в одной точке имеет вид

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \alpha & 1 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, матрица монодромии для (1) определяется выражением

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_0 = \begin{pmatrix} \cos kT & \frac{\sin kT}{k} \\ \alpha \cos kT - k \sin kT & \frac{\alpha}{k} \sin kT + \cos kT \end{pmatrix}.$$

С помощью полученной матрицы монодромии продолжим решение на всю прямую. Необходимо учесть тот факт, что решение задачи (1) ищется в пространстве квадратично-интегрируемых функций, а потому естественным является накладываемое ограничение на собственные числа матрицы  $\mathbf{M}$ :  $|\lambda| < 1$ .

Собственные числа матрицы  $\mathbf{M}$  задаются следующими выражениями:

$$\lambda^\pm = \cos kT + \frac{\alpha}{2k} \sin kT \pm \sqrt{-\sin^2 kT + \frac{\alpha}{2k} \sin 2kT + \frac{\alpha^2}{4k^2} \sin^2 kT}.$$

Собственные векторы, соответствующие этим собственным значениям, имеют вид

$$X^{\pm} = \left( \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\alpha k \operatorname{ctg} kT + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \end{array} \right).$$

### Соединенные полукристаллы

Дальнейшей областью рассмотрения являются два полубесконечных кристалла с различными периодами  $T_1, T_2$  для отрицательной и положительной полупрямых. Выражения для собственных значений и собственных векторов матриц монодромии для левого  $(\lambda_1^+, \lambda_1^-, X_1^+, X_1^-)$  и правого  $(\lambda_2^+, \lambda_2^-, X_2^+, X_2^-)$  полукристаллов имеют следующий вид:

$$\lambda_1^{\pm} = \cos kT_1 + \frac{\alpha}{2k} \sin kT_1 \pm \sqrt{-\sin^2 kT_1 + \frac{\alpha}{2k} \sin 2kT_1 + \frac{\alpha^2}{4k^2} \sin^2 kT_1},$$

$$X_1^{\pm} = \left( \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{\alpha k \operatorname{ctg} kT_1 + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \end{array} \right).$$

$$\lambda_2^{\pm} = \cos kT_2 - \frac{\alpha}{2k} \sin kT_2 \pm \sqrt{-\sin^2 kT_2 - \frac{\alpha}{2k} \sin 2kT_2 + \frac{\alpha^2}{4k^2} \sin^2 kT_2},$$

$$X_2^{\pm} = \left( \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{-\alpha k \operatorname{ctg} kT_2 + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \end{array} \right).$$

**Первый вариант соединения полукристаллов.** В точке соединения полукристаллов нет дельта-функции. При выполнении описанных выше необходимых условий достаточным условием существования собственного значения энергии является наличие общего собственного вектора у матриц монодромии левой и правой полуосей. Собственные векторы матриц монодромии для левого и правого полукристаллов исследуем на попарное равенство для выполнения условия «склейки» в нуле.

При  $X_1^+ = X_2^+$  допустимая область определяется из системы

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\pi n}{T_1 + T_2}, \quad n \in Z, \\ T_2 \neq \frac{n - n_1}{n_1} T_1, \quad n, n_1 \in Z, \\ T_2 \neq \frac{n_2}{n - n_2} T_1, \quad n, n_2 \in Z, \\ |\lambda_i^+| < 1, \quad i = 1, 2. \end{array} \right. \quad (5)$$

При  $X_1^+ = X_2^-$  допустимая область определяется из системы

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{\pi n}{T_1 + T_2}, \quad n \in Z, \\ \operatorname{ctg} kT_1 = \frac{4 - \alpha^2}{4\alpha k}, \\ T_2 \neq \frac{n - n_1}{n_1} T_1, \quad n, n_1 \in Z, \\ T_2 \neq \frac{n_2}{n - n_2} T_1, \quad n, n_2 \in Z, \\ |\lambda_1^+| < 1, \\ |\lambda_2^-| < 1. \end{array} \right. \quad (6)$$

При  $X_1^- = X_2^-$  допустимая область определяется из системы

$$\begin{cases} k = \frac{\pi n}{T_1 + T_2}, n \in Z, \\ |\lambda_i^+| < 1, i = 1, 2. \end{cases} \quad (7)$$

При  $X_1^- = X_2^+$  допустимая область определяется из системы

$$\begin{cases} k = \frac{\pi n}{T_1 + T_2}, n \in Z, \\ \text{ctg } kT_1 = \frac{4 - \alpha^2}{4\alpha k}, \\ T_2 \neq \frac{n - n_1}{n_1} T_1, n, n_1 \in Z, \\ T_2 \neq \frac{n_2}{n - n_2} T_1, n, n_2 \in Z, \\ |\lambda_1^-| < 1, \\ |\lambda_2^+| < 1. \end{cases} \quad (8)$$

Зафиксируем  $T_1$  и положим  $n = 2$  в формулах (5)–(8). Допустимая область в координатах  $(\alpha, T_2)$  изображена на рис. 1, а. Рассмотрим подробнее ситуацию

$$T_2 = T - \varepsilon, T_1 = T + \varepsilon. \quad (9)$$

Зависимость волнового числа от разности периодов решеток изображена на рис. 1, б. Допустимые значения волнового числа изображены на рис. 1, в.

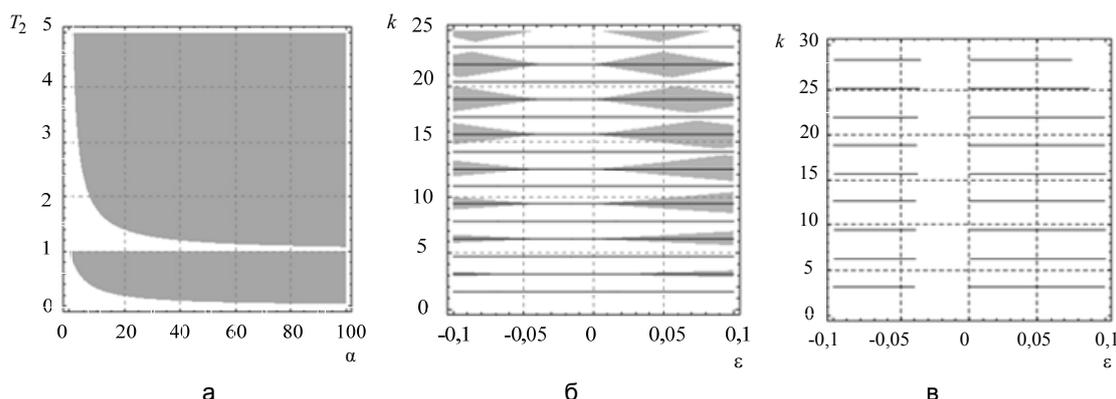


Рис. 1. Допустимая область (обозначена серым цветом) на плоскости параметров системы (а); зависимость волнового числа от разности периодов решеток (серым цветом обозначены допустимые области, черным цветом – значения волнового числа) (б); допустимые значения волнового числа (в)

При  $\varepsilon \rightarrow 0$  существуют связанные состояния. Это не противоречит теоремам о спектре бесконечного кристалла вследствие дефекта в нуле.

**Второй вариант соединения полукристаллов.** В точке соединения присутствует дельта-функция. Для выполнения условия соединения в нуле собственные векторы матриц монодромии для левого и правого полукристаллов должны удовлетворять следующему уравнению:

$$X_1^\pm = \mathbf{M}_1 X_2^\pm. \quad (10)$$

При  $X_1^+ = X_2^+$  уравнение (10) преобразуется к виду

$$k(\text{ctg } kT_2 + \text{ctg } kT_1)^2 + 2\alpha(\text{ctg } kT_2 - \text{ctg } kT_1) = -4k, \quad (11)$$

а допустимая область определяется из системы

$$\begin{cases} k(\text{ctg } kT_2 + \text{ctg } kT_1)^2 + 2\alpha(\text{ctg } kT_2 - \text{ctg } kT_1) = -4k, \\ \alpha + \sqrt{-\alpha k \text{ctg } kT_2 + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \geq 0, \\ -\alpha + k \text{ctg } kT_2 + k \text{ctg } kT_1 \geq 0, \\ |\lambda_i^+| < 1, i = 1, 2. \end{cases}$$

При  $X_1^+ = X_2^-$  допустимая область определяется из системы

$$\begin{cases} k(\operatorname{ctg} kT_2 + \operatorname{ctg} kT_1)^2 + 2\alpha(\operatorname{ctg} kT_2 - \operatorname{ctg} kT_1) = -4k, \\ \alpha - \sqrt{-\alpha k \operatorname{ctg} kT_2 + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \geq 0, \\ -\alpha + k \operatorname{ctg} kT_2 + k \operatorname{ctg} kT_1 \leq 0, \\ |\lambda_1^+| < 1, |\lambda_2^-| < 1. \end{cases}$$

При  $X_1^- = X_2^-$  допустимая область определяется из системы

$$\begin{cases} k(\operatorname{ctg} kT_2 + \operatorname{ctg} kT_1)^2 + 2\alpha(\operatorname{ctg} kT_2 - \operatorname{ctg} kT_1) = -4k, \\ -\alpha + \sqrt{-\alpha k \operatorname{ctg} kT_2 + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \geq 0, \\ -\alpha + k \operatorname{ctg} kT_2 + k \operatorname{ctg} kT_1 \leq 0, \\ |\lambda_i^+| < 1, i = 1, 2. \end{cases}$$

При  $X_1^- = X_2^+$  допустимая область определяется из системы

$$\begin{cases} k(\operatorname{ctg} kT_2 + \operatorname{ctg} kT_1)^2 + 2\alpha(\operatorname{ctg} kT_2 - \operatorname{ctg} kT_1) = -4k, \\ \alpha + \sqrt{-\alpha k \operatorname{ctg} kT_2 + \frac{\alpha^2}{4} - k^2} \leq 0, \\ -\alpha + k \operatorname{ctg} kT_2 + k \operatorname{ctg} kT_1 \geq 0, \\ |\lambda_1^-| < 1, |\lambda_2^+| < 1. \end{cases}$$

Пусть периоды полукристаллов задаются (9). Тогда (11) преобразуется к виду

$$\sin^2 2kT + 4 \frac{\alpha}{k} \varepsilon (\sin^2 kT - k^2 \varepsilon^2 \cos^2 kT) + 4 (\sin^2 kT - k^2 \varepsilon^2 \cos^2 kT)^2 = 0.$$

Зависимость волнового числа от разности периодов решеток изображена на рис. 2, а. Допустимые значения волнового числа изображены на рис. 2, б, в. При  $\varepsilon \rightarrow 0$  мы приближаемся к модели истинного кристалла. На рис. 2, в, видно, что при этом связанных состояний нет, что верно.

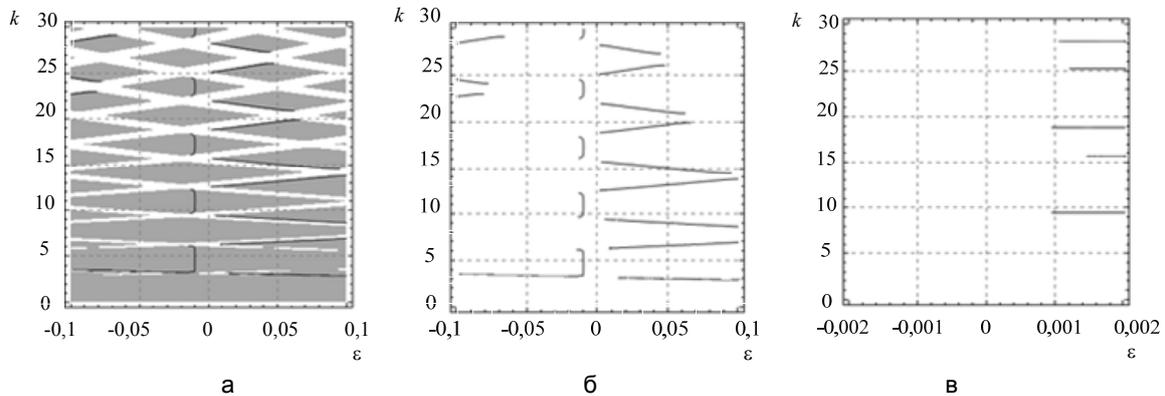


Рис. 2. Допустимая область (обозначена серым цветом) на плоскости параметров системы (а); зависимость волнового числа от разности периодов решеток (серым цветом обозначены допустимые области, черным цветом – значения волнового числа) (б); допустимые значения волнового числа (в)

### Заключение

Рассмотренная модель описывает спектральные свойства двух соединенных полукристаллов при потенциале Кронига–Пенни. При нахождении точек дискретного спектра оператора (3) использовались матрицы монодромии для левого и правого полукристаллов. Предложен метод расчета точечного спектра для системы соединенных полубесконечных кристаллов. В работе был найден точечный спектр оператора Шредингера для двух соединенных полукристаллов с различными периодами при двух способах соединения, проанализирована зависимость спектра от параметров системы, проверено соответствие с полученными ранее результатами.

Модель может быть применена для исследования электронного транспорта через переход между полупроводниками с различными решетками.

Работа поддержана программой «Развитие потенциала высшей школы России» (2.1.1/4215) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### Литература

1. Kronig R. de L. Quantum Mechanics of Electrons in Crystal Lattices / R. de L. Kronig, W.G. Penney. – Proc. Roy. Soc. (London). – 1931. – V. 130A.
2. Альбеверио С. Решаемые модели в квантовой механике / С. Альбеверио, Ф. Гестези, Р. Хеэг-Крон, Х. Хольден: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 568 с.
3. Kurasov P. Spectral Asymptotics for Schrodinger Operators with Periodic Point Interactions / P. Kurasov, J. Larsen // J. Math. Anal. Appl. – 2002. – Вып. 266. – С. 127–148.
4. Korotyaev E. Schrodinger Operator With Periodic Plus Compactly Supported Potentials on the Half-line <http://arxiv.org/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/0710.2832v2>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 29.06.2010).
5. Korotyaev E. Schrodinger Operator With Periodic Plus Compactly Supported Potentials <http://arxiv.org/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/0904.2871v1>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 29.06.2010).
6. Korotyaev E. Lattice Dislocations in a 1-Dimensional Model // Commun. Math. Phys. – 2000. – V. 213. – P. 471–489.
7. Gesztesy F. Spectral properties of a class of reactionless Schrodinger Operators / F. Gesztesy, P. Yuditskii // J. Funct. Anal. – 2006. – V. 241. – P. 486–527.
8. Maioli M. Absence of the absolutely continuous spectrum for Stark-Bloch operators with strongly singular periodic potentials / M. Maioli, A. Sacchetti // J. Phys. – 1998. – V. 31(3).
9. Niikuni H. Absent Spectral Gaps of the Generalized Kronig-Penney Hamiltonians // Kyushi. J. Math. – 2008. – V. 62. – P. 89–105.
10. Пожарский А. Полукристалл с сингулярным потенциалом в ускоряющем электрическом поле // Теор. и мат. физ. – 2006. – Вып. 146(3). – С. 343–360.
11. Bronski J.C. Dislocation Defects and Diophantine Approximation / J.C. Bronski, Z. Rapti// <http://arxiv.org/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/0904.2582v1>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 29.06.2010).

*Скорынина Анастасия Наилевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, [anastasia2705@yandex.ru](mailto:anastasia2705@yandex.ru)

УДК 620.18

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

С.А. Яковлева, В.И. Гаврюсев, А.Г. Щербак

Представлена структурная схема изготовления прецизионных узлов, обеспечивающая стабильность их размеров и формы, рассматривающая три последовательных взаимосвязанных уровня: материал, деталь, узел. Для каждого уровня выявлены основные причины нестабильности, сформулированы возможные критерии оценки размерной стабильности и предложены технологические методы и средства повышения и сохранения точности изделий.

**Ключевые слова:** размерная стабильность, прецизионный предел упругости, условные пределы релаксации и ползучести, прецизионные детали и узлы, стабилизация размеров.

### Введение

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разрабатывает и производит навигационные приборы и комплексы высокой степени точности и надежности. К деталям и узлам гиросприборов предъявляются жесткие требования по их геометрической точности: отклонение линейных размеров по 5–6 квалитетам и с более высокой точностью, отклонение взаимного расположения и формы поверхностей – доли угловой секунды или десятые–сотые доли микрометра [1]. При этом требования к постоянству размеров и формы еще более высоки и должны обеспечиваться в условиях изготовления, хранения и длительной эксплуатации при постоянной и переменной температурах, так как нестабильность геометрии прецизионных деталей и узлов прямо влияет на погрешность прибора.

Практика показывает, что при изготовлении высокоточных деталей и узлов возникают трудности в получении геометрических размеров, формы и расположения поверхностей, а также в вопросе достоверности и точности получаемой при измерениях информации, так как колебания температуры и температурные градиенты приводят к изменениям размеров и формы. Кроме того, применяемые в высокоточных приборах материалы могут иметь нестабильность структурных характеристик, что не позволяет в полной мере обеспечить требования по качеству и точности изготавливаемых деталей и узлов. Все это приводит к тому, что обеспечение указанных требований прецизионных сборок носит проблемный характер, поскольку требует учета целого ряда факторов различной значимости, связи между которыми обладают неопределенностью. Поэтому одним из наиболее важных технологических аспектов процесса изготовления прецизионных узлов и конструкций является обеспечение стабильности размеров на уровне, который может достигать сотых долей микрометра. При этом геометрические параметры изделия не должны превышать допустимый уровень в условиях изготовления, хранения и длительной эксплуатации.

Актуальность данной работы обусловлена, помимо вышеуказанного, отсутствием нормативной документации по стабилизации сборок и необходимостью комплексной оценки всех этапов изготовления узла и учета влияния целого ряда взаимообусловленных факторов, связанных с последовательными стадиями процесса изготовления изделия.

### Постановка задачи

Цель работы заключается в изложении основных причин, влияющих на геометрическую точность изделия и ее стабильность во времени и сложных условиях эксплуатации, и определении системных комплексных подходов, позволяющих обеспечить управляемый характер процесса формообразования прецизионных деталей и узлов. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач.

- выявление причин нестабильности геометрической точности прецизионных узлов;
- определение критериев оценки размерной стабильности материалов, деталей, узлов;
- разработка направлений повышения размерной стабильности прецизионных деталей и узлов.

### Характеристика технической ситуации

В настоящее время известны преимущественно локальные технические решения по обеспечению вышеуказанной точности и практически отсутствуют системные подходы к решению проблемы обеспечения размерной стабильности прецизионных узлов из целого ряда перспективных конструкционных материалов. В традиционных методах расчета конструкций с назначением запаса прочности и технического предела текучести используется макроскопический предел текучести  $\sigma_{0,2}$  металлов и сплавов,

который характеризует постоянство свойств материала в макрообъемах. Однако для сохранения точностей прецизионных деталей необходимо обеспечивать как можно более высокие пределы напряжений, при которых начинаются движения линейных дефектов кристаллической решетки – дислокаций – и стабильность фазового состояния, т.е. постоянство характеристик в микрообъемах. В то же время для достижения только высоких прочностных свойств эти факторы не обязательны.

Действующие сегодня нормативные материалы на стабилизацию размеров термической обработкой, такие как [2, 3], предусматривают в качестве оценки размерной стабильности материала условный предел упругости  $\sigma_{0,001}$  при растяжении и условный предел релаксации при изгибе  $\sigma_r 0,001/500-3500$ . Указанные стандарты имеют определенные ограничения [4]:

- они предлагают только термические методы стабилизации геометрической точности;
- в них не включен ряд новых материалов, применяемых в навигационной технике;
- эффективность рекомендуемых режимов термостабилизации, как показывает практика, не всегда достаточна;
- в них не содержится сведений по стабилизации и методам оценки стабильности сборок, в том числе сварных;
- используемая характеристика размерной стабильности материала – условный предел упругости  $\sigma_{0,001}$  – на порядок больше по допустимой остаточной деформации, чем прецизионный предел упругости.

В настоящее время отсутствует комплексная характеристика размерной стабильности конструкций, и хотя [2] предусматривает подразделение деталей на категории с учетом заданной точности, их формы и жесткости, но стандарт не учитывает всех отрицательных факторов, влияющих на точность реальной детали, а стабилизацию сборочных единиц практически не охватывает. Поэтому для достоверной оценки размерной стабильности каждой ответственной детали и сборки необходима разработка и практическая реализация оригинальной методики экспериментальной проверки.

#### Предлагаемый комплексный подход

Для обеспечения стабильности геометрической точности прецизионного узла предлагается анализировать, оценивать и обеспечивать стабильность геометрической точности на последовательных взаимосвязанных уровнях: материал, деталь, узел.

На каждом уровне выявляются причины нестабильности, возможные критерии оценки их влияния и предполагаемые технологические методы и средства повышения и сохранения точности узла, что наглядно представлено в таблице в виде структурной схемы.

Уровень	Причины нестабильности	Критерии оценки	Методы обеспечения
Материал	Фазовая нестабильность	Значения показателей сопротивления микропластическим деформациям (СМПД)	Термическая обработка: закалка, старение, отжиг и др.
	Структурная нестабильность		
	Анизотропия (текстура)	Изотропность физико-механических характеристик	
Деталь	Критические значения внутренних напряжений	$\sigma_{max} < \sigma_{0,0001}$ или $\sigma_{max} < \sigma_{r 0,001}$	Структура технологического процесса (ТП) изготовления
	Распределение внутренних напряжений (наличие концентраторов напряжений)	Осесимметричность поля внутренних напряжений	Корректировка конфигурации
Узел	Остаточные напряжения в соединениях	$\sum \sigma_{соед} < \sigma_{0,0001}$	Корректировка конфигурации и характера сопряжения Структура сборочного ТП
	Колебания температуры и температурные градиенты	Согласованность температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов входящих деталей	Применение материалов с близкими ТКЛР
	Размерная нестабильность составляющих звеньев	Размерная нестабильность замыкающего звена	Расчетно-экспериментальный метод оценки нестабильности замыкающего звена

Таблица. Структурная схема обеспечения стабильности геометрической точности прецизионных узлов

### Причины размерной нестабильности на уровне материала

Микроструктурные изменения материала включают в себя изменения концентрации вакансий и междоузельных атомов, атомное упорядочение, дисперсионное выделение и растворение вторичных фаз, фазовые превращения с изменением типа кристаллической решетки [4]. При температуре, близкой к комнатной, особенно велика роль точечных дефектов. К этим дефектам в первую очередь относятся вакансии и междоузельные атомы, образующиеся при закалке, пластическом деформировании, в том числе при механической обработке, и при других технологических воздействиях. Из-за высокой подвижности точечных дефектов при низких температурах происходит их активное перемещение к стокам, в качестве которых выступают поверхности деталей, границы зерен, дислокации и другие элементы структуры. Выход вакансий на стоки приводит к изменению геометрии образца.

Для оценки размерной стабильности материала используют характеристики способности материала сопротивляться микропластическим деформациям при кратковременном и длительном нагружении [5, 6]. При кратковременном нагружении стабильность характеризуется прецизионным пределом упругости (ППУ)  $\sigma_{0,0001}$  или  $\sigma_{0,0002}$ . Этот показатель определяется по величине напряжения, при котором после разгрузки образца возникает остаточная деформация  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  в относительных единицах или  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  в процентах. ППУ является характеристикой сопротивления начальным стадиям пластической деформации при кратковременном нагружении и значительно меньше макроскопического предела текучести  $\sigma_{0,2}$ .

Однако результаты испытаний широкого круга конструкционных материалов показывают, что ППУ не является исчерпывающей характеристикой размерной стабильности материала, так как свидетельствует о способности сохранения постоянства размеров лишь на период изготовления, сборки и регулировки изделий, который в производственных условиях составляет несколько сотен часов [5].

Более полной характеристикой сопротивления материала микропластическим деформациям во времени является условный предел релаксации (УПР), определяемый при длительном нагружении. Как известно, кривая релаксации напряжений (рисунок) характеризуется наличием двух участков – интенсивной релаксации в начальный период испытаний с последующей замедленной скоростью процесса во второй стадии (кривая 1) или полным его прекращением (кривая 2).

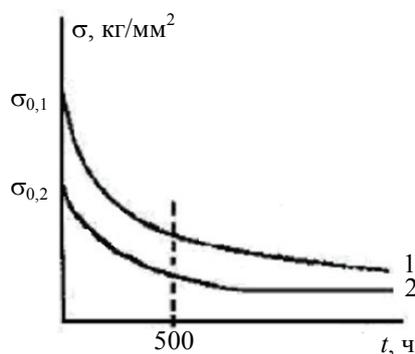


Рисунок. Кривые интенсивной релаксации напряжений в начальный период испытаний: 1 – с замедленной скоростью процесса; 2 – полным его прекращением

Условный предел релаксации  $\sigma_{r,0,001/500-3500}$  или условный предел ползучести (УПП)  $\sigma_{0,001/500-3500}$  – это напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,001% в условиях релаксации или ползучести, соответственно, в интервале времени 500–3500 ч.

### Причины размерной нестабильности на уровне детали

Высокое СМПД и структурная устойчивость материалов являются необходимым, но не достаточным условием создания высокостабильных изделий. Прецизионная деталь должна иметь размеры и форму, обеспечивающие при воздействии внешних нагрузок осесимметричную эпюру напряжений, не превосходящих ППУ или УПР [4].

Поэтому на данном этапе необходимо проведение анализа конструкции детали с рассмотрением распределения поля внутренних напряжений, которые не должны превышать ППУ или УПР (УПП), особенно в местах концентрации напряжений (выточки, отверстия, подрезы и т.п.).

Кроме того, за счет технически рационального построения технологического процесса изготовления конкретной детали необходимо снижать уровень остаточных напряжений в готовой детали, внесен-

ных обработкой в процессе ее формообразования, до определенных значений, соответствующих выбранным критериям оценки стабильности материала детали.

### **Причины размерной нестабильности на уровне узла**

В реальных узлах могут действовать такие дополнительные отрицательные факторы, как пониженная жесткость конструкции, высоконапряженные соединения, разнородность материалов в сборочных узлах и др. Поэтому необходимо проводить анализ конструкции узла, характера сопряжения с последующими необходимыми корректировками; с учетом которых и разрабатывать технологический процесс сборки, предусматривая соответствующие обработки для снятия внутренних напряжений, внесенных операциями сборки узла; а также применять материалы деталей узла с согласованными или близкими ТКЛР.

Представляя размерную нестабильность узла в виде отдельных составляющих, целесообразно для ее анализа использовать расчетно-экспериментальный метод поэтапной оценки [1]. Метод предполагает последовательный анализ стабильности составляющих звеньев, т.е. только тех элементов конструкции, которые входят в размерную цепь с замыкающим звеном, определяющим точность узла. Понижая размерную нестабильность определенных составляющих звеньев, можно повысить размерную стабильность замыкающего звена, а значит, и всего узла.

### **Заключение**

Обоснована актуальность и важность комплексного подхода к решению проблемы повышения уровня размерной стабильности прецизионных узлов гиросприборов.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность изделий – структурно-фазовая нестабильность, остаточные напряжения, температурные поля, и физические механизмы процессов, определяющих их размерную стабильность и связанных со свойствами исходных материалов, конфигурацией деталей и особенностями процесса сборки.

Предложена общая структурная схема обеспечения стабильности размеров и формы прецизионных узлов, рассматривающая три последовательных взаимосвязанных уровня: материал, деталь, узел. Для каждого уровня сформулированы возможные критерии оценки размерной стабильности – прецизионный предел упругости, условный предел релаксации или ползучести, равномерность поля внутренних напряжений, согласованность температурных коэффициентов линейного расширения материалов и др.

Определены направления дальнейших исследований, которые позволят повысить точность и размерную стабильность реальных узлов гиросприборов, что, в свою очередь, улучшит их функциональные характеристики.

### **Литература**

1. Гаврюшев В.И. Метод оценки размерной нестабильности замыкающего звена гироскопических сборок // Гироскопия и навигация. – 1993. – № 1. – С. 18–25.
2. ГОСТ 17535-77. Детали приборов высокоточные металлические. Стабилизация размеров термической обработкой. Типовые технологические процессы. – Введ. 15.02.78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 47 с.
3. ОСТ4 ГО.054.103. Детали приборов высокоточные металлические. Стабилизация размеров термической обработкой. Типовые технологические процессы. – Введ. 01.07.75. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 74 с.
4. Гаврюшев В.И. Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1981. – 146 с.
5. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
6. Гаврюшев В.И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – 113 с.

*Яковлева Светлана Анатольевна* – ОАО Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, аспирант, yorkunoi@gmail.com  
*Гаврюшев Владислав Иванович* – ОАО Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, ведущий специалист, кандидат технических наук, доцент  
*Щербак Александр Григорьевич* – ОАО Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, начальник сектора, доктор технических наук, a\_sch@gtn.ru

УДК 004.67; 574.24

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Н.В. Веденина

Предложен программный комплекс для определения расчетного класса опасности химических соединений и малоизученных веществ на основе системного анализа и обработки информации об их элементном составе, а также выборочных физико-химических и токсикологических характеристик их классификационных моделей. С помощью предложенного программного комплекса представляется возможным более точно выполнить прогноз экологической опасности химических соединений и малоизученных веществ. Даны описания реализации программного комплекса на языке C# с использованием технологии Microsoft.NET.

**Ключевые слова:** химические соединения, малоизученные вещества, элементный состав, физико-химические и токсикологические характеристики, модель вредного вещества, обработка информации, системный подход, программный комплекс.

**Введение**

Современный период развития общества характеризуется сильным влиянием на него информационных технологий, использующих совокупность средств и методов сбора, обработки и передачи данных для получения информации нового качества о состоянии объекта, процесса или явления (информационного продукта) [1]. В настоящее время существенно увеличивается значение информационных технологий в различных областях человеческой деятельности, в том числе и в области охраны окружающей среды. Это позволяет контролировать состояние природной среды, влияние вредных и опасных факторов производственной среды на человека, своевременно реагировать и принимать меры к снижению или полному устранению негативного воздействия этих факторов. Развитие современных предприятий, уделяющих необходимое внимание соблюдению требований действующего законодательства в области экологии, охраны труда и промышленной безопасности, немислимо без внедрения и функционирования соответствующих информационных систем.

Экологическое законодательство определяет права и обязанности организаций, учреждений, общественных объединений и граждан по обеспечению условий безопасного проживания на территории республики, а также гарантии прав граждан со стороны государства на здоровую и благоприятную для жизни окружающую среду; определяет экологические требования к хозяйственной и иной деятельности, особенно требования контроля и надзора в области охраны окружающей среды, меры и условия наказания за нарушение природоохранного законодательства.

В задачи экологического нормирования входит оценка экологической опасности веществ посредством анализа, экспертизы и присвоения им класса опасности [2].

Для оценки экологической опасности химических веществ требуется значительная и дорогостоящая экспериментальная работа по установлению следующих показателей: предельно допустимой концентрации, средней смертельной дозы и концентрации, коэффициента возможного ингаляционного отравления, зоны острого и хронического действия. В то же время во многих случаях в предпроектной и проектной деятельности при экологической экспертизе достаточно использовать прогнозную оценку классов опасности, которую в дальнейшей работе, например, при продвижении новых веществ на рынок, можно (и нужно) уточнить и экспериментально подтвердить. На это указывают и нормативные документы [3] «...на период, предшествующий проектированию производства, должны временно устанавливаться ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) путем расчета по физико-химическим свойствам или путем интерполяции и экстраполяции в рядах, близких по строению соединений или по показателям острой опасности».

Актуальность данной проблемы влечет за собой необходимость разработки механизмов, средств и систем, позволяющих эффективно выполнить прогноз опасности малоизученных химических веществ на стадии проектирования, существенно сократив объем экспериментальной работы, что значительно упростит выбор экологически безопасного вещества по экономическим и временным показателям.

Основной целью работы является разработка инструментария для оценки и прогнозирования экологической опасности малоизученных химических веществ на основе системного анализа и обработки информации об их элементном составе, а также выборочных физико-химических и токсикологических характеристик их классификационных моделей.

## Постановка задачи

Для постановки задачи оценки (прогнозирования) классов опасности веществ, в частности, по справочным характеристикам, необходимо применение современных информационных технологий с их возможностью добывать и преобразовывать информацию. В данном случае требуется обработка информации о физико-химических характеристиках веществ и изучение количественной связи физико-химических характеристик с классом опасности.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующее.

- На основе анализа предметной области сформировать обучающие и экзаменационные выборки веществ в соответствии с четырьмя классами их опасности.
- Проанализировать закономерности связи выборочных факторов (элементного состава, физико-химических свойств) с классами опасности веществ.
- На основе системного анализа и обработки имеющейся информации об элементном составе и выборочных физико-химических характеристик разработать статистическую модель вредного вещества по каждому классу опасности.
- Разработать методику и инструментальные средства для определения расчетного класса опасности.
- Провести численный эксперимент, доказывающий достоверность метода классификации на основе использования расчетного класса опасности вредных веществ.

При решении задач экологического нормирования веществ необходимо учитывать следующее.

1. Должна существовать устойчивая связь между отдельными характеристиками веществ (составом, физико-химическими свойствами, структурой) и их наборами и экологическими параметрами (классом опасности).
2. Набор характеристик реального и диагностируемого вещества должен быть сопоставим и доступен для обычного эксперта.
3. Оценка экологических параметров должна быть достоверной и обеспечивать возможность принятия решения.

Из рассмотренных выше условий важнейшим является первое, так как именно оно обеспечивает возможность достоверной экологической оценки веществ на основе анализа других свойств.

В процессе работы были составлены и проанализированы специальные таблицы, в которых собраны данные об известных классифицированных органических веществах. На основе этих данных были подсчитаны среднеарифметические значения элементного состава, молекулярной массы и физико-химических характеристик, которые характеризуют класс опасности как специфический набор вредных веществ. Далее выдвинута гипотеза, что между средними значениями характеристик веществ в наборах и классом опасности существует некая зависимость.

Таким образом, модель вредного вещества можно представить в виде

$\text{DangerMatter} = \langle \text{Kl}, \text{EI}[], \text{In}, \text{Fxx}[], \text{MM}, \text{Sp} \rangle$ ,

где Kl – класс опасности вещества; EI[] – элементный состав вредного вещества; In – стехиометрические коэффициенты брутто-формулы вредного вещества; Fxx[] – физико-химические характеристики вредного вещества; MM – молекулярная масса вещества, Sp – процентное содержание элементов вредного вещества.

Исходя из предложенной модели, был проведен анализ элементного состава EI[] статистического образа. Фрагменты обучающей выборки веществ для анализа и прогнозирования экологической опасности даны частично в виде статистических образов классов опасности вредных веществ (таблица). В результате исследования зависимости класса опасности вредных веществ Kl от элементного состава EI[] и физико-химических характеристик Fxx[] были получены диаграммы, одна из которых представлена на рис. 1.

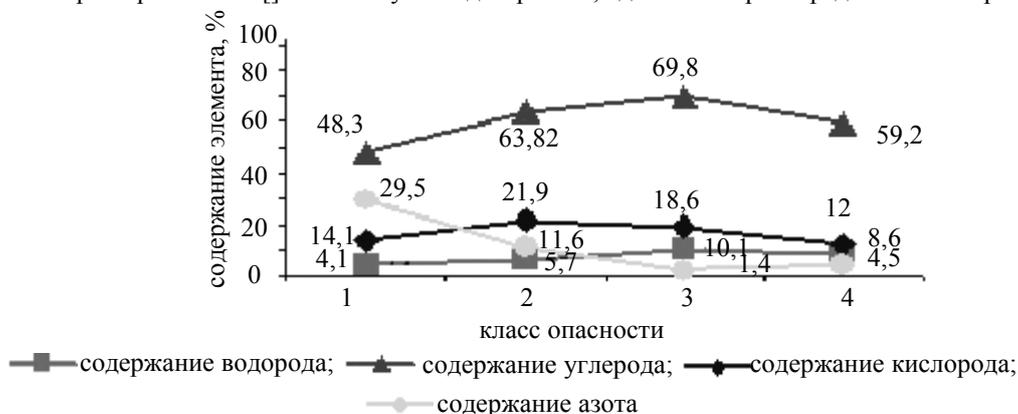


Рис. 1. Зависимость среднего арифметического содержания углерода, водорода, кислорода и азота в статистическом образе от класса опасности

Прогнозирование расчетного класса опасности неизвестного вредного вещества проводилось с использованием фазового расстояния Пирсона

$$D = w \sum_{i=1}^k |X_i - T_i|,$$

где  $X_i$  – координаты классифицируемого объекта в  $K$ -мерном пространстве;  $T_i$  – координаты центра класса,  $w$  – весовой коэффициент, равный  $(n+k)^{-1}$ ;  $n$  – число элементов в классе опасности,  $k$  – число факторов, участвующих в вычислении.

Класс опасности	Статистический образ вредного вещества	Содержание элементов (элементный состав), % (по нормированной брутто-формуле)						
		C	H	O	N	Cl	S	другие
I	$C_{7,32}H_{7,39}O_{2,32}N_{0,53}Cl_{0,58}S_{0,16}Pb_{0,05}Hg_{0,05} + \text{фхх}$	47,27	4,00	19,96	4,00	11,06	2,76	...
II	$C_{6,50}H_{7,03}O_{1,48}N_{0,50}Cl_{0,40}F_{0,48}Si_{0,03} + \text{фхх}$	53,38	4,84	16,19	4,79	9,63	0,00	...
III	$C_{5,67}H_{8,35}O_{1,40}N_{0,44}Cl_{0,42}F_{0,07}Br_{0,07}S_{0,06}K_{0,06}Na_{0,02} + \text{фхх}$	51,74	6,39	17,02	4,68	16,58	1,46	...
IV	$C_{4,33}H_{7,08}O_{0,50}Cl_{0,42}F_{0,54} + \text{фхх}$	56,35	7,73	8,67	0,00	27,26	0,00	...

Таблица. Фрагменты статистических образов веществ в четырех классах опасности

### Основной результат

На основе данного метода разработаны информационная структура, алгоритмы и инструментальные средства программного комплекса для прогнозирования экологической опасности химических веществ [4]. Алгоритм прогнозирования экологической опасности химического вещества путем определения расчетного класса опасности представлен на рис. 2.

Программный комплекс представляет собой симбиоз двух компонентов: банка данных опасных химических веществ и соединений; модуля прогнозирования экологической опасности химических соединений и малоизученных веществ.

Банк данных содержит информацию об известных опасных химических веществах и соединениях, данные по их элементному составу, физико-химическим и токсикологическим характеристикам.

Банк данных программного комплекса выполняет следующие функции:

- надежное сохранение информации и данных в файлах;
- обеспечение возможности просмотра и модификации, а также ввода данных.

Подсистемы программного комплекса выполняют следующие функции:

- подсистема расчета класса опасности
  - расчет метрики фазового расстояния до определенного класса опасности;
  - расчет расстояния до центра класса опасности;
  - вычисление ближайшего класса опасности;
- подсистема хранения сведений о веществах
  - банк данных химических веществ;
- подсистема визуализации
  - ввод и отображение элементов брутто-формулы;
  - вывод класса опасности вещества;
  - вывод расчета класса опасности и всех компонент;
  - графическая интерпретация брутто-формулы.

Программный комплекс реализован на языке C# с использованием технологии Microsoft.NET и СУБД MS SQL. Для начала работы программы необходимо задать элементы, входящие в состав брутто-формулы вещества. Выбранные элементы показываются на схематичном изображении формулы вещества, после чего задается их количество. По результатам проведения расчета отображается отчет, содержащий информацию о промежуточных шагах вычислений и классе опасности вещества.

Пример прогнозирования класса опасности для фталевого ангидрида – высокомолекулярного соединения, применяемого в промышленности – приведен на рис. 3.

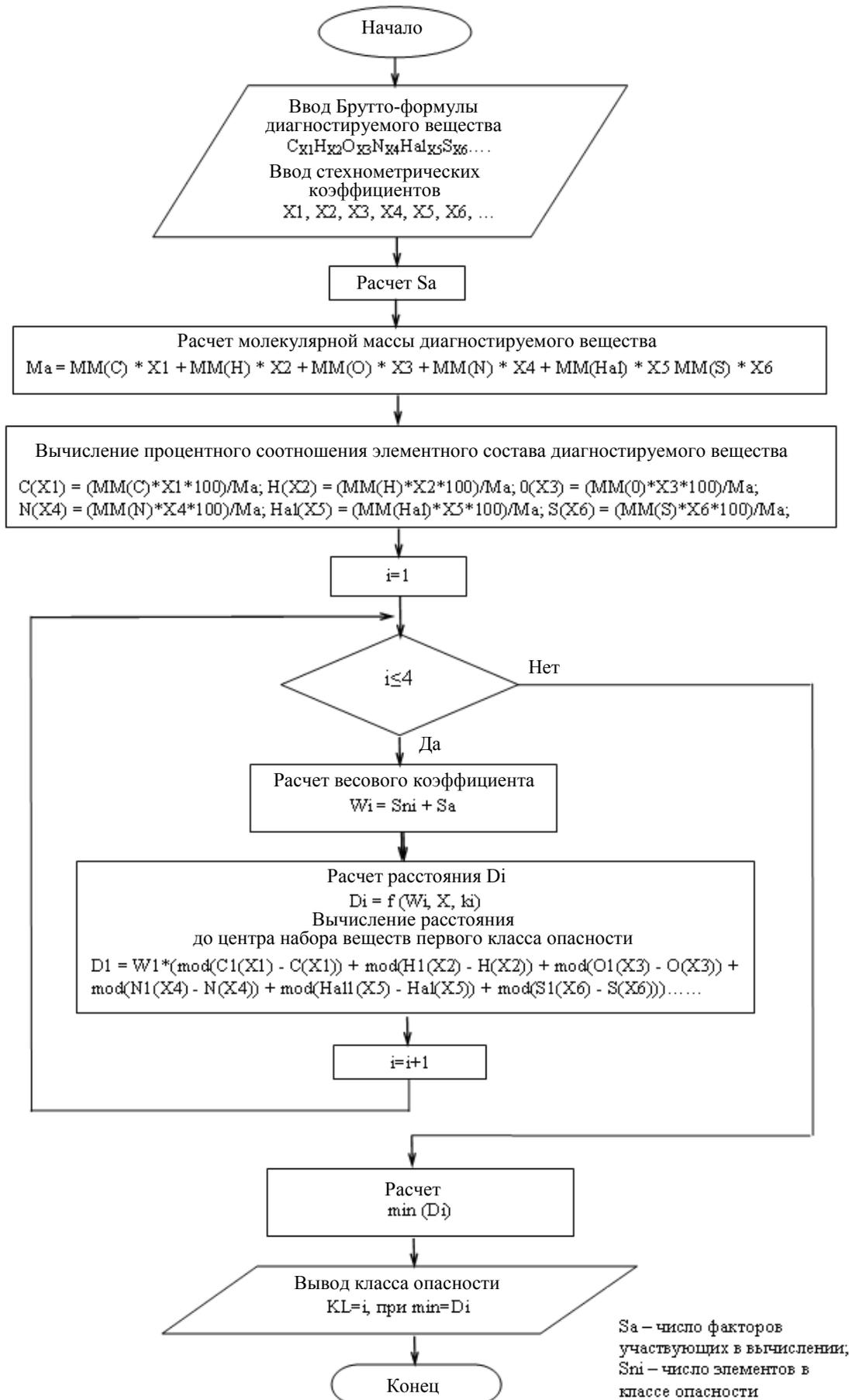


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования экологической опасности химических веществ

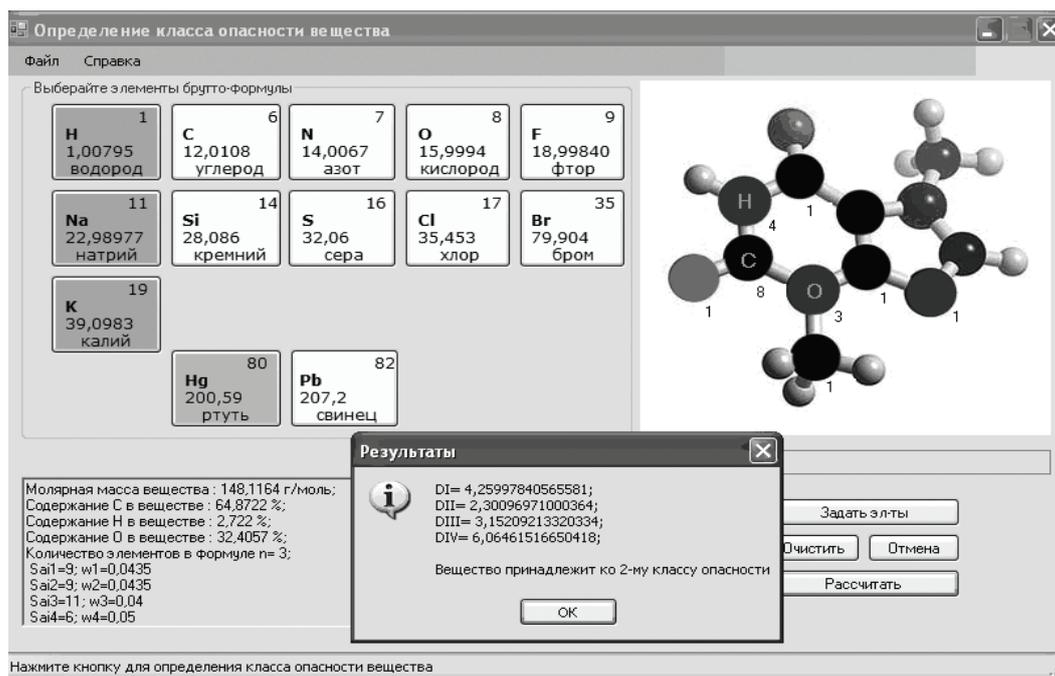


Рис. 3. Результаты определения класса опасности фталевого ангидрида

### Заключение

В данной работе новыми являются следующие положения и результаты.

1. Разработаны статистические образы четырех классов опасности веществ.
2. Разработаны модели состава опасного вещества каждого класса.
3. Установлен ряд новых закономерностей, позволяющих проводить теоретическую (расчетную) экологическую классификацию малоизученных органических веществ.
4. Разработана методика оценки и прогнозирования экологической опасности малоизученных веществ и химических соединений.
5. На основе результатов исследования разработана информационная структура, алгоритмы и инструментальные средства для определения расчетного класса опасности малоизученных веществ. Средняя достоверность оценки по данным вычислительного эксперимента – не ниже 88,4%.

Возможны следующие перспективные направления работы:

- по мере накопления новых данных о свойствах вредных веществ – совершенствование обучающих и контрольных выборок;
- развитие представлений о статистическом образе вредного вещества с учетом его структурных характеристик;
- развитие банка данных вредных химических соединений и веществ;
- разработка интеллектуальных процедур определения класса опасности новых и малоизученных химических соединений и веществ.

### Литература

1. Веденина Н.В. Анализ и прогнозирование опасности химических соединений и веществ / Н.В. Веденина, А.Г. Кравец // Изв. ВолгГТУ. – 2010. – № 3.
2. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. – Введ. 01.01.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
3. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введ. 01.01.89. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 48 с.
4. Камаев В.А. Разработка и применение модели автоматизированной системы управления информационными процессами к задаче мониторинга состояния оборудования / В.А. Камаев, В.В. Лежебоков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 9. – С. 18–22.

**Веденина Наталья Валерьевна** – Волгоградский филиал ООО «Проманалитика», ведущий специалист, n.v.vedenina@mail.ru

УДК 004.032.2

**АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ****А.В. Демин, Т.Е. Войтюк, В.А. Климанов**

Представлена структура системы сбора и обработки геофизической информации. Проведена классификация объектов информации, исходя из группировки физических сигналов по однородным свойствам. Описан алгоритм анализа геофизической обстановки, который можно применять для проектирования измерительной системы, предназначенной для сбора и обработки различной геофизической информации в реальном масштабе времени.

**Ключевые слова:** геофизическая информация, алгоритм, нефть, измерительная система, структура.

**Введение**

Сегодня, как никогда прежде, нефть и другие природные ресурсы играют значительную роль в экономике нашей страны. Из года в год наша нефтегазовая промышленность пытается существенно увеличить объемы добываемой нефти и газа. Однако запасы природных ресурсов при такой интенсивной добыче быстро уменьшаются, приходится искать и разрабатывать все новые и новые месторождения, которые располагаются во все более удаленных местах с суровым климатом. Вследствие этого растет себестоимость добываемых ресурсов, усложняется их транспортировка.

С другой стороны, в старых месторождениях еще сохранились значительные запасы нефти и газа вследствие экстенсивных методов добычи в прежнее время. Но эти запасы располагаются в различных продуктивных пластах, а добыча из отдельно взятого пласта, как реализовывалось раньше, экономически нецелесообразно. Поэтому использование новейших информационных технологий в процессе разработки нефтяных и газовых месторождений России становится первостепенной задачей на пути увеличения и контроля эффективности месторождений. Основным способом решения данной проблемы является добыча нефти из нескольких пластов одновременно.

Все большее число нефтегазовых добывающих компаний сталкиваются с необходимостью вскрытия нескольких продуктивных зон одной скважиной и, в то же время, обеспечения возможности замера дебитов из каждой отдельной зоны [1]. Данная потребность диктуется необходимостью поддержания баланса между существующим подходом к разработке недр, с одной стороны, и экономическими соображениями, с другой. Затраты на строительство дополнительных эксплуатационных скважин на каждом кустовом основании в большинстве случаев превышают стоимость закачивания одной скважины, которая построена по схеме, позволяющей вести одновременную добычу сразу из нескольких продуктивных горизонтов. Но для управления работой такой скважины необходимо оперативно получать геофизическую информацию. Это даст возможность оперативно принимать решения по оптимизации режимов работы скважин, пластов и системы разработки месторождения [2]. Таким образом, задача разработки алгоритма анализа геофизической обстановки является актуальной.

Основным способом решения данной проблемы является добыча нефти из нескольких пластов одновременно одной скважиной.

Для разработки алгоритма анализа геофизической обстановки необходимо решить следующие задачи:

- определить структуру системы сбора и обработки геофизической информации;
- классифицировать объекты информации;
- описать алгоритм анализа геофизической обстановки.

**Структура системы сбора и обработки геофизической информации**

Основной задачей системы сбора и обработки геофизической информации является мониторинг количественных и качественных параметров работы каждого исследуемого объекта, а также анализ геофизической обстановки и формирование решений для оптимизации процесса разработки месторождений.

Перечисленные выше задачи определяют структуру системы. Система сбора и обработки геофизической информации представляет собой совокупность подсистем, различных по функциональному назначению. Система состоит из измерительной подсистемы, находящейся в скважине, и подсистемы обработки (рис. 1).

В измерительную часть входят подсистемы регистрации состояния объекта измерения и передачи информации. Первая служит для регистрации параметров работы продуктивных пластов с целью определения количественного и качественного состава притока по каждому интервалу перфорации и технического состояния эксплуатационной колонны скважины. Подсистема передачи данных – это спускаемый в скважину волоконно-оптический кабель, который предназначен для объединения датчиков различных типов в единую измерительную систему.

Наземная часть состоит из подсистем первичной обработки информации и конечной обработки информации. Первая служит для приема оптических сигналов с датчиков и дальнейшего перевода оптического сигнала в электрический. Подсистема конечной обработки информации предназначена для хранения, обработки, отображения информации и принятия решения по управлению наземным и забойным оборудованием.

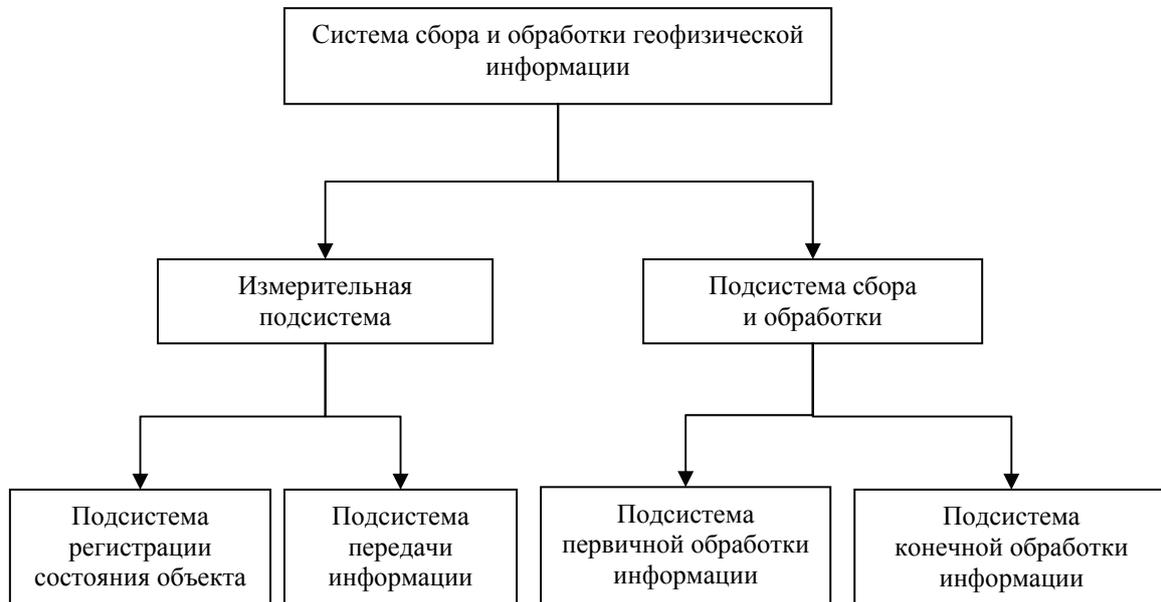


Рис. 1. Структура системы сбора и обработки геофизической информации

### Классификация объектов геофизической информации

Под объектом геофизической информации будем понимать физический сигнал, полученный от измеряемой среды. Для классификации объектов геофизической информации необходимо сгруппировать физические сигналы по однородным свойствам. Для систематизирования объектов информации будем использовать иерархический метод классификации.

К объектам геофизической информации нулевого уровня относятся температура ( $T$ ), давление ( $P$ ), расход ( $Q$ ) и ионизирующее излучение ( $W/m^2$ ). Объекты первого уровня – фазовая задержка света ( $\Delta\varphi(t)$ ), обусловленная конструктивными особенностями передающей среды. Объектом второго уровня является электрический сигнал, выраженный напряжением ( $U$ ).

Иерархическая структура классификации информации представлена на рис. 2.

Исходя из классификации информации, для преобразования некоторого физического сигнала  $V(t)$  в выходное напряжение  $u(t)$  можно выделить две стадии: воздействие – разность фаз, разность фаз – напряжение.

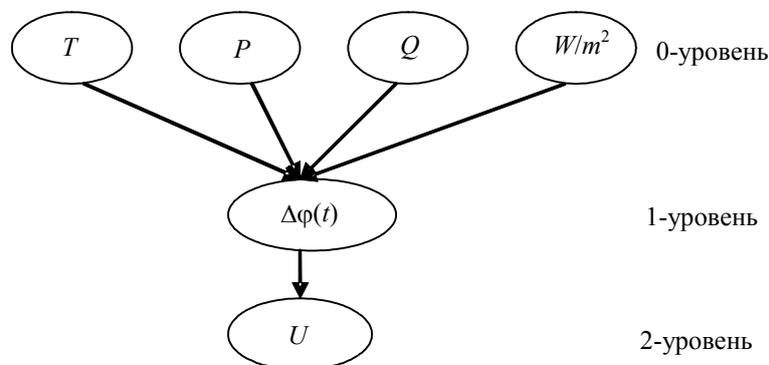


Рис. 2. Иерархическая структура классификации информации

При первом преобразовании на пассивный волоконный преобразователь воздействует физический сигнал, результирующим выходным сигналом является фазовая задержка света  $\Delta\varphi(t)$

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_0 + K_v \cdot V(t), \quad (1)$$

где  $\varphi_0$  – начальная разность фаз при отсутствии воздействия,  $K_v$  – чувствительность преобразователя к воздействию  $V$  [3].

Чувствительность преобразователя  $K_v$  можно записать как отношение приращения разности фаз  $\delta\varphi$  к вызвавшему его приращению воздействия:

$$K_v = \frac{\delta\varphi}{\delta V}. \quad (2)$$

При последующем преобразовании выходным сигналом измерителя является напряжение  $u(t) = K_\varphi \cdot \Delta\varphi(t)$ , (3)

где  $K_\varphi$  – чувствительность преобразования разности фаз в выходное напряжение.

Чувствительность  $K_\varphi$  также можно записать в виде отношения приращения выходного напряжения к вызвавшему его приращению разности фаз:

$$K_\varphi = \frac{\delta u}{\delta \varphi}. \quad (4)$$

### Алгоритм анализа геофизической обстановки

Анализ геофизической обстановки должен производиться в реальном масштабе времени по результатам измерений, производимых в скважине электрическими и оптическими датчиками. Алгоритм анализа представлен на рис. 3.

При регистрации физического сигнала электрическими и оптическими датчиками измеряются профили температуры, влагометрии, акустических сигналов притока жидкости, давления в каждой точке и по всему пласту действующей скважины, а также ионизирующее излучение. С помощью волоконно-оптического кабеля осуществляется передача результатов измерений физических параметров от датчиков к наземному оптоэлектронному блоку обработки информации.

В оптоэлектронном блоке происходит прием оптических сигналов с датчиков давления, температуры, расхода, гамма-каротажа и преобразование в аналоговый электрический сигнал. На следующем шаге аналоговые напряжения поступают на блок оцифровки, затем обрабатываются для получения значений расхода, водонасыщенности флюида из интервалов перфорации, расположенных по всему стволу скважины. Полученная информация регистрируется и записывается в энергонезависимую память.

По запросу пользователя в произвольный момент времени производится обработка полученной информации с целью выявления корреляционных, спектральных и временных составляющих сигнала [4]. Спектральный анализ позволяет произвести оценку спектра мощности случайного процесса, который рассчитывается модифицированным методом периодограмм [5]:

$$\hat{W}(\omega) = \frac{1}{f_d} \frac{\left| \sum_{k=0}^{N-1} x(k)\omega(k)e^{-j\omega kT} \right|^2}{\sum_{k=0}^{N-1} |\omega(k)|^2}, \quad (5)$$

где  $f_d$  – частота дискретизации,  $x(k)$  – отсчеты случайного процесса,  $\omega(k)$  – весовая функция (окно) с коэффициентами,  $T$  – период дискретизации.

Получаемые данные обрабатываются в рамках модели месторождения, дальнейший анализ позволяет выделить или подавить определенные частоты исследуемого сигнала, используя низкочастотные, высокочастотные или полосовые фильтры [6]:

$$y(k) = b_0x(k) + b_1x(k-1) + \dots + b_mx(k-m) - a_1y(k-1) - a_2y(k-2) - \dots - a_ny(k-n), \quad (6)$$

где  $x(k)$  – отсчеты входного сигнала,  $y(k)$  – отсчеты выходного сигнала,  $a_i$  и  $b_j$  – постоянные коэффициенты. Максимальное из чисел  $m$  и  $n$  – порядок фильтра [7].

Преобразованный сигнал дает возможность геологу получить объемную модель хода разработки залежей нефти.

### Заключение

Алгоритм анализа геофизической обстановки можно применить для проектирования измерительной системы, предназначенной для сбора и обработки различной геофизической информации в реальном масштабе времени вне зависимости от состояния скважины и измеряемых параметров продуктивных пластов.

В результате интерактивной обработки пользователю предоставляются спектральные, временные и корреляционные составляющие сигнала, полученного в результате измерения требуемых характеристик. На основании этой информации геолог может принимать решение об управлении работой сква-

жинным насосом или нагнетательными скважинами. Это позволит вести одновременную добычу сразу из нескольких продуктивных горизонтов, тем самым повысив рентабельность разработки ранее неперспективных месторождений.

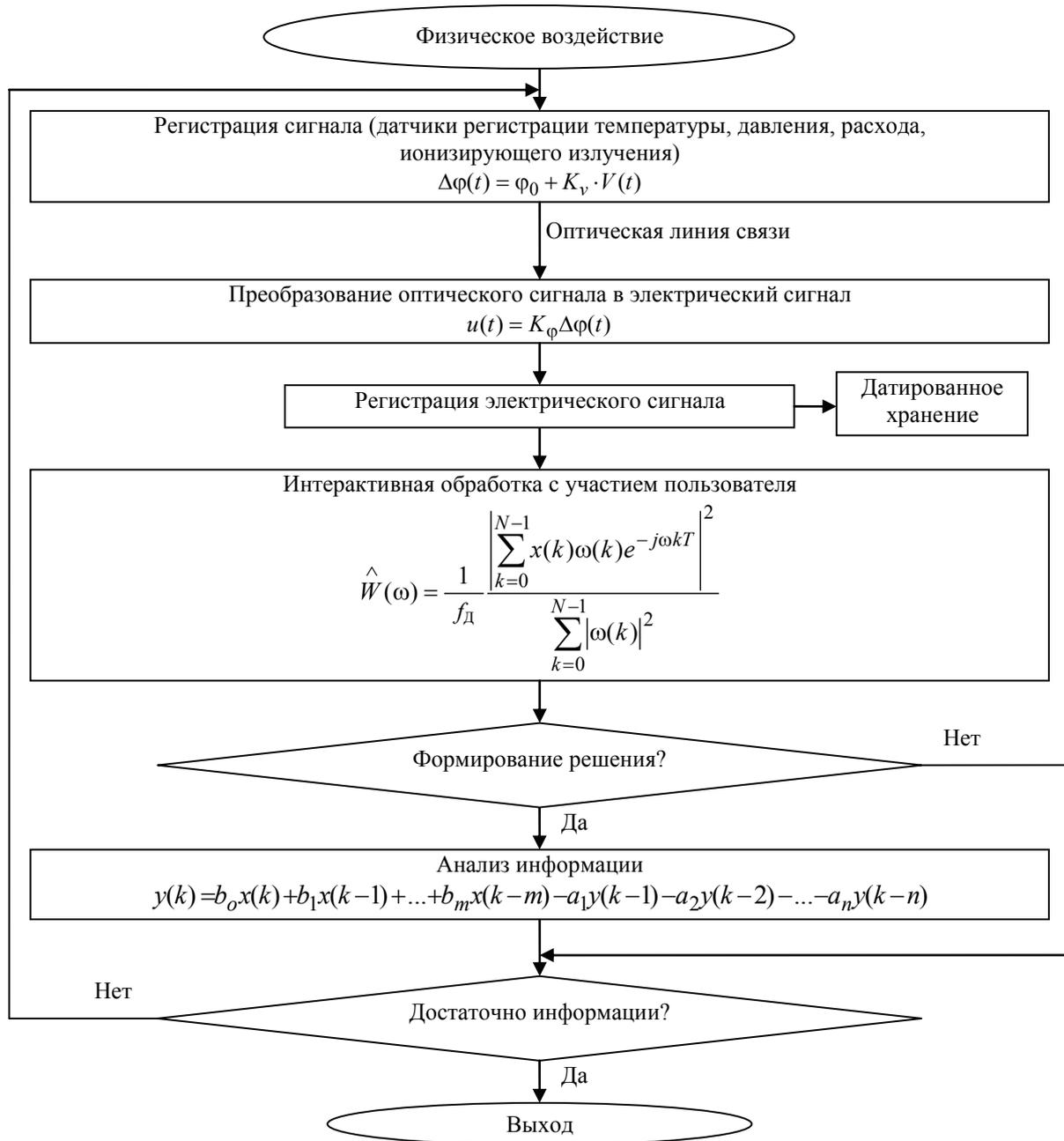


Рис. 3. Алгоритм анализа геофизической обстановки

### Литература

1. Форест Г. Добыча нефти: Пер. с англ. – М.: Олимп-Бизнес, 2003. – 416 с.
2. Крылов Д.Н. Детальный прогноз геологического разреза в сейсморазведке. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 195 с.
3. Лиокумович Л.Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Ч. 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 68 с.
4. Куприянов М.С., Матюшкин Б.Д. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб: Политехника, 1999.

5. Welch P.D. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoust. – 1967. – V. AU-15. – P. 70–73.
6. Percival D.B. and Walden A.T. Spectral Analysis for Physical Applications: Multitaper and Conventional Univariate Techniques. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
7. Бондарев В.Н., Трестер Г., Чернега В.С. Цифровая обработка сигналов: методы и средства. – Севастополь: СевГТУ, 1999. – 398 с.

- Демин Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, dav\_60@mail.ru
- Войтюк Татьяна Евгеньевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tanya\_4ever@mail.ru
- Климанов Виталий Александрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, v\_klimanov@mail.ru

УДК 517.958:532.5

## РЕАЛИСТИЧНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА АДАПТИВНЫХ СЕТКАХ ТИПА «ВОСЬМЕРИЧНОЕ ДЕРЕВО»

К.Д. Никитин

Предлагается эффективная технология моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости со свободной границей. В технологии объединены проекционный метод для решения уравнений Навье–Стокса и метод функции уровня и частиц для работы со свободной поверхностью. Расчет проводится на адаптивно сгущающихся гексаэдральных сетках типа «восьмеричное дерево».

**Ключевые слова:** вычислительная технология, течения со свободной поверхностью, компьютерная графика.

### Введение

Моделирование течений несжимаемой жидкости привлекает большой интерес в научном сообществе. Рассматриваемые задачи включают моделирование морских волн, заливание и обтекание объектов, падение капель, образование брызг и многое другое. Моделирование подобных явлений – технологически сложная задача ввиду того, что необходимо отслеживать динамику жидкости в постоянно изменяющейся области.

Одна из важных сфер, где востребовано моделирование течений со свободной поверхностью – это компьютерная графика. Задачи компьютерной анимации ставят зачастую противоречивые требования. С одной стороны, технология должна быть эффективной с вычислительной точки зрения, поскольку необходимо проводить множество запусков с разными параметрами за разумное время. С другой стороны, детализация должна быть достаточно высокой, чтобы достичь визуальной реалистичности.

Течение вязкой несжимаемой жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса. Возможным компромиссом между сложностью, реалистичным поведением и контролем над потоком является технология, разрабатываемая в последние десятилетия группами специалистов, занимающихся компьютерной графикой [1–4]. В ее основе лежит проекционный метод [5, 6], используемый для приближенного решения системы уравнений Навье–Стокса. Для работы со свободной поверхностью предлагается использовать два взаимодополняющих подхода: метод частиц и метод функции уровня [7].

Предлагаемая технология включает в себя задание начальной трехмерной сцены, моделирование и реалистичное отображение жидкости. Поскольку положение свободной поверхности оказывает большое влияние на динамику жидкости, а также является важным результатом моделирования, предлагается использовать адаптивные сетки, сгущающиеся к поверхности. Использование гексаэдральных разнесенных сеток, построенных по принципу восьмеричного дерева, позволяет динамически перестраивать сетку, сгущая ее к свободной поверхности в каждый момент времени. Кроме того, такие сетки имеют оптимальное число степеней свободы, что также влияет на численную эффективность предлагаемой технологии.

В данной работе последовательно предлагаются базовые уравнения, описывается алгоритм решения и численные методы, используемые для приближенного решения уравнений, приводятся результаты, иллюстрирующие работу алгоритма.

### Постановка задачи и базовые уравнения

Рассматривается система уравнений Навье–Стокса, описывающая движение несжимаемой жидкости в области  $\Omega$ . Она состоит из уравнений момента и несжимаемости:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $t$  – время,  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  – поле скоростей,  $p$  – давление, а  $\mathbf{f}$  – объемные силы, действующие на жидкость (например, сила тяжести).

Стоит отметить, что граница  $\partial\Omega$  области  $\Omega$ , которую занимает жидкость, состоит из двух частей: неподвижная граница (стенки сосуда) и перемещающаяся по инерции свободная поверхность. На неподвижной границе поле скоростей удовлетворяет условию Дирихле. Оно может быть как однородным (условие прилипания), так и неоднородным (например, втекающий поток). Для свободной поверхности может быть задано соотношение между давлением жидкости и силами поверхностного натяжения.

Для описания положения свободной границы вводятся функция уровня и частицы. Поверхность определяется множеством точек  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3$ , где функция уровня  $\varphi(\mathbf{x}) = 0$ . Для области, заполненной жидкостью, верно  $\varphi(\mathbf{x}) < 0$ , в то время как для воздушной части выполняется  $\varphi(\mathbf{x}) > 0$ . Продвижение свободной поверхности описывается уравнением переноса функции уровня:

$$\varphi_t + \mathbf{u} \cdot \nabla \varphi = 0. \quad (2)$$

В ряде приложений требуется инициализировать функцию уровня как расстояние до поверхности со знаком и поддерживать это свойство на протяжении расчета. Помимо определения положения поверхности, функция уровня также несет в себе информацию о ее геометрии: единичная нормаль к поверхности определяется по формуле  $\mathbf{n} = \nabla \varphi / |\nabla \varphi|$ , а локальная кривизна есть  $k = \nabla \cdot \mathbf{n}$ .

Чтобы отслеживать мелкие элементы, которые не могут быть описаны функцией уровня, используются специальные невесомые частицы, переносимые полем скоростей. Частицы перемещаются с потоком жидкости по закону  $d\mathbf{x}_p / dt = \mathbf{u}(\mathbf{x}_p)$  и несут с собой небольшой объем воздуха или жидкости, благодаря чему могут корректировать функцию уровня в случаях, когда это необходимо.

### Описание алгоритма

Прежде чем начать расчет, необходимо задать первоначальное состояние задачи: границы расчетной области, начальное положение свободной поверхности, поле скоростей в объеме жидкости и на границе. Задание начального состояния и границ возможно как с помощью аналитических функций, так и с помощью поверхностных триангуляций для объектов и начального объема жидкости.

Для приближенного решения уравнений Навье–Стокса (1) с подвижной границей (2) существует несколько подходов разной степени сложности: от метода дробных шагов [3] до полностью неявных схем [8]. В данной работе используется метод дробных шагов как наименее сложный с вычислительной точки зрения. Подробное описание шагов алгоритма можно найти в [9, 10]. Временной шаг метода состоит из следующих подшагов:

1. обновление поля скоростей:
  - решение уравнения моментов (конвективный перенос, действие диффузии и объемных сил);
  - проекция на подпространство бездивергентных скоростей;
2. обновление положения свободной поверхности:
  - продвижение функции уровня;
  - продвижение частиц;
  - взаимная корректировка частиц и функции уровня;
  - реинициализация (восстановление функции уровня как расстояния до поверхности со знаком);
3. продвижение области;
4. перестроение сетки.

Отметим, что первый подшаг представляет собой вариант проекционного метода для задачи Навье–Стокса с фиксированной границей. В качестве таковой выступает свободная поверхность, взятая с предыдущего момента времени. Проекционный метод применяется в два этапа. На шаге-предикторе решается уравнение моментов. Конвективный перенос осуществляется с помощью полу-Лагранжева метода, диффузия и объемные силы накладываются явным образом. Для того чтобы сделать полученное поле скоростей  $\mathbf{u}^\circ$  бездивергентным, вводится коррекция давления, получаемая при решении сеточного уравнения Пуассона, и с ее помощью корректируется поле скоростей:

$$-\nabla \cdot (\nabla \delta p) = -\frac{1}{\Delta t} (\nabla \cdot \mathbf{u}^\circ), \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}^\circ - \Delta t \cdot \nabla \delta p.$$

На втором подшаге алгоритма меняется положение свободной границы. Используя новое положение поверхности, определяется часть расчетной области, заполненная жидкостью, а также зоны, в которых должна сгущаться сетка.

Одной из самых важных частей алгоритма является шаг реинициализации. Напомним, что функция уровня отрицательна внутри жидкости и положительна вне нее. Многие приложения требуют, чтобы, помимо этого, функция уровня являлась расстоянием до свободной поверхности со знаком, поэтому имеет смысл стартовать с такой функции и периодически восстанавливать это свойство. Чтобы восстановить функцию уровня как расстояние до поверхности со знаком, сохранив при этом положение свободной границы, необходимо решить уравнение эйконала:

$$\begin{cases} |\nabla\varphi(\mathbf{x})| = 1, & \mathbf{x} \in \Omega \cup \Omega_{air}, \\ \varphi(\mathbf{x}) = 0, & \mathbf{x} \in \delta\Omega, \end{cases}$$

где  $\Omega_{air}$  – область, заполненная воздухом.

Сначала получается начальное приближение в поверхностных ячейках, для чего строится триангуляция свободной поверхности по методу марширующих кубов (Marching Cubes) [11]. После этого решается уравнение эйконала во всей остальной области при помощи быстро идущего метода (Fast Marching Method) [5].

Для некоторых шагов алгоритма, таких как перенос скоростей, функции уровня и частиц, а также перестроения сетки, написана параллельная версия с использованием технологии OpenMP. Для решения системы, которую дает сеточное уравнение Пуассона на шаге проекции, используется пакет PETSc.

### Результаты

Описанная технология моделирования использовалась при создании всех графических примеров, приведенных в этой работе. На рис. 1 можно видеть процесс заливания стаканом воды. На рис. 1 изображена модель Армадильо (Броненосца). Модель задана при помощи триангуляции (рис. 1, а), состоящей из 346 тыс. треугольников. В качестве начального значения функции уровня (рис. 1, б) задается расстояние до поверхности модели со знаком. После этого в полученный объем жидкости ударяет струя воды (рис. 1, в, г).

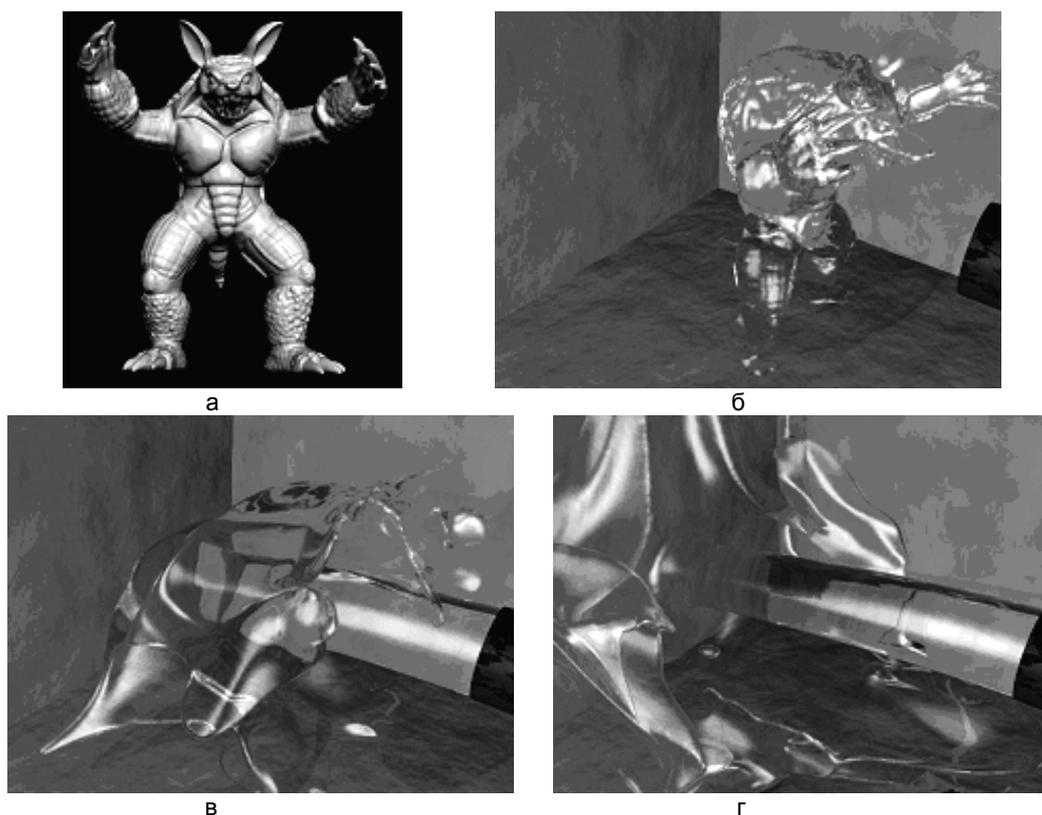


Рис. 1. Модель Армадильо (а), преобразованная в жидкость (б), в которую ударяет струя воды (в, г)

В таблице приведена зависимость числа элементов ( $N$  – общее число расчетных ячеек;  $N_w$  – число ячеек, заполненных водой) и времени работы подшагов алгоритма от шага сетки ( $t_{init}$  – время построения начального положения и инициализации данных;  $t_{total}$  – время одного шага алгоритма;  $t_{adv}$  – перенос скоростей;  $t_{proj}$  – проекция на бездивергентное подпространство скоростей;  $t_{fillair}$  – экстрапо-

ления скоростей с поверхности в воздух;  $t_{ls}$  – перенос функции уровня;  $t_{part}$  – перенос частиц и коррекция функции уровня;  $t_{mesh}$  – перестроение сетки;  $t_{reinit}$  – реинициализация). Видно, что время выполнения одного шага алгоритма пропорционально числу ячеек, заполненных водой, и обратно пропорционально квадрату шага сетки вблизи поверхности. Расчеты проводились на рабочей станции с двумя 4-ядерными процессорами Intel Xeon X5355@2.66ГГц.

$h_{min}$	1/32	1/64	1/128	1/256	1/512
$N(N_w)$ , число элементов	37 409 (1768)	54 377 (7842)	121 101 (36 022)	381 305 (159 211)	1 404 439 (684 521)
$t_{init}$ , с	10,5	13,2	24,2	66,9	237,2
$t_{adv}$ , с	0,18	0,77	3,53	15,74	66,1
$t_{proj}$ , с	0,20	0,60	2,10	8,66	35,9
$t_{fillair}$ , с	0,11	0,35	1,32	5,12	19,9
$t_{ls}$ , с	0,03	0,06	0,23	0,98	3,9
$t_{part}$ , с	0,07	0,24	1,03	4,37	18,4
$t_{reinit}$ , с	0,12	0,26	1,00	4,43	19,9
$t_{mesh}$ , с	0,10	0,21	0,68	2,42	9,6
$t_{total}$ , с	0,81	2,49	9,89	41,72	173,7

Таблица. Зависимость числа элементов и времени работы подшагов алгоритма от шага сетки  $h_{min}$

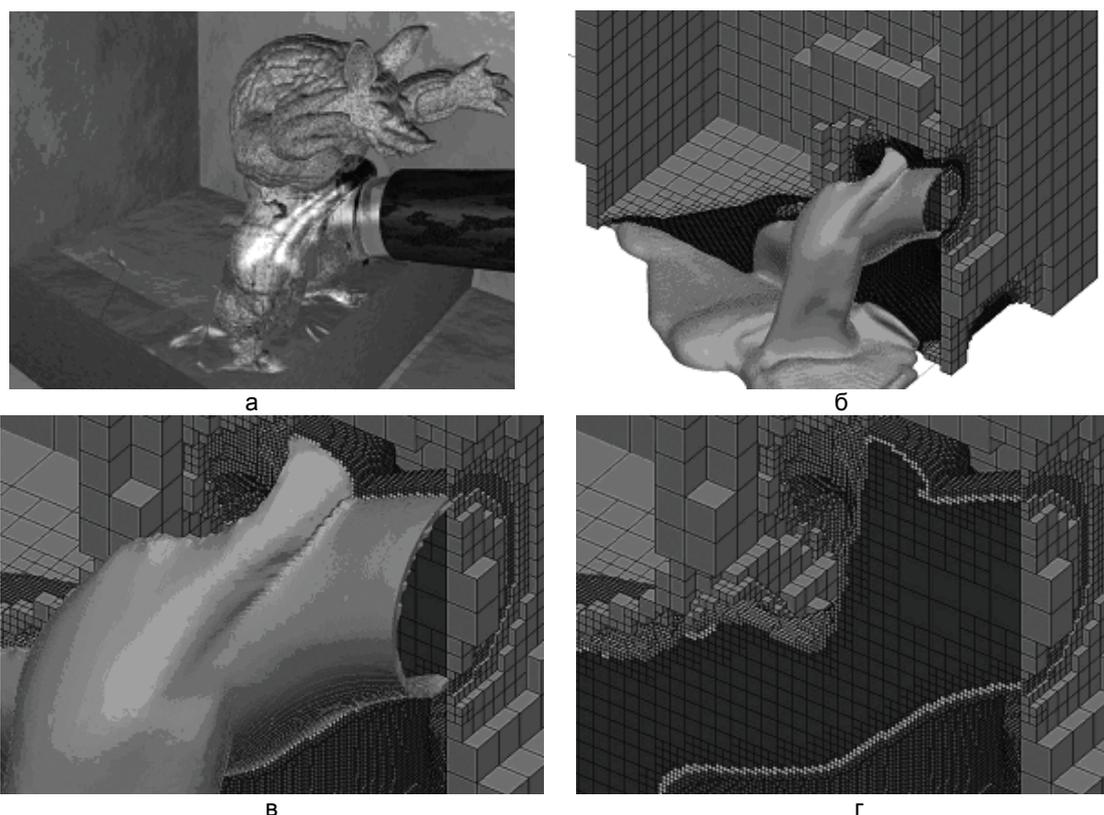


Рис. 2. Модель Армадильо, заданная в качестве неподвижного препятствия и обтекаемая потоком жидкости: итоговое изображение (а) и срезы расчетной сетки с поверхностью (б, в) и без (г)

В примере на рис. 2 используется модель Армадильо из предыдущего примера для задания неподвижных границ расчетной области. Кубическая область с заданным препятствием заполняется потоком воды. Показано итоговое изображение (рис. 2, а) и разрезы расчетной сетки с поверхностью (рис. 2, б, в) и без (рис. 2, г).

### Заключение

В работе предложена эффективная вычислительная технология моделирования трехмерных течений со свободной поверхностью. Благодаря использованию метода дробных шагов и динамически сгущающихся и разгружающихся расчетных сеток удается проводить симуляции за приемлемое время (от нескольких часов до суток). Разработанная технология предлагает удобный инструментарий, который может быть полезен в различных приложениях, начиная от компьютерной графики и заканчивая медициной, например, моделирование течений в кровеносных сосудах.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 08-01-00159-а, 09-01-00115-а, программы Президиума РАН 21П «Фундаментальные науки – медицине» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009–2013 годы.

Автор выражает благодарность К.М. Терехову за помощь в доработке программного кода, а также Ю.В. Василевскому, А.А. Данилову, М.А. Ольшанскому и В.А. Лещинскому за ценные советы и участие в обсуждении спорных моментов и постановки задачи.

### Литература

1. Carlson M. Rigid, Melting, and Flowing Fluid, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2004.
2. Osher S., Fedkiw R. Level Set Methods and Dynamic Implicit Surfaces. – Springer-Verlag, 2002.
3. Osher S. and J.Sethian. Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi equations // Jour. Comp. Phys. – 1988. – V. 79. – P. 12–49.
4. Sethian J.A. Level Set Methods and Fast Marching Methods: Evolving Interfaces in Computational Geometry, Fluid Mechanics, Computer Vision, and Materials Science, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
5. Chorin A. Numerical solution of the Navier-Stokes equations // Math. Comp. – 1968. – V. 22. – P. 745–762.
6. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 1967.
7. Enright D., Fedkiw R., Ferziger J., Mitchell I. A hybrid particle level set method for improved interface capturing // J. Comp. Phys. – 2002. – V.183. – P. 83–116.
8. Gross S., Reichelt V., Reusken A. A Finite Element Based Level Set Method for Two-Phase Incompressible Flows. Computing and Visualization in Science, 2006.
9. Никитин К.Д. Технология расчета течений со свободной границей с использованием динамических гексаэдральных сеток. Численные методы, параллельные вычисления и информационные технологии // Сборник научных трудов / Под ред. Вл.В. Воеводина и Е.Е. Тыртышников. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – С. 183–198.
10. Nikitin K., Vassilevski Yu. Free surface flow modelling on dynamically refined hexahedral meshes // RJNAMM. – 2008. – V. 23. – P. 469–485.
11. Lachaud J.-O. Topologically defined iso-surfaces // DGCI. – 1996. – P. 245–256.

*Никитин Кирилл Дмитриевич* – Институт вычислительной математики РАН, аспирант, nikitink@dubki.ru

УДК 004.622

## МЕТОДЫ МАРКИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

А.Ю. Тропченко, Ван Цзянь

Рассматриваются методы маркирования изображений цифровыми водяными знаками, например, для авторизации продукции мультимедиа. Для совмещения реализованных алгоритмов сжатия изображений на основе вейвлет-преобразования с алгоритмами защиты авторских прав наиболее подходит метод вейвлет-маркирования Ли Хуа. Именно в этом методе цифровая подпись помещается в восприимчиво значимую часть преобразованного изображения, которую рассмотренные алгоритмы сжатия стараются сохранить наиболее полно.

**Ключевые слова:** цифровой водяной знак, маркирование, вейвлет, устойчивость.

### Введение

Проблема защиты авторского права на мультимедиа-информацию привела к необходимости разработки технологии защиты авторского права и технологии защиты от копирования мультимедиа-информации. Одной из таких технологий является цифровое маркирование данных. При этом необходимо создать алгоритмы, которые позволяли бы подписывать или маркировать мультимедиа-данные без потери информативности и качества воспроизведения, однако при этом в любой момент можно было бы определить, кому принадлежат авторские права на тот или иной мультимедиа-продукт. Данные, скрыто встроенные в мультимедиа-продукты, называют цифровым водяным знаком – ЦВЗ [1, 2].

Задача встраивания и выделения сообщений из другой информации решается стегосистемой, которая состоит из следующих основных элементов:

- прекодера – устройства, предназначенного для преобразования скрываемого сообщения к виду, удобному для встраивания в сигнал-контейнер (контейнером называется информационная последовательность, в которой прячется сообщение);
- стегокодера – устройства, предназначенного для осуществления вложения скрытого сообщения в другие данные с учетом их модели;
- стегодетектора – устройства, предназначенного для определения наличия стегосообщения;
- декодера – устройства, восстанавливающего скрытое сообщение.

Цель маркирования заключается в определении в дальнейшем:

- владельца объекта маркирования;
- изменений, произведенных над объектом маркирования;
- легальности прав на использование объекта маркирования.

В работе рассматриваются так называемые прозрачные ЦВЗ, которые обладают следующими свойствами: устойчивостью; невидимостью; криптостойкостью; малой вероятностью ошибки; инвертируемостью; возможностью извлечения ЦВЗ без сравнения с оригиналом; большим числом внедряемых бит; вычислительной эффективностью.

### Методы маркирования в частотной области

В общем виде проблема маркирования изображений рассматривается как проблема передачи слабого сигнала малой мощности ЦВЗ в широкополосном сигнале (изображении) таким образом, чтобы быть визуально невосприимчивым и устойчивым к искажениям, которые могут появиться в процессе передачи информации.

Известно достаточно много методов добавления ЦВЗ. В частотной области изображения ЦВЗ могут формироваться с использованием дискретных косинусных преобразований (DCT), преобразования Фурье (DFT) или вейвлет-преобразования (DWT) [1–3].

Обычно водяной знак ( $W$ ) можно представить как сигнал, который накладывается на изображение через процедуру добавления:

$$W = \begin{cases} w(k) \\ w(k) \in U, \text{ где } k \in W^d, \end{cases}$$

$W^d$  определяет размерность водяного знака:  $d=1, 2, 3$  (как правило,  $d=1$  для аудиосигналов,  $d=2$  для неподвижных изображений,  $d=3$  для видеоданных).

ЦВЗ гораздо меньше изображения, поэтому он многократно добавляется в трансформированные области изображения (степень повторяемости определяет устойчивость ЦВЗ и так называемую силу вложения). Наиболее информативная часть спектра логотипа помещается в восприимчиво значимую часть сигнала, что обеспечивает устойчивость ЦВЗ. Схема маркирования изображений на основе вейвлет-преобразования показана на рис. 1.

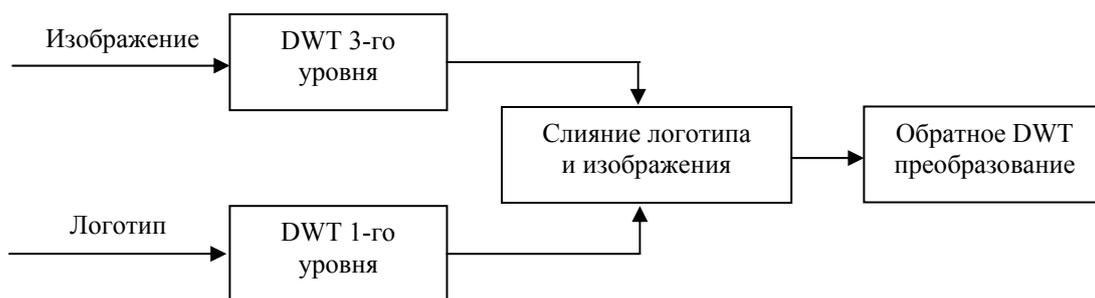


Рис. 1. Схема маркирования изображений на основе вейвлет-преобразования

Процесс маркирования производится в три этапа:

- 1) исходное изображение подвергается вейвлет-преобразованию 3-го уровня, а ЦВЗ-логотип – вейвлет-преобразованию 1-го уровня;
- 2) субполосы разделяются на непересекающиеся блоки, и для каждого из них вычисляется величина вложения, которая представляет собой числовое значение восприимчивости каждого из блоков для определения пригодности блока для встраивания элементов ЦВЗ и производится слияние;
- 3) к изображению применяется обратное вейвлет-преобразование 3-го уровня для получения маркированного изображения.

Алгоритм маркирования Ли Хуа

Данный алгоритм маркирования был предложен в работах [4, 5]. В своей основе ЦВЗ представляет бинарную последовательность, состоящую из нулей и единиц:  $w_i \in \{0,1\}$ . Исходное изображение подвергается  $n$ -уровневому вейвлет-преобразованию для получения низкочастотной составляющей изображения. Именно в низкочастотную часть сигнала, так называемую LL- субполосу, и помещается ЦВЗ.

Процесс добавления цифрового знака можно представить следующим образом (рис. 2). Низкочастотная составляющая сигнала обходится скользящим окном  $3 \times 1$ , тем самым выбирая очередные 3 частотных коэффициента для маркирования. Выбранные коэффициенты  $b_1, b_2, b_3$  сортируются по возрастанию, затем диапазон от  $\min |b_j|$  до  $\max |b_j|, j=1, 2, 3$  разбивается на интервалы длиной  $l$ :

$$l = a \frac{\max |b_i| - \min |b_j|}{2},$$

где  $i, j=1, 2, 3$ ;  $a$  – весовой множитель, задающий устойчивость или силу встраивания ЦВЗ. Затем средний коэффициент тройки квантуется к значению, кратному  $l$ , таким образом, чтобы представить один из отчетов цифрового знака  $w_i$ . При этом интервал разбивается на  $2/a$  подынтервалов, каждый из подынтервалов имеет 2 границы:  $l_k$  и  $l_{k+1}$ . Ассоциируем единичному отчету цифрового знака все нечетные границы, а нулевому отчету цифрового знака – все четные границы подынтервалов. Центральный коэффициент отсортированной тройки модифицируется таким образом, чтобы лежать на границе, соответствующей значению отчета цифрового знака  $w_i$ . И, в заключение, измененный коэффициент заносится на свое место в низкочастотную LL-субполосу изображения.

Извлечение цифрового знака осуществляется без использования оригинала изображения. После сортировки определяется центральный элемент скользящего окна. Он квантуется для получения так называемой точки восстановления, т.е. определяется, на четной или нечетной границе интервала лежит центральный коэффициент. Полученное таким образом значение бита фиксируется как очередной отчет цифрового знака  $w_i$ .

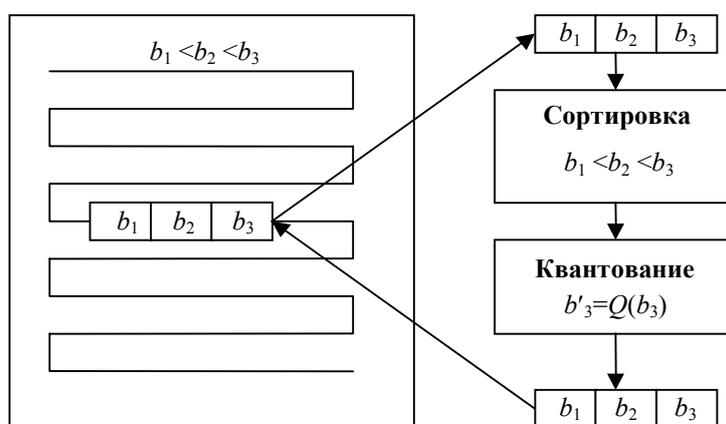


Рис. 2. Схема маркирования по алгоритму Ли Хуа

Заключение

Устойчивость данного метода зависит от числа уровней декомпозиции изображения. Экспериментально авторами было установлено, что достаточно хорошая устойчивость наблюдается при пятиуровневом и двухуровневом вейвлет-преобразовании изображения (рис. 3, 4). Следовательно, для совмещения сжатия изображений на основе вейвлет-преобразования с алгоритмами защиты авторских прав наиболее подходит метод вейвлет-маркирования Ли Хуа, который достаточно эффективен. Именно в этом методе цифровая подпись помещается в восприимчиво значимую часть преобразованного изображения, которую рассмотренные алгоритмы сжатия стараются сохранить наиболее полно. Другие же алгоритмы маркирования помещают цифровую подпись в шумовые составляющие преобразованного изображения. Эти составляющие сжимаются наиболее сильно, что приводит к существенной потере информации в них, так что даже алгоритмы маркирования, извлекающие ЦВЗ на основе статистических расчетов, допускают ошибки в определении цифрового знака.



Рис. 3. Маркированное (а) и разностное изображения (б) с параметрами маркирования:  $a = 0,5; L = 5; N = 80$ , где  $L$  – число уровней декомпозиции,  $N$  – длина цифрового знака



Рис. 4. Маркированное (а) и разностное (б) изображения с параметрами маркирования:  $a = 0,2; L = 2; N = 5380$

Таким образом, алгоритмы маркирования, подобные методу Ли Хуа, скрывающие цифровую подпись в восприимчиво значимой части преобразованного изображения, могут быть адаптированы для применения совместно с алгоритмами сжатия изображений.

### Литература

1. Ruanaidh J.J., Dowling W.J., Boland F.M. Watermarking digital images for copyright protection// IEEE proceeding on Vision, Signal and Image Processing, 1996. – № 8. – P. 250–256.
2. Kobayashi. Digital Watermarking: Historical Roots. IBM Research Reports, Tokyo Research Laboratories, 1997.
3. Voloshynovskiy S., Pereira S., Iquise V., Pun T. Attack Modelling: Towards a Second Generation Watermarking Benchmark // Preprint University of Geneva, 2001. – 58 p.
4. Xie L.H., Arce G.R. A Class of Authentication Digital Watermarks for Secure Multimedia Communication // IEEE Transaction on Image Processing, 2001. – № 10(11). – P. 1754–1764.
5. Xie L.H., Arce G.R. Joint Wavelet Compression and Authentication Watermarking // International Conference on Image Processing (ICIP'98), Oct.4–7, 1998. – V. 2. – P. 427–431.

**Тропченко Александр Ювенальевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, tau@d1.ifmo.ru

**Ван Цзянь** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, wangjian119@sohu.com

УДК 004.02

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МАСШТАБИРУЕМЫХ ПРОГРАММ ЧИСЛЕННЫХ  
РАСЧЕТОВ****К.С. Исупов, В.С. Князьков**

Многие прикладные задачи высокой размерности требуют выполнения высокоточных численных расчетов в базе матричной алгебры над полем больших чисел. Современные мультипроцессорные вычислительные системы, как правило, имеют 32-битную или 64-битную архитектуру, что затрудняет выполнение операций над большими числами и уменьшает эффективность их использования. В результате работы над проблемой предложен новый метод выполнения вычислений, основанный на использовании в качестве базиса для выполнения численных расчетов системы счисления с параллельной архитектурой – системы остаточных классов. На основании предложенного метода разрабатывается инструментальный комплекс.

**Ключевые слова:** программный комплекс, параллельные масштабируемые расчеты, система остаточных классов, большие числа, MPI, OpenMP, технологии параллельного программирования, параллельные программы.

**Введение**

Используемые в современных САД-системах математические методы и их алгоритмически-программные решения разрабатывались для вычислительных систем (ВС) с ограниченным количеством вычислительных модулей. Адаптация применяемых сегодня методов, алгоритмов и их программных реализаций для решения прикладных задач даже на 1000-ядерные ВС является весьма сложной и, в ряде случаев, невыполнимой задачей. В связи с этим эффективность использования ресурсов современных многопроцессорных многоядерных ВС крайне мала, а ряд современных прикладных задач высокой размерности и высокой вычислительной сложности вообще невозможно решить из-за отсутствия скоростных методов масштабируемых вычислений, либо задача решается неприемлемо длительное время.

Один из примеров таких задач – определение корней плохо обусловленных СЛАУ. Если коэффициенты двух или нескольких уравнений СЛАУ близки, то при малых возмущениях в матрице коэффициентов  $A$  или векторе правых частей  $B$  произойдут большие изменения в векторе неизвестных  $X=A^{-1} \times B$ . Это означает, что численный метод будет неустойчив и, следовательно, резко повысится вероятность получения ответа, содержащего большую погрешность. Например, при решении плохо обусловленных СЛАУ 9-го и 13-го порядков методами популярного пакета Mathcad 12 погрешности определения корней составляют  $3 \times 10^{-4}$  и  $7 \times 10^{-2}$  соответственно. Далее, с увеличением порядка СЛАУ, погрешность возрастает экспоненциально.

**Постановка задачи**

В результате возникает необходимость создания высокоскоростных, глубоко масштабируемых (обеспечивающих увеличение ускорения не только при росте числа процессоров, но и при росте числа ядер каждого процессора, с сохранением постоянного уровня эффективности использования процессоров) численных методов, алгоритмов и их программных реализаций для выполнения высокоточных численных расчетов по отношению к массивам данных большой размерности, с учетом особенностей и требований современных задач. Основным подклассом таких задач являются высокоточные численные расчеты в базе матричной алгебры.

Наиболее важным здесь является требование максимально быстрого выполнения операций над числами, выходящими за пределы типового компьютерного диапазона. Данные числа также принято называть большими числами. Как правило, процессоры оптимизированы для операций с 32-битными или 64-битными операндами, все подсистемы ввода/вывода также имеют такую разрядность, поэтому производительность типовых ВС при работе с большими числами катастрофически падает.

**Основной результат**

Одним из перспективных и многообещающих направлений в исследованиях по данной проблеме является внедрение методов вычислений на основе нетрадиционных способов кодирования и соответствующих им вариантов машинной арифметики. Особую роль в развитии указанного направления играют числовые системы с параллельной структурой и, в первую очередь, модулярные системы счисления, в которых целые числа представляются полиномами из остатков от деления на выбранные основания. Одной из самых известных таких систем является система остаточных классов (СОК). Здесь, в отличие от обобщенной позиционной системы счисления (ПСС), образование цифры каждого разряда проводится независимо друг от друга. Цифра  $i$ -го разряда определяется согласно выражению

$$a_i = N - \left\lfloor \frac{N}{P_i} \right\rfloor \cdot P_i, \quad (1)$$

где  $i = 1, 2, \dots, R$ ;  $N$  – число, представленное в позиционной системе счисления;  $R$  – число оснований  $P_i$  (мощность системы оснований).

Иначе говоря, каждый разряд в системе остаточных классов представляет собой наименьший неотрицательный остаток от деления на соответствующее основание самого числа, а не предыдущего частного, как это имеет место в позиционной системе [1].

Если же касаться задач матричной алгебры, то здесь каждый массив, представленный в ПСС, в СОК будет представляться множеством независимых друг от друга массивов, элементы которых определяются по формуле (1). Очевидно, что мощность данного множества совпадает с числом оснований СОК.

Если в качестве оснований СОК выбрать числа, не выходящие за пределы разрядной сетки ВС, то и вычеты, взятые по этим основаниям, не будут выходить за пределы разрядной сетки. Тем самым выполнение операций над большими числами не будет отличаться от выполнения операций над числами, не выходящими за пределы разрядной сетки ВС. Это дает следующие фундаментальные преимущества при решении высокоточных задач большой размерности на многопроцессорных ВС петафлопного уровня:

- возможность более низкоуровневого распараллеливания вычислений;
- увеличение скорости выполнения операций над большими числами;
- снижение доли последовательных участков в программе.

Применительно к задачам матричной алгебры следует выделить и четко разделить два вида параллелизма, реализуемые при выполнении расчетов на мультипроцессорной ВС над числовыми данными, представленными в СОК – параллелизм на уровне элементов данных и параллелизм на уровне разрядов чисел. Реализация параллелизма на уровне элементов данных сильно зависит от выбранного алгоритма выполнения расчетов. Для эффективной реализации параллелизма на уровне разрядов чисел необходимо выбрать оптимальную мощность системы оснований СОК, учитывая при этом особенности архитектуры современных мультипроцессорных ВС. Мощность системы оснований – число оснований СОК, входящих в ее состав.

Во избежание излишних межпроцессорных взаимодействий, возникающих при сборе вычетов полиномиального числа с различных вычислительных модулей для их последующего преобразования в позиционную систему, необходимо выполнять вычисления над всеми вычетами в одном модуле. Поэтому целесообразным является использование системы оснований СОК с мощностью, равной числу ядер каждого вычислительного узла (ВУ) системы.

При использовании системы оснований с мощностью, меньшей чем число ядер каждого вычислительного узла, диапазон представления чисел сокращается, а следовательно, для достижения требуемого диапазона необходимо выбирать основания большей разрядности, что требует более высоких затрат на обработку вычетов, взятых по этим основаниям.

При использовании числа оснований, превышающего число ядер каждого ВУ, возникают накладные расходы на обработку вычетов, взятых по дополнительным основаниям. В результате этого загрузка ядер каждого процессора в ВУ будет распределена неравномерно, так как потоки, обрабатывающие дополнительные вычеты, будут выполняться на ядрах после завершения всех основных потоков, в результате чего часть ядер будет простаивать, ожидая завершения работы остальных.

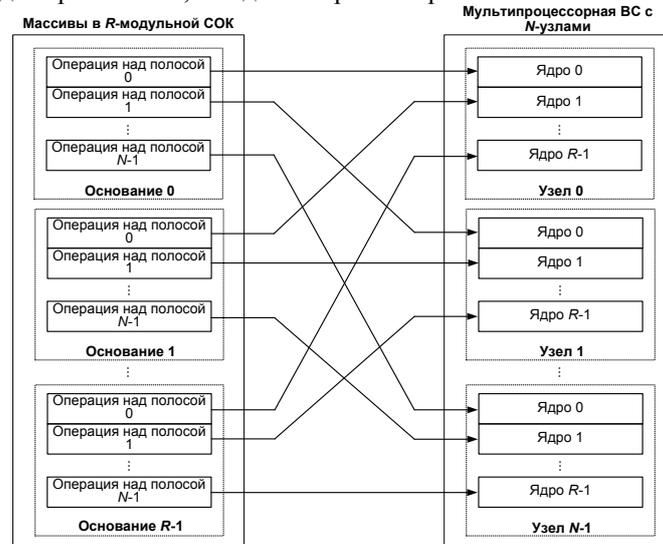


Рис. 1. Схема распределения задач по вычислительным узлам

Схема распределения задач по вычислительным узлам, необходимая для выполнения численных расчетов матричной алгебры в  $R$ -модульной системе остаточных классов на мультипроцессорной системе с кластерной архитектурой, в состав которой входит  $N$  узлов, представлена на рис. 1. Подразумевается, что каждый узел в данной системе содержит один  $R$ -ядерный процессор, а к массивам данных применена схема горизонтального ленточного разбиения.

Используя СОК с числом оснований, равным числу ядер каждого ВУ системы, каждое ядро будет производить работу с фрагментами массивов данных только по соответствующему ему основанию. Таким образом, ядра всех процессоров отдельно взятого вычислительного узла в каждый момент времени будут выполнять одни и те же операции над различными данными, что позволит более равномерно распределить их загрузку, а также избавиться от конфликтов по доступу к разделяемым данным.

На основании предложенного подхода разрабатывается инструментальный комплекс для проектирования параллельных масштабируемых программ численных расчетов в базисах матричной алгебры и системы остаточных классов. Структурная схема инструментального комплекса представлена на рис. 2.

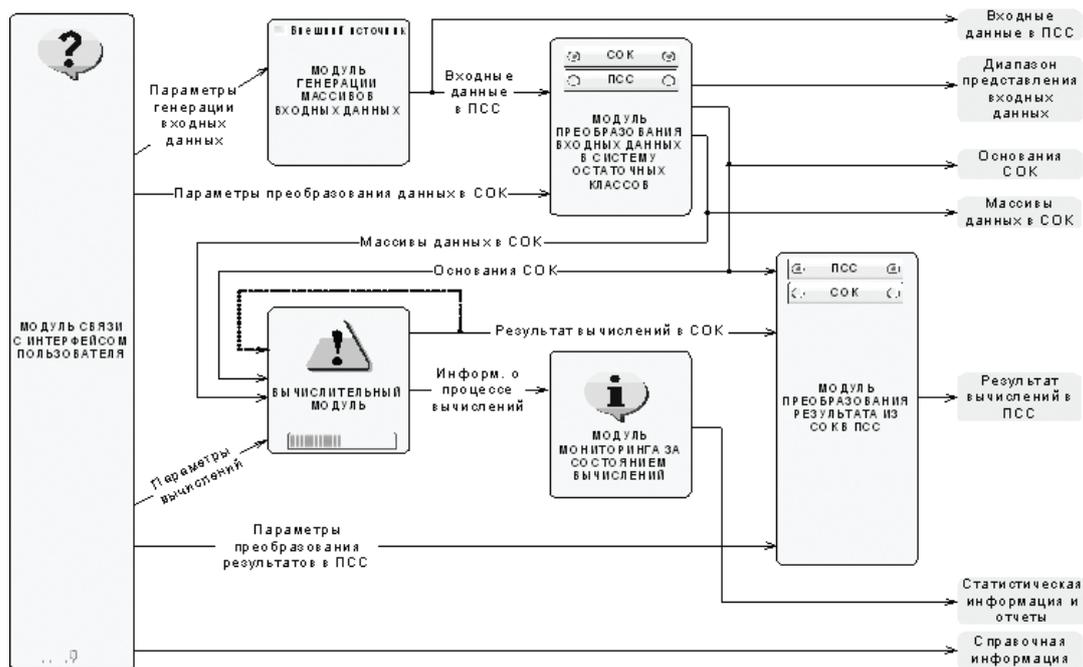


Рис. 2. Структурная схема инструментального комплекса

Ядром комплекса является вычислительный модуль, который производит масштабирование вычислений и выполнение одного из численных расчетов согласно заданному алгоритму и входным параметрам. Все вычисления производятся в СОК по выбранным основаниям. Результаты расчета передаются другим исполнительным модулям комплекса для их последующего преобразования.

При создании вычислительного модуля были использованы две технологии параллельного программирования: MPI – для реализации параллелизма на уровне элементов данных; OpenMP – для реализации параллелизма на уровне разрядов чисел, обеспечиваемого выполнением вычислений в системе остаточных классов.

Особенностью комплекса является обособленность исполнительных модулей от пользовательского интерфейса, что позволяет выполнять их в виде динамических библиотек и встраивать в современные промышленные математические системы и специализированные программные комплексы. Следует отметить, что интерфейс комплекса позволяет формировать XML-файлы заданий для программного продукта HPC Cluster Manager.

Основные возможности, предоставляемые пользователю:

- выбор операции и метода численного расчета;
- настройка оснований СОК на работу с числами из заданного диапазона;
- настройка комплекса на конфигурацию конкретной ВС;
- изменение диапазона представления входных данных;
- загрузка массивов входных данных из внешних источников;
- варьирование размерности массивов данных вплоть до  $10^6$ ;

- использование результатов  $i$ -ой операции в качестве входных данных  $(i+1)$ -ой без останова вычислений.

Пользователю предоставляется один из следующих способов задания оснований:

- автоматическое задание оснований из поля чисел Мерсенна ( $2^N - 1$ );
- автоматическое задание оснований из поля чисел Фибоначчи;
- ручной ввод оснований с последующей проверкой их на взаимную простоту.

В комплекс включены подпрограммы, обеспечивающие выполнение 20 операций матричной алгебры. В настоящий момент разрабатываются эффективные методы решения плохо обусловленных СЛАУ. Выполнение вычислений в СОК позволяет эффективно использовать ресурсы современных мультипроцессорных ВС с кластерной архитектурой и корректно решать проблему больших чисел.

Комплекс предназначен для работы с числами как небольших, так и больших компьютерных диапазонов. В рассмотренной задаче решения плохо обусловленных СЛАУ требуемый диапазон представления чисел зависит от размерности матрицы коэффициентов: чем больше размерность матрицы, тем большая разрядность требуется для хранения ее нижних строк с заданной точностью. Поэтому предполагается, что комплекс будет производить обработку как стандартных чисел, не выходящих за пределы разрядной сетки ЭВМ, так и чисел, значительно превышающих ее.

В настоящий момент предложенные методы позволяют работать с целыми числами в формате с фиксированной запятой. Так как высокоточные вычисления, не ограничивающиеся полем целых чисел, крайне важны, в настоящее время наиболее приоритетной является задача адаптации предложенных методов и алгоритмов для работы с вещественными числами.

Традиционно недостатками СОК считается сложность реализации процедуры сравнения чисел, представленных в этой системе. В комплекс включен модифицированный алгоритм сравнения, основанный на работе [2], позволяющий выполнять на ПК (Intel Celeron(R) M CPU 1,46GHz с 1,37 Гб) за одну секунду 29 000 полиномиальных операций сравнения.

### Экспериментальная апробация

В качестве матричной операции для экспериментов была выбрана операция сложения двумерных массивов. Запуски производились на четырех SMP-модулях, включающих два четырехъядерных процессора Intel Xeon под управлением ОС Windows 2008 CCS. Исходные массивы разбивались на одинаковое количество горизонтальных полос, обрабатываемых параллельно, т.е. вычислительный алгоритм подразумевает параллелизм на уровне элементов данных.

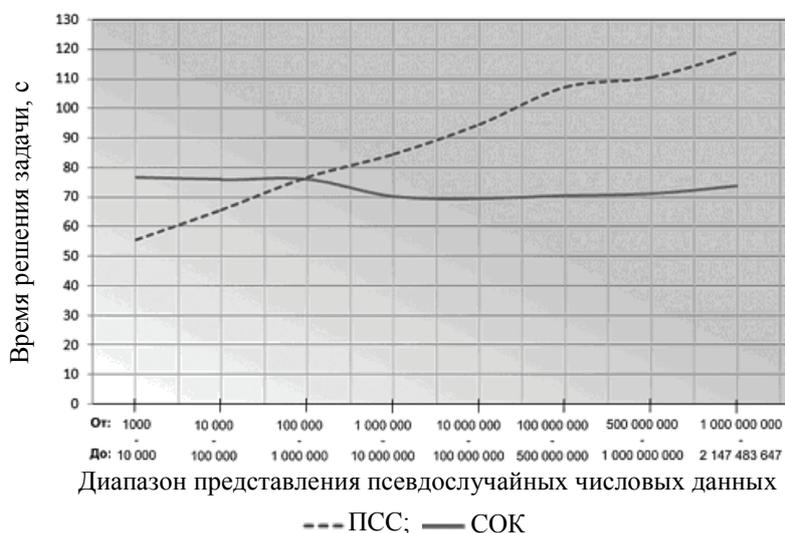


Рис. 3. Зависимость времени решения задачи от разрядности числовых данных

На рис. 3 показана зависимость времени решения задачи сложения двумерных массивов размером  $16000 \times 32000$  от разрядности чисел. В качестве оснований СОК были выбраны взаимно простые числа 2047, 511, 255 и 127. При данных основаниях позиционную систему выгоднее использовать только для работы с шести- и менее разрядными числовыми данными. При работе с девятиразрядными числами ускорение решения задачи составляет 1,7 раза.

Очевидно, что при выборе других оснований СОК данная зависимость будет выглядеть иначе: при выборе оснований СОК, произведение которых приближается к требуемому пределу диапазона пред-

ставления чисел, время решения задачи существенно сокращается по сравнению с выбором оснований большей разрядности, что было доказано соответствующими экспериментами.

Так, с применением тонкой настройки системы оснований СОК вокруг требуемого предела диапазона представления чисел, уже при работе с шестизрядными числами удалось ускорить решение задачи в 1,23 раза относительно позиционной системы, тогда как без настройки системы оснований при прочих равных условиях (рис. 3) ускорение решения задачи отсутствует.

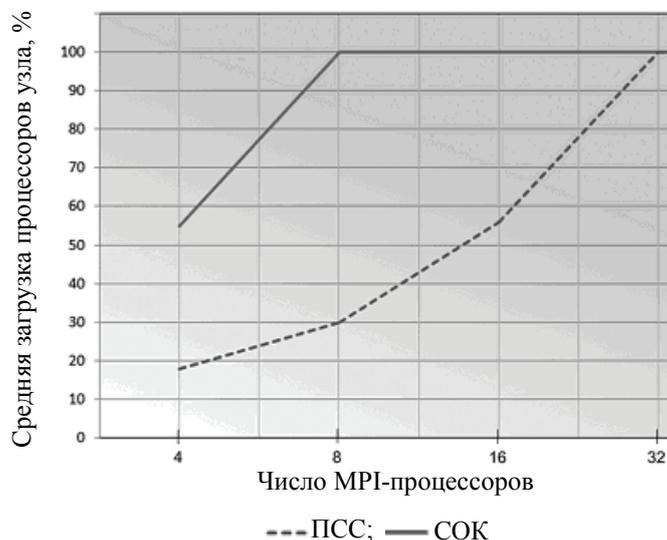


Рис. 4. Зависимость средней загрузки процессоров узла от числа MPI-процессов

На рис. 4 показана зависимость средней загрузки процессоров от количества запущенных MPI-процессов. При использовании в качестве базиса для вычислений четырехмодульной СОК полная эффективная загрузка всех восьми процессоров наблюдается уже при запуске восьми MPI-процессов, тогда как при использовании ПСС добиться полной загрузки удается лишь при запуске 32 и более MPI-процессов.

#### Заключение

В результате проделанной работы был предложен новый подход к решению проблемы выполнения численных расчетов в базе матричной алгебры над полем больших чисел, обеспечивающий эффективную загрузку не только всех процессоров, но и всех ядер вычислительных узлов мультипроцессорной ВС. На основании данного подхода разрабатывается инструментальный комплекс. В конечном итоге инструментальный комплекс предполагается использовать как для решения задач определения корней плохо обусловленных СЛАУ и обращения матриц Гильберта, так и для выполнения наиболее трудоемких матричных операций, таких как умножение матриц и нахождение определителя.

Наиболее приоритетным направлением дальнейших исследований является адаптация разработанных методов для работы с вещественными числами.

#### Литература

1. Акушский И.Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И.Я. Акушский, Д.И. Юдицкий. – М.: Сов. радио, 1968. – 440 с.
2. Факторович М.Г., Полиский Ю.Д. Устройство для сравнения чисел, выраженных в системе остаточных классов. Авт. свид. СССР №608155 М. Кл2 G 06 F 7/04, 1978.

*Исунов Константин Сергеевич*  
*Князьков Владимир Сергеевич*

- Вятский государственный университет, студент, slaer\_87@hotmail.com
- Вятский государственный университет, доктор технических наук, профессор, kniazkov@list.ru

УДК 004.4'242

## ВАЛИДАЦИЯ АВТОМАТОВ С ПЕРЕМЕННЫМИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯЗЫКАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Я.М. Малаховски, Г.А. Корнеев

Описан предметно-ориентированный язык программирования (eDSL), встроенный в язык программирования Haskell и предназначенный для создания автоматных программ. Предложенный язык поддерживает повторное использование кода и валидацию функций переходов автоматов до их первого использования в программе. В рамках eDSL также разработано представление для логических формул над произвольными множествами переменных, не ограничивающее пользователя в выборе фиксированного логического базиса.

**Ключевые слова:** конечные автоматы, функциональное программирование, Haskell.

### Введение

В настоящее время функциональное программирование [1] предоставляет множество возможностей для созданий вспомогательных конструкций, таких как продолжения (continuations), монады (monads) и стрелки (arrows), реализующих различные стили программирования. Перечисленные структуры имеют не только теоретическую, но и практическую значимость, предоставляя удобный «синтаксический сахар» для реализации некоторых классов программ.

В последние годы широкое распространение получили предметно-ориентированные языки программирования (Domain-Specific Language, DSL), предназначенные для разработки программ в четко определенных предметных областях с использованием терминов предметной области. DSL, основанные на синтаксисе и возможностях нижележащего языка, принято называть встроенными предметно-ориентированными языками программирования (embedded DSL, eDSL).

В работе [2] был предложен подход к реализации событийных конечных автоматов [3] на функциональных языках программирования. При этом для валидации функций переходов на полноту и непротиворечивость использовались свойства алгебраических типов данных и компилятора языка Haskell [4].

В настоящей работе рассматривается обобщение метода, предложенного в работе [2], на структурные автоматы, и eDSL, его реализующий. При этом в качестве пометок на переходах автомата указываются не одиночные события, а комбинации входных переменных.

Возможность описания структурных автоматов, а также их автоматическая валидация являются ключевыми требованиями при разработке ответственных систем. Однако у большинства распространенных языков функционального программирования системы типов недостаточно выразительны для осуществления валидации функций переходов структурных автоматов. Это связано с тем, что большинство систем типов таких языков программирования сохраняют возможность реконструкции типовых аннотаций в программе и не являются Тьюринг-полными.

eDSL, предлагаемый в настоящей работе, осуществляет валидацию не при помощи системы типов, а во время исполнения программы, однако при этом гарантируется, что функции переходов, не прошедшие валидацию, не могут использоваться в программе.

### Постановка задачи

Поскольку в структурных конечных автоматах переходы диаграммы состояний помечаются логическими выражениями, то для реализации автоматного eDSL требуются:

- синтаксическое представление для логических формул на дугах графов переходов;
- валидатор логических формул;
- синтаксическое представление для дуг и состояний автоматов.

Также при разработке синтаксиса учитывается требование о предоставлении пользователю возможности повторного использования частей автоматов. В связи с этим разработанный синтаксис подразумевает раздельное определение состояний с последующим конструированием автоматов из отдельных частей.

### Логические выражения

Для конструирования логических выражений требуется выбрать способ представления множества логических переменных. Для этих целей может использоваться произвольное множество элементов (например, натуральные числа), однако, как показано в работе [2], использование алгебраических типов данных является более предпочтительным, поскольку они позволяют производить большее число проверок на этапе компиляции.

Кроме того, для записи логических формул над каким-то множеством переменных необходимо выбрать логический базис. Поскольку выражения, построенные в этом логическом базисе, будут использоваться во время исполнения программы, этот базис также следует представить алгебраическим типом данных, параметризованным типом данных переменных формулы (листинг 1).

**Листинг 1. Логический базис**

```
data Logic v = Variable v      -- Вхождение переменной
             | Always          -- Тавтология
             | Never           -- Невыполнимая формула
             | Not (Logic v)   -- Отрицание
             | And [Logic v]   -- Конъюнкция
             | Or [Logic v]    -- Дизъюнкция
```

Пример применения предложенного логического базиса приведен на листинге 2.

**Листинг 2. Пример использования логического базиса**

```
data Var = X1 | X2
f = Or [And [Variable X1, Variable X2], X2]
```

Интерпретатор таких формул, принимающий на вход отображение из имен переменных в их логические значения и возвращающий результат вычисления формулы, реализуется очевидным образом.

**Валидация**

В процессе валидации автомата проверяется, что из каждого состояния при любых значениях переменных будет произведен переход ровно по одной дуге диаграммы (свойство полноты и непротиворечивости).

В терминах логических формул это свойство означает, что для каждого состояния:

- не существует пары таких дуг, конъюнкция логических формул которых выполнима;
- дизъюнкция логических формул всех дуг является тавтологией.

Также обычно проверяется, что в автомате нет дуг, переходов по которым никогда не может произойти (логическая формула на дуге невыполнима).

Поскольку каждое рассматриваемое свойство автомата представимо в виде логической формулы, то его проверка может быть сведена к поиску контрпримера при помощи исчисления секвенций [5].

Особенности eDSL, предлагаемого в настоящей работе, позволяют исключить возможность использования некорректных функций переходов во время исполнения программы и делают процесс валидации прозрачным для пользователя.

**Синтаксис**

Заметим, что выражения, записанные в форме, представленной на листинге 2, весьма неудобны в использовании, поскольку обычно для логических формул используются более компактные методы записи. Поэтому синтаксис для логических формул реализован при помощи инфиксных оберток над алгебраическим типом данных из листинга 1.

Синтаксис для определения дуг и состояний реализован при помощи функций `-->`, `./` и `state`. На листинге 3 представлен пример реализации автомата при помощи разработанного eDSL.

**Листинг 3. Пример реализации автомата**

```
data States = FirstState | SecondState deriving Show
data Output = Out1 | Out2 deriving Show
data X = X1 | X2 | X3 deriving (Show, Eq)

state1 = state FirstState [
  X1 &.& not' X2 --> state1 ./ Out2,
  X2 --> state1 ./ Out1,
  Star --> state1]

gotEvent = auto2Acc $ mkSimple [state1]
main = print $ foldl gotEvent FirstState [[X1], [X1, X2]]
```

В приведенном листинге при помощи функций `-->` и `/./` конструируется дуга графа переходов, функция `state` валидирует и конструирует состояние из набора дуг, а функция `mkSimple` конструирует функцию переходов автомата из набора состояний.

Следует отметить, что слева от `-->` могут располагаться как переменные, так и логические формулы. Кроме того, полезно ввести специальное выражение `Star`, обозначающее дугу, переход по которой производится только в том случае, если не выполнены логические выражения на всех остальных дугах (листинг 3). Поскольку типы всех этих выражений различны, то в функции `-->` используется преобразование первого аргумента при помощи класса типов с функцией `elift` (листинг 4), которая «поднимает» все возможные виды выражений до типа, содержащего и логические формулы, и `Star`.

#### Листинг 4. «Подъем» выражений

```
data ELifted v = Star | NoStar (Logic v)

class ELiftable v a | v -> a where
  elift :: v -> ELifted a
instance ELiftable (ELifted v) v where
  elift = id
```

### Быстрые логические функции

В связи с тем, что некоторые логические функции (такие как «голосование») могут иметь большой размер, будучи выраженными в логическом базисе «и, или, не», их вычисление может занимать существенную часть времени работы функции переходов. Ускорить вычисление выражений на дугах можно двумя методами:

- упрощением логических формул в процессе конструирования автоматов;
- предоставлением пользователю возможности использовать в логических выражениях произвольные логические функции языка Haskell.

Для получения результата вычисления выражения во втором методе не требуется интерпретации представления логического выражения, что ведет к уменьшению времени работы программы. Кроме того, функции языка Haskell не ограничены каким-то фиксированным базисом, а потому их метод вычисления результата может быть ближе к оптимальному, чем у любой функции, выраженной в фиксированном логическом базисе.

Рассуждая подобным образом, можно прийти к заключению, что фиксированный базис для представления логических выражений требуется только для работы валидатора. В связи с этим существует возможность применить оба метода ускорения вычислений одновременно:

- упрощать логические формулы следует перед передачей выражения валидатору;
- преобразование из логических функций языка Haskell следует производить в пару из логического выражения в базисе валидатора и функции, вычисляющей результат по значениям входных переменных.

Это позволяет освободить пользователя от необходимости придерживаться какого-то фиксированного базиса, а также ускоряет процессы валидации и вычисления функций переходов.

Полный исходный код валидатора и всех вспомогательных функций в данной статье не приводится из-за его большого объема, пример преобразования логических функций языка Haskell в функции для работы с логическими выражениями представлен в листинге 5.

#### Листинг 5. «Подъем» функций

```
not' = lift1 not
infix 8 &.&
(&.&) = lift2 (&&)
infix 7 |.|
(|.|) = lift2 (||)
```

Функции `lift1` и `lift2` производят описанное выше преобразование над одно- и двухаргументными логическими функциями языка Haskell.

### Повторное использование кода

Предлагаемые методы подразумевают активное повторное использование состояний и дуг графов переходов при конструировании различных автоматов, однако описанные ранее функции эту возможность ограничивают, поскольку все части автомата должны использовать один и тот же тип входных переменных и выходных воздействий.

Метод, дающий пользователю возможность собирать автоматы из состояний, работающих с различными типами переменных, заключается в приписывании специальной функции, производящей отображения множества переменных собираемого автомата во множество переменных конкретного состояния, каждому такому состоянию. Пример использования такой функции приведен в листинге 6.

**Листинг 6. Переименование переменных автомата**

```
-- Этот код следует трактовать как продолжение листинга 3,
-- переопределяющее некоторые функции
data XX = XX1 | XX2 deriving (Show, Eq)

state2 = state SecondState $ [
  XX1 |.| not' XX2 --> state2 ./ Out2,
  Star --> state1]

x2xx X1 = XX1
x2xx X2 = XX2
x2xx X3 = XX2

gotEvent = auto2Acc $ mkSimple [state1, chVars x2xx state2]
main = print $ foldl gotEvent SecondState [[X1], [X1, X2]]
```

Однако теперь оказывается, что функция `state` не может возвращать прошедшее валидацию состояние, поскольку функция `chVars` должна изменить переменные внутри всех логических выражений на дугах, а валидацию нужно будет производить уже после этого преобразования. Кроме того, если одно и то же состояние используется в нескольких автоматах, то оно будет валидироваться повторно для каждого автомата. Чтобы этого избежать, докажем следующую теорему.

**Теорема (о корректной замене переменных).** Любое отображение множества переменных состояния в логические выражения над произвольным множеством переменных (в том числе и над первоначальным множеством переменных состояния) не нарушает свойств, проверяемых валидацией. ■

**Доказательство.** Свойство полноты требует, чтобы дизъюнкция всех формул на дугах являлась тавтологией. Свойство непротиворечивости требует, чтобы все попарные конъюнкции не были выполнены, т.е. чтобы отрицание дизъюнкции попарных конъюнкций всех формул было тавтологией.

Рассмотрим тавтологию, представляющую интересующее нас свойство. Произведем над ней следующее изоморфное преобразование: поместим формулу в тело лямбда-абстракции, а каждую логическую переменную в формуле заменим на переменную, связанную этой абстракцией. При подстановке первоначальной переменной на место соответствующей связанной переменной будет получена первоначальная формула.

С другой стороны, можно заметить, что в теле лямбда-абстракции находится тавтология, а потому, по определению, ее можно заменить на константу «истина».

Теперь, при подстановке вместо переменных лямбда-абстракции произвольных логических комбинаций переменных из какого-то множества, результатом будет являться «истина». □

Эту теорему также можно доказать при помощи структурной индукции по размеру подставляемых вместо переменных выражений, используя тот факт, что исчисление секвенций доказывает, что формула является тавтологией, тогда и только тогда, когда в конце работы алгоритма в правом и левом столбце множества переменных пересекаются [5].

**Следствие (о переименовании переменных).** Любая замена всех переменных, используемых в логических выражениях, надписанных над дугами состояния, на другие переменные (возможно даже, сливая различные переменные в одну) не нарушает свойств, проверяемых валидацией. ■

**Доказательство.** Данное свойство является частным случаем доказанной ранее теоремы, поскольку одинарные переменные являются частным логических выражений над множеством переменных. □

Реализация предлагаемого в настоящей работе eDSL использует доказанный факт следующим образом: функция `state` возвращает прошедшее валидацию состояние, а функция `chVars` производит отображение переменных, не затрагивая внутренней структуры самого состояния. Таким образом, повторное использование состояния не вызывает повторной валидации.

Для предоставления еще больших возможностей использования уже написанного кода функцию, аналогичную `chVars`, можно реализовать также и для выходных воздействий автоматов, а определяемые состояния сделать параметризуемыми шаблонами. Таким образом, получаемые части автоматов будут вообще избавлены от элементов конкретных типов данных в своих описаниях.

### Заключение

- В настоящей работе был разработан автоматный eDSL для языка Haskell:
- производящий валидацию функций переходов до их первого запуска;
  - гарантирующий невозможность использования функций переходов, не прошедших валидацию;
  - не ограничивающий пользователя в выборе логического базиса.
- Также разработан метод конструирования пар «выражение и вычислитель», применимый не только для формул на дугах конечных автоматов.
- Доказано свойство о возможности переименования переменных в логических выражениях, написанных над дугами в графах переходов. С учетом этого свойства в разработанный eDSL были добавлены средства, поддерживающие активное повторное использование уже реализованных автоматов и их частей без выполнения повторных валидаций.

### Литература

1. Абельсон Х., Сассман Д. Структура и интерпретация компьютерных программ. – М.: Добросвет, 2006. – С. 608.
2. Малаховски Я.М., Шалыто А.А. Конечные автоматы в чистых функциональных языках программирования. Автоматы и Haskell // RSDN Magazine. – 2009. – № 3. – С. 20–26.
3. Полицарпова Н.И., Шалыто А.А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2009. – 176 с.
4. Худак П., Петерсон Дж., Фасел Дж. Мягкое введение в Haskell // RSDN Magazine. – 2006. – № 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://rsdn.ru/article/haskell/haskell\\_part1.xml](http://rsdn.ru/article/haskell/haskell_part1.xml), свободный: 2007. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://rsdn.ru/article/haskell/haskell\\_part2.xml](http://rsdn.ru/article/haskell/haskell_part2.xml), свободный.
5. Верещагин Н.К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 2. Языки и исчисления. – М.: МЦНМО, 2002. – 288 с.

- Малаховски Ян Михайлович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [trojan@rain.ifmo.ru](mailto:trojan@rain.ifmo.ru)
- Корнеев Георгий Александрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, [kgeorgiy@rain.ifmo.ru](mailto:kgeorgiy@rain.ifmo.ru)

УДК 004.4'22

## СИСТЕМА ПОРОЖДЕНИЯ ДОКУМЕНТОВ В ФОРМАТАХ HTML, МНТ И WordProcessingML

Д.В. Деев, Ю.С. Окуловский

Рассмотрена проблема автоматической генерации документов и приложений, производящих эти документы. Приведено общее описание языка разметки Thorn, разработанного специально для задач порождающего программирования. Изложено использование языка Thorn для упрощения набора HTML и МНТ документов. Изложены основные проблемы создания документов в формате WordProcessingML и методы их решения с помощью Thorn. Приведена технология порождения по документу исходного кода программы, создающей этот документ.

**Ключевые слова:** порождающее программирование, шаблоны документов.

### Введение

В работе рассматривается проблема порождения документов. Данная проблема актуальна для большинства приложений, из которых необходимо получать данные в печатном виде. Реализация печати в рамках приложений является трудоемкой и часто не оправдывает себя. Вместо этого предлагается экспорт документов в формате, поддерживаемом текстовыми процессорами, с последующим открытием в текстовом процессоре, возможной ручной правкой и печатью. Существующие решения в этой области часто разрабатываются производителями программного обеспечения самостоятельно либо интегрированы в состав программных пакетов (например, 1С). Необходима разработка кросс-платформенной системы, не привязанной к конкретной операционной системе (ОС) или программному пакету.

Предлагается решение, основывающееся на языке Thorn и системе Thornado. Thorn – это новый язык разметки, который воплощает в себе новый подход к преобразованию текстовых документов, комбинируя идеологии языков разметки и скриптовых языков. Документ Thorn состоит из команд, каждая команда ассоциирована с программой на скриптовом языке (например, Perl). Thorn осуществляет разбор документа, получает всю информацию из входного документа, которая касается данной команды, запускает программу на скриптовом языке и передает ей эту информацию. Выходное значение программы интерпретируется как результат выполнения команды и подставляется в документ вместо команды. Об-

мен информацией между командами осуществляется через глобальные переменные [1, 2]. Thornado – это набор инструментов кодогенерации на языке Thorn, одной из главных областей применения которой является генерация бизнес-приложений. В рамках этой системы разработаны кодогенераторы подсистем ввода и хранения данных, подсистемы вывода документов и подсистемы пользовательского меню [3].

Целью данной работы является разработка подсистемы Thornado, которая предназначена для порождения документов в форматах HTML, МНТ и WordProcessingML, а также вставку в них переменных. Это решение основывается на введении разметочной информации с клавиатуры, а не на WYSIWYG-подходе. Это обусловлено следующими причинами.

- Внести необходимое форматирование руками в большой массив текста гораздо проще, чем исправлять его в WYSIWYG. Например, дана таблица в формате Comma separated value. Требуется оформить ее для буклета с различными нюансами оформления: подсветкой четных и нечетных колонок и/или рядов, с указанием границ определенной толщины и шрифта, отличающегося от стандартного. Такое оформление в WYSIWYG-редакторе весьма трудоемко, в то время как разметка с клавиатуры решает эту проблему значительно быстрее.
- При изменении кода вручную в текстовом виде гарантируется внесение только необходимой разметочной информации. Таким образом, обеспечивается кросс-платформенность решения. Базовая разметочная информация поддерживается всеми редакторами и браузерами. Расширенное же форматирование, вносимое WYSIWYG-редакторами, поддерживается не полностью.
- В WYSIWYG-редакторах отсутствуют полноценные способы введения в документы ссылок на переменные, которые позволяют превратить индивидуальный документ в шаблон семейства документов.

### Генерация HTML и МНТ документов

Рассмотрим преимущества и недостатки форматов HTML и МНТ при использовании для разметки документов, порождаемых бизнес-приложениями. HTML является широко распространенным стандартом, его формат одинаково хорошо отображается в большинстве текстовых редакторов, кроме того, в нем есть большинство средств форматирования текста. С другой стороны, HTML не имеет некоторых средств форматирования, таких как колонтитулы, автоматическая нумерация страниц, в тело HTML документа нельзя встроить изображения и другие файлы.

Формат МНТ – это развитие формата HTML (MIME HTML). Он создан для того, чтобы сохранять веб-страницы в едином файле, с изображениями, java-апплетами и флеш-анимацией, которые обычно вставляются с помощью внешних ссылок. В данном формате можно описывать колонтитулы документа и вставлять номера страниц. Главным недостатком МНТ является то, что читать и редактировать документы в данном формате можно лишь в некоторых текстовых процессорах, которые доступны только в ОС Windows. В других ОС средства редактирования отсутствуют.

Рассмотрим применение языка Thorn для создания HTML документов. Документ на языке Thorn состоит из команд, вложенных одна в другую:

```
\table[border=1 align=center] {
  \tr {
    \td {a11} \td {a12}
  }
  \tr {
    \td {a21} \td {a22}
  }
}
```

Можно сравнить этот код с соответствующим HTML кодом, который порождается из вышеуказанного:

```
<table border=1 align=center>
<tr>
  <td>a11</td> <td>a12</td>
</tr>
<tr>
  <td>a21</td> <td>a22</td>
</tr>
</table>
```

Видно, что код на языке Thorn гораздо компактнее. Он может быть приведен к более компактному виду. Можно опустить названия параметров, зафиксировав их порядок. Кроме того, поскольку точно известно, что tr всегда внутри table, а td внутри tr, то фигурные скобки можно опустить. В результате тот же код будет записан как:

```
\table[1 border]
\tr \td a11 \td a12
\tr \td a21 \td a22
```

Порядок имен параметров, правила наследования и логика команд определены в файлах команд. Библиотека таких файлов должна быть загружена перед началом компиляции. Ниже приведен пример команды `\table`:

```
#Keys=border,align;Blocks=entry;
#Parents=body;Type=Perl;Free=yes;
$STRING("<table
border=$PARAM{border}
align=$PARAM{align}>
$TEXT{entry}
</table>");
```

В первых строчках файла команды определяются ее общие свойства: порядок следования параметров (предложение `Keys`), список команд, которые могут содержать данную (Type), факт, что для данной команды могут быть опущены фигурные скобки (`Free`), язык, на котором запрограммирована логика команды (Type). Далее следует программа на выбранном языке программирования, которая использует специальные переменные: `PARAM` (параметры команды), `TEXT` (текстовые блоки) и `STRING` (возвращаемое программой значение). Программа является произвольным кодом на выбранном языке: она может открывать файлы, подключать модули и т.д. За счет этого достигается высокая гибкость языка `Thorn`, поскольку команда может содержать в себе неограниченную функциональность. Именно за счет этой особенности языка `Thorn` были реализованы возможности, описанные ниже. В дальнейшем мы будем избегать технических деталей реализации тех или иных возможностей, приводя вместо этого общее описание. Технические детали обычно весьма объемны и связаны более с программированием на языке `Perl`, чем с кодогенерацией.

Созданная библиотека позволяет упростить следующие моменты создания HTML документов.

1. Парные теги закрываются автоматически: в каждой команде указывается, какие команды могут содержать данную команду (`parents`), и компилятор `Thorn` самостоятельно закрывает парные теги.
2. Атрибуты тегов можно опустить и указать только их значения в определенном порядке (`\table[1 center]`). В описании команды, порождающей тег `table`, заранее указывается, что на первой позиции ряда значений пишется ширина границы, а на второй – значение атрибута `align` (выравнивание текста).
3. Для совместимости с XHTML использование некоторых атрибутов тегов не рекомендуется, поэтому можно передать значения в стиле, указав восклицательный знак перед названием атрибута команды. `\table[!border-color=red]`

Приведенные средства позволяют создавать удобные и компактные `Thorn`-файлы документов. Также была разработана команда `\page`, которая содержит в себе стили, соответствующие государственному стандарту, в котором описаны требования к оформлению документов [4].

Для порождения документов с колонтитулами в формате МНТ разработана команда `\mhtpage`, которая позволяет вставить данные и переменные в колонтитулы. Примерный вид команды такой: `\mhtpage{верхний колонтитул} {содержание}{нижний колонтитул}`.

Язык `Thorn` позволяет создавать команды, которые порождают тег с заданными атрибутами и/или стилями. Например, код разрыва страницы в HTML: `<br style="page-break-after:always;" />` следует заменить командой `\pbr` (сокращенно от Page Break). Аналогичным способом заменяются и другие устойчивые последовательности HTML.

### **WordProcessingML**

Формат `WordProcessingML` хорошо поддерживается большинством визуальных текстовых редакторов, в том числе кроссплатформенных, а также имеет широкие возможности для форматирования не только текста, но и его представления пользователю. Кроме того, текстовым редакторам для правильного разбора документа не обязательно буквальное следование документа спецификации [5].

С другой стороны, у данного формата есть существенный недостаток. Объем описаний форматирования избыточен и сложен. Логика форматирования в документах `WordProcessingML` гораздо больше приближена к логике текстового редактора, чем к более понятной и ожидаемой логике HTML разметки. Приведем лишь несколько примеров.

- Если в потоке текста изменится шрифт нескольких слов на полужирный, то в XML коде мы увидим, что поток текста прерывается в том месте, где изменяются свойства шрифта: происходит закрытие блока с «обычным текстом», далее начинается блок с полужирным текстом, после чего этот блок закрывается и снова начинается блок с обычным текстом. В HTML, TeX и других языках разметки мы привыкли к другому подходу: блок полужирного текста вложен в блок обычного текста.
- Особое внимание в `WordProcessingML` следует уделить созданию списков. В данном формате нет понятия `List item`, как в HTML. Пунктом списка является абзац, к которому применены заранее определенные стили списков. Эти стили определяют уровень пункта списка, его оформление и формат нумерации.

- Для корректного отображения ячеек таблиц необходимо указание столбца в атрибутах каждой из них.
- Еще одним недостатком, который снижает доступность WordProcessingML, является использование непривычных единиц измерения. Так, например, все отступы указываются в твипах, а шрифты в полупунктах.

Таким образом, создание WordProcessingML-документов путем ввода с клавиатуры неоправданно трудоёмко. Создание их в WYSIWYG-редакторе нежелательно по причинам, указанным во введении. Нами разработана библиотека команд языка Thon, решающая указанные проблемы следующим образом.

- Разрывы текста в местах, где применяется форматирование, оформляются инверсным способом. Команда на языке Thon создает следующую последовательность тегов: 1) закрывает текущие теги на месте прерывания; 2) открывает теги, необходимые для форматирования текста, и перечисляет стили форматирования; 3) вставляет формируемый текст; 4) закрывает теги, открытые в пункте (2); 5) заново открывает теги, закрытые в пункте (1). Например, команда, обозначающая полужирный шрифт, будет выглядеть как:  
`$STRING = '</w:t></w:r>'. '<w:r><w:rPr><w:b/></w:rPr><w:t>'.  
 $TEXT{entry}. '</w:t></w:r>'. '<w:r><w:t>'.`
- Многоуровневые списки вкладываются один в другой, как в HTML или TeX. Каждая команда `\ul` сохраняет в глобальных переменных номер уровня, а каждая команда `\li` генерирует абзац с соответствующим этому уровню стилем.
- Также через глобальные переменные решается проблема нумерации столбцов: каждая команда новой ячейки `\td` увеличивает счетчик в глобальных переменных, а каждая команда новой строки `\tr` обнуляет его.
- Все коэффициенты в пунктах, дюймах и других единицах измерения пересчитываются в твипы в скриптовом языке.

На данный момент далеко не все команды WordProcessingML поддерживаются в нашей системе. Однако созданная библиотека позволяет задавать базовое форматирование: списки, таблицы, стили оформления абзацев, колонтитулы, параметры страницы и т.д. Thon является открытым программным продуктом, поэтому возможна доработка этой библиотеки пользователями под конкретный проект. Также будут предприняты дальнейшие усилия по расширению функциональности библиотеки.

### Вставка переменных в документ

В 1 и 2 разделах описано создание документов. Однако для использования в бизнес-приложении необходимо создание шаблона документа, в который на указанные места можно подставить переменные. Данный шаблон реализуется в каком-либо языке программирования (был выбран язык C#). Переменные заполняются значениями из базы данных, в результате чего система производит конкретные экземпляры документов. Разработана библиотека языка Thon, которая позволяет из любого текстового документа создать его шаблон. Для этого в тело документа вводятся дополнительные команды, как показано в следующем листинге.

```
\document{
  \html \body \p
    Количество: \variable[name=Var type=Int default=5]}
```

Команды `\document` и `\variable` определены в двух библиотеках: `lib.programmer` и `lib.makeup`. В последней `\document` ничего не делает, кроме того, что возвращает свое значение. Команда `\variable` возвращает ее значение по умолчанию. Таким образом, верстальщик видит примерный документ, который будет сгенерирован бизнес-приложением.

В библиотеке `lib.programmer` эти команды определены по-другому. Команда `\variable` превращена в маркер, который разделяет текст на переменную и постоянную части. Команда `\document` собирает части и создает методы, которые принимают все переменные как аргументы и хранит получившийся документ в потоке. Существует две версии библиотеки `lib.programmer`: одна порождает PHP код для использования на веб-сайтах, и другая – C# код для локальных приложений.

Разработаны варианты команды `\variable`, предназначенные для вставки конкретных типов данных. Так, например, с помощью команды `\fio` вставляется фамилия, имя и отчество. В зависимости от параметров эта команда вставляет строку вида «Иванов Иван Иванович» в различных сокращениях («Иванов И.И.», «Иван Иванов» и т.д.) и различных падежах. Команда `\date` тоже параметризуется: дата 11.04.2005 может быть отображена как «11 апреля 2005 года», «11.04.2005 г.» и т.д. В `lib.makeup` значения по умолчанию для этих команд выбираются случайным образом из списка. В `lib.programmer` вставляются специальные типы аргументов-параметров. Эти типы выполняют соответствующие преобразования данных из БД. Кроме того мы можем вставлять в документ арифметические формулы.

Приведенные выше построения позволяют создавать шаблоны для произвольных документов. Разработано интеграционное решение, упрощающее создание документов с переменными из баз данных, разработанных при помощи Thornado. Описание базы данных на Thornado имеет следующий вид:

```
\field[string Fio]
\desc Фамилия Имя Отчество
\field[int Age]
\desc Возраст
\field[string Email]
\desc Электронная почта
...
```

На основании этих данных могут быть порождены база данных, средства сохранения данных в файлы, пользовательский интерфейс и т.д. [3]. Была решена задача прямой связи переменных внутри документа с полями базы данных. В документ вставляется команда вида `\link`, которая открывает файл с описанием Thonardo и извлекает из этого файла информацию, необходимую для помещения переменной в документ, т.е. команда использует тип переменной и ее комментарий. Таким образом, устраняется дублирование информации описания данных, которая была однажды введена: комментариев, типа полей и т.д. Кроме того, существенно упрощается передача данных из базы данных в методы, создающие документы: вместо ручного перечисления полей объекта в качестве аргументов метода передается объект в метод целиком, и далее он самостоятельно выбирает нужные ему поля. Фактически, порождение документа сводится к одной строчке программного кода вида `PrintDocument(myObject)`, где `myObject` – объект в базе данных. Программисту требуется лишь определить, когда вызвать этот код; все остальное генерируется системой автоматически.

### Заключение

В работе описана подсистема Thonardo, предназначенная для порождения документов в форматах HTML, МНТ и WordProcessingML и вставки в них переменных. Данная подсистема была разработана и объединена с общей системой кодогенерации Thonardo. С использованием вышеуказанной подсистемы были разработаны и внедрены программные решения в области автоматизированного документооборота.

### Литература

1. Окуловский Ю.С. Язык TH / Ю.С. Окуловский // Проблемы теорет. и прикл. математики: молодежн. конф. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – С. 496–500.
2. Окуловский Ю.С. Спецификация языка Thon [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ai.math.usu.ru/wiki/doku.php/нир/продукты/thon>, свободный. – Яз. рус. (дата обращения 18.04.2010).
3. Деев Д.В. Система кодогенерации Thonardo и ее использование для создания бизнес-приложений / Деев Д.В., Окуловский Ю.С., Попов В.Ю., Часовских В.П. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 57. – С. 80–87.
4. ГОСТ Р 6.30–2003. Унифицированная система организационно-распорядительной документации. Требования к оформлению документов. – Введ. 03.03.2003. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 17с.
5. Ecma-international. Standard ECMA-376 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-376.htm>, свободный. – Яз. англ. (дата обращения 11.05.2010).

*Деев Дмитрий Васильевич* – Уральский государственный лесотехнический университет, ассистент, [deyeff@gmail.com](mailto:deyeff@gmail.com)

*Окуловский Юрий Сергеевич* – Уральский государственный университет им. А. М. Горького, кандидат физ.-мат. наук, зав. лабораторией, [yuri.okulovsky@gmail.com](mailto:yuri.okulovsky@gmail.com)

УДК 004.272.33

## РАЗРАБОТКА ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОРОВ

**Р.Р. Ковязин, Н.П. Постников**

Рассмотрена проблема выбора процессора при проектировании современных информационно-управляющих систем (ИУС), поддерживающих программирование на прикладном уровне. Показано, что решение, предлагаемое традиционной методикой проектирования ИУС, не всегда дает удовлетворительный результат. Показана необходимость разработки нового проблемно-ориентированного процессора. Исследован ряд вопросов, возникающих в ходе проектирования архитектуры нового процессора: микроархитектура, система команд, инструментальные средства и др. Приведено описание оригинальной архитектуры проблемно-ориентированного процессора NL3, разработанного в рамках проекта ООО «ЛМТ» для обработки цифровых данных в реальном времени.

**Ключевые слова:** VLIW, цифровая обработка дискретных сигналов, микроархитектура, система команд.

### Введение

Современные ИУС способны выполнять широкий круг задач. Столь широким распространением ИУС обязаны тому, что они являются системами с доминирующей программной компонентой (Software-

Dominated). В таких системах программная компонента настраивает (конфигурирует) аппаратную компоненту на выполнение нужных функций. Сама по себе аппаратная компонента этих функций не выполняет.

Выбор устройства реализации программного управления является ключевым моментом в процессе разработки ИУС [1]. В идеале разработчики должны оценивать эффективность исполнения программной компоненты на разных процессорах. Производители элементной базы предоставляют широкий выбор процессоров: от 4-битных и до 64-битных, с различным соотношением вычислительных и коммуникационных возможностей, с различными микроархитектурами и системами команд Instruction Set Architecture (ISA). На практике выбор тяготеет к тем процессорам, с которыми коллектив разработчиков имеет опыт работы, т.е. основным критерием становится время разработки. Дополнительную сложность создают сторонние программные компоненты (библиотеки драйверов, операционные системы и др.), чьи свойства не до конца известны в силу большого объема и закрытости информации.

Иногда требования к ИУС таковы, что выбор подходящей модели среди существующих процессоров оказывается затруднителен. Приведем наиболее распространенные причины, по которым возникает такая ситуация.

- Заказчику требуется ИУС с прикладным программированием. При этом заказчик – это прикладной специалист (физик, энергетик, технолог и др.), а не программист. Ему нужен инструмент, позволяющий эффективно формировать прикладную задачу и защищающий систему от его неумелых действий.
- Среди процессоров, удовлетворяющих ограничениям по энергопотреблению, габаритам, интегрированным периферийным блокам и др., не нашлось ни одного, обеспечивающего реализацию функциональности ИУС.

Все это приводит к необходимости разработки собственного специализированного процессора [2, 3]. Если ISA разрабатываемого процессора широко распространена, то для него существует богатый выбор развитых инструментальных средств. Если же разрабатываемый процессор обладает оригинальной системой команд, то приходится разрабатывать весь комплекс инструментальных средств, как минимум, компилятор [4]. Для сокращения времени разработки ИУС компилятор может разрабатываться параллельно с самим процессором, так что ISA и микроархитектура этого процессора для компилятора не будут зафиксированными. В проектировании архитектуры процессора смогут принять участие как разработчики процессора, так и разработчики компилятора. Так появляется возможность выбора того, что будет реализовано инструментальными средствами, а что в самой ИУС.

Данная статья описывает архитектуру проблемно-ориентированного процессора NL3, разработанного авторами в рамках проекта ООО «ЛМТ» по реализации алгоритмов цифровой обработки сигналов в реальном времени.

### **Выбор архитектуры процессора**

Зачастую обработку сигналов представляют в виде схем, состоящих из фильтров, усилителей, сумматоров, аттенуаторов, преобразователей и т.п. Топология такой схемы показывает суть выполняемой обработки цифровых сигналов. Следовательно, говоря об алгоритме обработки дискретных сигналов, будем подразумевать схему этого алгоритма. Изменение топологии схемы – это изменение подключения ее элементов, т.е. изменение алгоритма. Вместе с тем у отдельных элементов схемы есть численные характеристики: коэффициенты усиления, коэффициенты фильтров и др. Изменение этих параметров не меняет топологии схемы, поэтому алгоритм обработки данных не меняется, но меняется результат работы схемы.

Традиционно задачи цифровой обработки дискретных сигналов в ИУС решаются на базе процессоров сигнальной обработки (DSP) или программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). DSP предоставляют расширенные вычислительные возможности по сравнению с процессорами общего назначения, однако, чтобы воспользоваться ими, нужно писать программы, учитывая особенности компилятора. ПЛИС позволяют воспользоваться параллелизмом в обработке сигналов, но технология их программирования существенно отличается от программирования последовательных процессоров. В любом случае программирование DSP и ПЛИС требует высокой квалификации и специальных знаний от разработчика.

Если ИУС является программируемой системой, а ее заказчик – прикладной специалист, то решения на базе DSP и ПЛИС не подходят, поскольку у заказчика нет необходимой квалификации для эффективного решения его прикладной задачи. В данном случае требуется возможность конфигурирования работы системы заказчиков в следующих проявлениях:

- изменение топологии схемы алгоритма на фазе разработки;
- изменение параметров блоков схемы алгоритма на фазе исполнения.

Было принято решение о необходимости разработки специализированного процессора [5]. В качестве базового устройства реализации программного управления была выбрана ПЛИС, поскольку она может обеспечить высокую производительность за счет параллелизма исполнения схемы обработки сигналов.

## Архитектура процессора NL3

По классификации Флинна [6] процессор NL3 относится к классу MISD-процессоров. NL3 содержит в себе набор специализированных арифметико-логических устройств Data Processing Unit (DPU), соединенных шиной данных (рис. 1). DPU способны выполнять различные вычисления: это могут быть сумматоры, фильтры, умножители, память, преобразователи интерфейсов, мультиплексоры и др. Каждое DPU выполняет функции определенного элемента схемы обработки цифровых сигналов. Поскольку в схеме эти элементы связаны, то нужно передавать данные между DPU. Для этого в микроархитектуре процессора NL3 предусмотрены шины данных. Одно DPU выставляет свои данные на шину данных, а другие DPU (их может быть несколько) загружают эти данные в себя. Время работы DPU не зависит от значений входных данных, загруженных с шины. Несмотря на такой способ обмена, все DPU функционируют независимо друг от друга. Передача данных между DPU осуществляется с помощью совмещения тактов чтения и записи. Состоянием шины данных отдельно никто не управляет, она является разделяемым ресурсом для DPU.

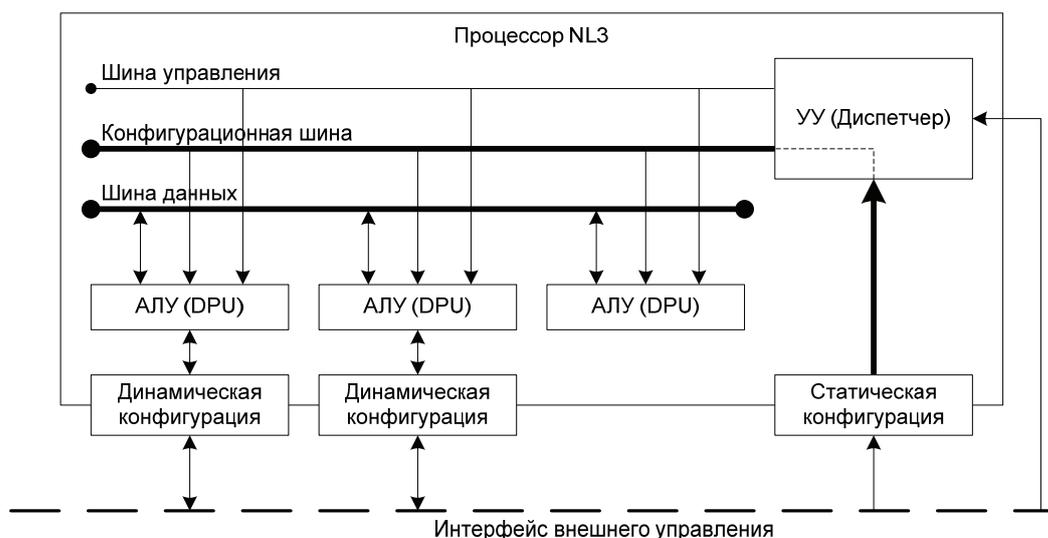


Рис. 1. Архитектура процессора NL3

Для выполнения любой операции DPU должно получить команду. Для подачи команд DPU предусмотрены конфигурационная шина и шина управления. Вся функциональность DPU реализуется через выполнение трех типов команд:

- загрузка данных с шины данных;
- запуск вычислений;
- выгрузка результатов вычислений на шину данных.

По конфигурационной шине передаются индивидуальные команды DPU. Кодирование команд на конфигурационной шине уникально для каждого DPU, при этом к конкретному DPU подключены только те линии конфигурационной шины, по которым передаются команды (рис. 2). По одним и тем же линиям могут передаваться команды разным DPU. Программа для процессора NL3 называется статической конфигурацией. Это последовательность значений, выставляемая на конфигурационную шину. В этих значениях закодирован порядок подачи команд загрузки/выгрузки и запуска вычислений DPU. Поскольку через загрузку и выгрузку осуществляется передача данных между DPU, то это формирует топологию алгоритма цифровой обработки сигналов. Операции запуска вычислений формируют функциональность этого алгоритма.

Диспетчер процессора NL3 – это блок, управляющий состоянием конфигурационной шины на каждом такте в соответствии со статической конфигурацией. Состояние конфигурационной шины на конкретном такте является инструкцией процессора NL3, а список таких инструкций – программой. Программа исполняется диспетчером всегда линейно, без пропусков инструкций, от начала и до конца, за одно и то же время (количество тактов синхронизации диспетчера). В отличие от конфигурационной шины, по шине управления передаются широкоэвентральные команды. Диспетчер по шине управления передает команды, сигнализирующие начало и конец исполнения списка инструкций. Кодирование этих команд – одинаковое для всех DPU. По командам, полученным по шине управления, DPU могут инициализировать свои внутренние регистры, а некоторые из них запускают вычисления. Все линии шины управления одинаково интерпретируются и подключены ко всем DPU.

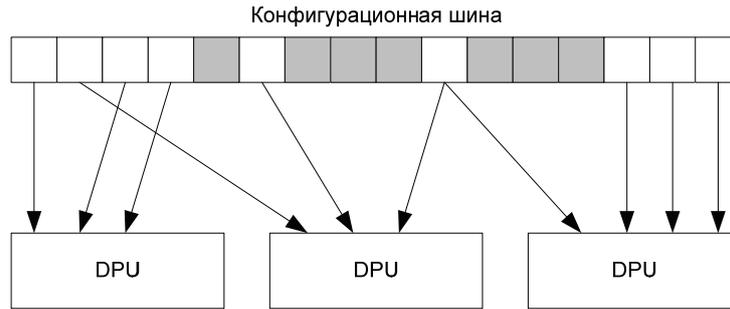


Рис. 2. Кодирование команд на конфигурационной шине

Постоянная работа схемы обработки цифровых сигналов реализована в процессоре NL3 через периодическое исполнение программы диспетчером: закончив формирование команд по списку инструкций, диспетчер начинает его заново. Поскольку программа всегда исполняется в одно и то же время, то задержка активации DPU относительно входных данных постоянна. Поскольку алгоритм цифровой обработки сигналов работает в реальном времени, то он должен успевать выполняться для каждого нового сигнала. Таким образом, для каждого входного сигнала алгоритм повторяется. При известной частоте дискретизации  $F_{SR}$  и частоте работы диспетчера  $F_{DISP}$ , можно легко вычислить максимальный размер программы  $LEN$  – количество инструкций, которое может исполнить диспетчер между появлением двух дискретных сигналов:

$$LEN = F_{SR} / F_{DISP} .$$

Процессор NL3 является лишь вычислительным ядром. Для запуска и остановки, для загрузки статической конфигурации нужен сервисный процессор – внешний вычислитель, обеспечивающий работу процессора NL3. Эти функции может выполнять любой процессор общего назначения. Изменение топологии алгоритма цифровой обработки – это изменение связей между DPU. Для этого требуется перекомпиляция программы, в то время как у некоторых DPU есть параметры, изменение которых не влияет на их функциональность: масштабные множители, значения табличных выборок, коэффициенты фильтров и др. Их можно менять без остановки процессора, и для этого предусмотрен механизм динамического конфигурирования. Динамическая конфигурация – это память, доступная DPU и сервисному процессору. Сервисный процессор может читать и писать в эту память. Поскольку сервисный процессор и DPU могут работать на разных частотах, для корректной работы DPU предусмотрены механизмы синхронизации. Если для обработки цифровых сигналов не требуется производить настройку алгоритма, то механизм динамического конфигурирования не нужен. Возможна реализация, когда статическая конфигурация хранится во внутренней памяти диспетчера, а параметры всех DPU задаются по умолчанию корректными значениями. В таком случае процессор NL3 будет работать без интерфейса внешнего управления и динамического конфигурирования.

Поскольку процессор NL3 обладает оригинальной архитектурой, для него требуется разработка специализированных инструментальных средств, в том числе компилятора. Основная задача компилятора заключается в формировании статической конфигурации. Критериями размещения команд в рамках цикла инструкций является то, что у соединенных DPU должны совпадать такты команд загрузки и выгрузки. Тогда данные будут передаваться между DPU. Кроме того, если у DPU пересекаются команды на конфигурационной шине, то нужно эти команды расположить так, чтобы исключить некорректную активацию DPU. Также необходимо решить проблему повторного использования отдельных DPU в течение одного цикла. Разработка компилятора с такими функциями нетривиальна. К тому же крайне желательна графическая форма разработки алгоритмов, поддерживаемая мощными САПР.

### Заключение

Архитектура процессора NL3 сравнима со свойствами процессоров с суперскалярной и VLIW (Very Long Instruction Word) [7, 8] архитектурами, которые приведены в таблице. Часть свойств NL3 выходит за рамки суперскалярной и VLIW архитектур и является оригинальной.

- У DPU разных типов отличается время работы. Вместе с тем время работы однотипных DPU тоже может отличаться. В суперскалярных и VLIW архитектурах активация исполнительного блока – это инструкция. NL3 поддерживает более низкоуровневое программирование. Для активации DPU требуется несколько команд: загрузка, выгрузка и начало вычислений. Можно варьировать количество тактов между этими командами и, благодаря этому, время работы даже однотипных DPU может отличаться.
- Длинные инструкции передаются по конфигурационной шине. К каждому DPU подключается только часть линий шины. Одни и те же линии могут быть подключены к нескольким DPU, что соответст-

вует наложению команд для разных DPU в рамках одной инструкции. Если в VLIW архитектуре каждый фрагмент длинной инструкции предназначен для отдельного исполнительного блока, то у NL3 эти фрагменты могут пересекаться.

- DPU поддерживают конвейеризацию. Вычисления начинаются по специальной команде, так что в DPU можно загружать входные данные до выгрузки результатов предыдущих вычислений. Загрузка входных данных требует определенного времени, но она не портит значения, посчитанные ранее.

		NL3	Суперскалярная архитектура	VLIW архитектура
Исполнительные блоки (DPU)				
Количество		Много	Много	Много
Время работы	Однотипных	Разное	Одинаковое	Одинаковое
	Разнотипных	Разное	Разное	Одинаковое
Регистровые банки		Нет	Нет	Есть
Программирование				
Общая инструкция		Да	Нет	Да
Планирование		Статическое	Динамическое	Статическое
Плотность кода		Низкая	Высокая	Низкая
Перекрытие инструкций		Да	Нет	Нет

Таблица. Сравнение свойств процессоров с суперскалярной и VLIW архитектурами

Процессор NL3 разработан на базе ПЛИС XC3S400A. Он обладает следующими характеристиками:

- разрядность: шины данных – 32 бита, конфигурационной шины – 72 бита, шины управления – 3 бита;
- частота: дискретизации  $F_{SR}$  – 1 МГц, диспетчера  $F_{DISP}$  – 200 МГц.

Типовые задачи цифровой обработки дискретных сигналов для процессора NL3: фильтрация, ПИД-регулирование, синхродетектирование. Для этого были разработаны следующие DPU:

- цифровой обработки: вычислитель поворота координат, коррелятор, КИХ/БИХ-фильтр;
- общего назначения: сумматор, табличная выборка, умножитель, память, мультиплексор;
- специализированные: связи с внешними устройствами, осциллограф, отладчик.

Реализация процессора NL3, апробация его на тестовых и целевых задачах с учетом затрат на его разработку показали высокую эффективность предложенной архитектуры. На текущий момент продолжают исследования вопросов компиляции и оптимизации работы DPU.

### Литература

1. Ковязин Р.Р. Влияние аппаратной организации на технологию программирования во встроенных системах / Р.Р. Ковязин // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2003. – Вып. 19. – С. 172–177.
2. Ковязин Р.Р. Использование аппаратных интерпретаторов для управления неоднородными компонентами микропроцессорной системы / Р.Р. Ковязин, А.Г. Чистяков // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2002. – Вып. 6. – С. 71–75.
3. Ковязин Р.Р. Создание локальных регуляторов на базе виртуальной машины с динамическим набором инструкции / Р.Р. Ковязин, Н.П. Постников // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – Вып. 32. – С. 55–62.
4. Ковязин Р.Р. Проектирование проблемно-ориентированных языков для встроенных вычислительных систем / Р.Р. Ковязин // Политехнический симпозиум «Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона». Тезисы докладов. – СПб: СПбГПУ, 2002. – 66 с.
5. Smith J. Virtual Machines: Versatile Platforms for Systems and Processes / Jim Smith, Ravi Nair. – Morgan Kaufmann, 2005. – P. 656.
6. Flynn M. Some Computer Organizations and Their Effectiveness // IEEE Trans. Comput. – 1972. – V. C-21. – P. 948–960.
7. Fisher J. Very Long Instruction Word Architectures and the ELI-512 / Joseph A. Fisher // Proceedings of the 10th annual international symposium on Computer architecture. International Symposium on Computer Architecture. – New York: ACM. – 1983. – P. 140–150.
8. Fisher J. Embedded Computing: A VLIW Approach to Architecture, Compilers and Tools // Joseph A. Fisher, Paolo Faraboschi, Cliff Young. – Morgan Kaufmann, 2004. – P. 712.

**Ковязин Рустам Раисович**

**Постников Николай Павлович**

– ООО «ЛМТ», магистр математики, rus-k@yandex.ru

– ООО «ЛМТ», главный инженер, кандидат технических наук, nick.postnikov@gmail.com

УДК 004.932

## МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КОНТРАСТА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В.В. Беззубик, Н.Р. Белашенков, В.О. Никифоров

Предложен и обоснован новый метод количественной оценки контраста цифрового изображения на основе представления «центров масс». Приведены результаты сравнительного исследования устойчивости предложенного метода к влиянию пространственных шумов. Показано, что достоверность оценки контраста изображений может быть существенно повышена по сравнению с оценками, получаемыми известными методами. Сформулированы рекомендации по применению метода в оптико-электронных системах автофокусировки тепловизоров и цифровых микроскопов.

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, контраст изображения, шумоподавление.

### Введение

Одной из важнейших характеристик, определяющих качество изображения, является контраст. Многочисленные методы количественной оценки контраста, описанные в литературе [1–3], основаны, главным образом, на выделении высокочастотных составляющих пространственного спектра изображения и определении их относительного вклада в полный спектр. В оптико-электронных системах контраст получаемого изображения определяется качеством оптических систем, формирующих изображение на приемных площадках матричных фотоприемников, точностью позиционирования фотоприемников относительно плоскости наилучшей фокусировки и разнообразными помехами. Источниками этих помех могут служить неоднородности пространственной структуры фотоприемных устройств, их собственные шумы, шумы преобразователей и каналов связи. При этом оценка контраста изображения, реально формируемого на фотоприемнике, превращается в труднопреодолимую проблему, так как любые известные процедуры его расчета, основанные, например, на выделении контуров, дают завышенный результат, а применение методов шумоподавления неизбежно приводит к заметным искажениям частотного спектра изображения. В тепловизионных системах на основе микроболометрических матричных фотоприемников, в цифровых микроскопах, работающих в режимах наблюдения слабых сигналов при больших увеличениях (например, в люминесцентных микроскопах) отношение сигнал/шум может достигать неприемлемо низких значений. В оптико-электронных комплексах, включающих системы автоматической фокусировки, достоверная оценка контраста реального (не искаженного шумами) изображения лежит в основе точности работы этих комплексов. Таким образом, особую актуальность приобретают поиски методов количественной оценки контраста с максимальной устойчивостью к влиянию пространственных шумов.

### Описание метода и эксперимент

Если рассматривать изображение, регистрируемое фотоэлектронным приемником, как суперпозицию сигнальной и шумовой составляющих, то можно сделать ряд предположений и сформулировать на их основе основной принцип количественной оценки контраста изображения, реально формируемого на фотоприемнике до его искажения шумами фотоэлектронных систем. Предположим, что вносимые в изображение шумы пространственно равномерны, а их спектры близки к однородному. Будем считать также, что пространственная плотность шума не превышает плотности сигнала. Если эти условия выполняются, то для произвольного зашумленного цифрового изображения можно определить количественную меру контраста непосредственно без применения предварительной фильтрации, в значительной степени уменьшив вклад шумов в полученный результат.

Рассмотрим цифровое изображение размером  $M \times N$  и для каждого его пикселя с координатами  $(i, j)$  и яркостью  $I^{i,j}$  определим симметричную окрестность  $m \times n$ , где величины  $m$  и  $n$  являются нечетными и принимают значения больше 1. Далее рассчитаем величину

$$CM = \sum_{i=(m-1)/2}^{M-(m-1)/2} \sum_{j=(n-1)/2}^{N-(n-1)/2} \sqrt{(X_c^{i,j})^2 + (Y_c^{i,j})^2},$$

где

$$X_c^{i,j} = \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} p \cdot I^{i+p, j+q} / \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} I^{i+p, j+q},$$

$$Y_c^{i,j} = \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} q \cdot I^{i+p, j+q} / \sum_{p=(1-m)/2}^{p=(m-1)/2} \sum_{q=(1-n)/2}^{q=(n-1)/2} I^{i+p, j+q},$$

значение которой имеет смысл суммы отклонений «центра масс» яркостей окрестности каждого пикселя от ее геометрического центра.

На примере произвольного монохромного изображения клеточной структуры биологического препарата, полученного на цифровом микроскопе при большом увеличении, исследуем зависимости количественной оценки контраста от вклада добавленного шума. На рис. 1, а–в, представлены изображения без шума (а), а также с добавлением 50% (б) и 100% (в) однородного шума, рассчитанного от среднего уровня неискаженного сигнала.

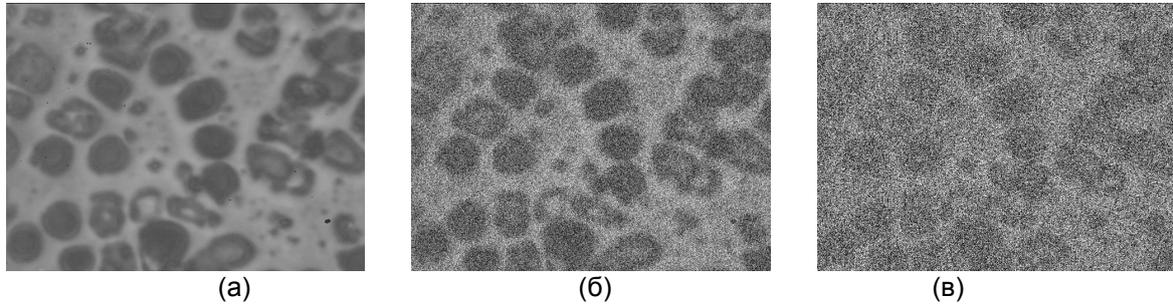


Рис. 1. Изображение биологического препарата: в исходном виде (а), с добавлением 50% (б) и 100% (в) однородного шума

На рис. 2 приведены нормированные зависимости расчетной величины  $CM$  при  $m=n=3$  (кривая 1),  $m=n=5$  (кривая 2) и  $m=n=7$  (кривая 3) от вклада добавленного шума. На том же рисунке для сравнения представлены зависимости оценок контраста изображения, полученных известными и широко применяемыми на практике методами выделения контуров с использованием операторов Робертса (кривая 4),

$$R = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} |I^{i,j} - I^{i+1,j+1}| + |I^{i,j+1} - I^{i+1,j}|,$$

и Собеля (кривая 5)

$$S = \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} \sqrt{(G_x^{i,j})^2 + (G_y^{i,j})^2},$$

где

$$G_x^{i,j} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I^{i-1,j-1} & I^{i,j-1} & I^{i+1,j-1} \\ I^{i-1,j} & I^{i,j} & I^{i+1,j} \\ I^{i-1,j+1} & I^{i,j+1} & I^{i+1,j+1} \end{bmatrix},$$

$$G_y^{i,j} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I^{i-1,j-1} & I^{i,j-1} & I^{i+1,j-1} \\ I^{i-1,j} & I^{i,j} & I^{i+1,j} \\ I^{i-1,j+1} & I^{i,j+1} & I^{i+1,j+1} \end{bmatrix}.$$

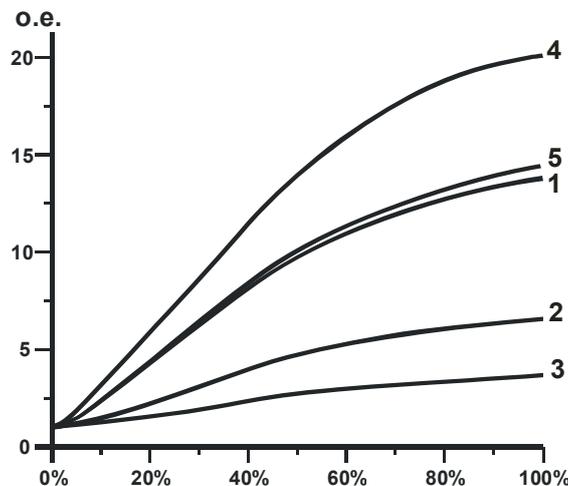


Рис. 2. Зависимости нормированного контраста изображения от вклада добавленного однородного шума, рассчитанные предлагаемым методом с матрицей 3x3 (1), 5x5 (2), 7x7 (3); методами Робертса (4) и Собеля (5)

**Результаты и обсуждение**

Из рис. 2 видно, что метод «центров масс» (кривые 1–3) обеспечивает существенное снижение чувствительности определения меры контраста изображения к шумам по сравнению с известными методами (кривые 4, 5) в широком диапазоне вкладов добавленного шума. При этом метод, основанный на использовании результатов вычислений в окрестностях размером 3×3 пикселей (кривая 1), не уступает методу Собеля (кривая 5), хотя и весьма близок к нему. Это не удивительно, так как метод Собеля использует матричное преобразование яркостей пикселей изображения того же размера. Переход к вычислениям смещения «центров масс» в окрестностях размером 5×5 пикселей (кривая 2) более чем вдвое уменьшает чувствительность к шумам. Увеличение размеров окрестности до 7×7 пикселей (кривая 3) приводит к дальнейшему улучшению результата. Принимая во внимание, что время вычислений меры контраста возрастает пропорционально квадрату размера выбранной окрестности, в прикладных задачах реального времени разумно считать оптимальным размер окрестности, равный 5×5 пикселей.

Для идеального метода количественной оценки контраста цифрового изображения кривая зависимости на рис.2 должна быть параллельной оси абсцисс. Такой характер зависимости означает, что добавление шумов к изображению не изменяет результат вычисления его контраста. В идеальном случае точность работы автоматизированных систем управления, использующих величину контраста изображения в качестве управляющего сигнала (например, системы автофокусировки), не подвержена влиянию шумов фотоэлектронного тракта.

Предложенный метод оценки контраста был апробирован на цифровых изображениях, полученных на различных приборах с различным исходным качеством. При этом было установлено, что ход зависимостей, аналогичных представленным на рис. 2, на этих изображениях качественно совпадает. В тех случаях, когда пространственный спектр исходного изображения содержал значительную долю высокочастотных компонент, даже незначительное добавление шума существенно снижало достоверность количественной оценки контраста исходного изображения всеми без исключения методами. Для размытых, малоконтрастных изображений наблюдалась строго обратная картина.

Результаты исследований всех рассмотренных в работе изображений дают возможность сформулировать на первый взгляд парадоксальный вывод: чем ниже контраст исходного изображения, тем больший выигрыш по достоверности его количественной оценки при наличии пространственных шумов может быть достигнут за счет применения нового метода. При оценке высококачественных контрастных изображений метод «центров масс» работает, по крайней мере, не хуже известных методов.

**Заключение**

Ранее подход к анализу изображения с использованием понятия «центров масс» был применен в работе [4] для создания модели фона в задачах детекции движения. Применение этого подхода для количественной оценки контраста изображения в настоящей работе сформулировано впервые. Предложенный метод может быть положен в основу алгоритмов автофокусировки оптико-цифровых комплексов на базе тепловизионных матричных фотоприемников и цифровых микроскопов [5], так как именно в этих комплексах формируемое изображение может существенно отличаться от регистрируемого из-за наличия шумовых составляющих.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

**Литература**

1. Bueno-Ibarra M.A., Alvarez-Borrego J., Acho L., Chavez-Sanchez M.C. Fast autofocus algorithm for automated microscopes // *Optical Engineering*. – 2005. – V. 44. – № 6. – 063601.
2. Вудс Р., Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
3. Жирков В.Ф., Новиков К.В., Сушкова Л.Т. Проблема автоматической фокусировки видеомикроскопа при сканировании цитологических препаратов // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2000. – № 6. – С.55–60.
4. Oral M., Deniz U. Centre of mass model – A novel approach to background modelling for segmentation of moving objects // *Image and Vision Computing*. – 2007. – V. 25. – P. 1365–1376.
5. Беззубик В.В., Белашенков Н.Р., Устинов С.Н. Оптимизация алгоритмов автофокусировки цифрового микроскопа // *Оптический журнал*. – 2009. – Т.76. – № 10. – С. 16–22.

- Беззубик Виталий Вениаминович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, bezzubik@mail.ru
- Белашенков Николай Романович** – ОАО «ЛОМО», помощник технического директора, кандидат физ.-мат. наук, belashenkov@gmail.com
- Никифоров Владимир Олегович** – ОАО «ЛОМО», доктор технических наук, профессор, технический директор, nikiforov@mail.ifmo.ru

УДК 004.932.2

**АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
АВТОМАТИЗМА СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗОВ**

Ю.А. Гатчин, С.В. Москаленко

Представлена система идентификации линейных объектов на инженерных чертежах. По завершении работы данная система получает набор данных, необходимый для определения различных пороговых значений, повышающих автоматизм алгоритмов анализа изображения.

**Ключевые слова:** сегментация, линейный объект, пороговое значение, распознавание образов.

**Введение**

Сегментация – одна из ключевых открытых проблем в компьютерном зрении. До недавнего времени распознавание и сегментацию не связывали вместе. Однако в области сегментированного представления мало тем, изучение которых не помогло бы решить задачи, связанные с распознаванием [1].

На вход большинства систем распознавания графических изображений подается некоторый избыточный набор неструктурированных данных. После этого система должна отсеять лишнюю информацию и выделить множества с интересующими характеристиками. Данный процесс получения компактного представления полезного содержания объекта называется сегментацией или идентификацией. Верное выявление важной информации на изображениях обеспечивает надежное функционирование систем распознавания образов, а также является базисом для систем восстановления изображений. На практике проблема сегментации изображений является довольно трудноразрешимой. Для обеспечения корректного функционирования процесса сегментации необходимо вовлечение некоторых пороговых значений. В данной работе предложен алгоритм, вычисляющий основные пороги в автоматическом режиме.

**Теоретическое обоснование**

Как правило, многие системы распознавания графических изображений включают процедуру сегментации в этап первичной векторизации, во время которого происходит конвертирование пиксельного набора изображения в векторное представление [2]. В контексте этапа векторизации сегментация занимается не только поиском информативных графических примитивов, но и организацией совокупностей данных примитивов в простейшие группы. В частности, множество примитивов включает: точки, векторы, полигоны, объединение которых может быть определено как текст или графика, площадной объект или линейный. Процедура сегментации в таких системах часто нуждается в определении специальных пороговых значений, которые задаются в диалоговом режиме оператором [3–5]. Так, применимо к задаче анализа инженерных чертежей почти всегда требуется, чтобы пользователь задал следующие пороги: максимальная ширина линии (критерий принадлежности объекта классу площадных или линейных), максимальная длина луча, определяющего ширину объекта, расстояние между штрихами для пунктирных линий. Основываясь на данных порогах, система строит вывод о типе конкретного линейного объекта: основная или тонкая линия, штрихпунктирная линия или оборванная (вследствие помех на растре).

В большинстве случаев данные пороговые значения определяются эмпирическим путем, что лишает систему автоматизма. Поэтому разработка автоматизированных методов вычисления порогов остается актуальной.

**Реализация алгоритма**

Разработанный алгоритм сегментации должен отделять линейные объекты от площадных и дискретных объектов. Примерно 90% объектов на инженерных чертежах составляют линии. Исходя из [6], все эти линии могут быть разделены на 2 группы по признаку ширины: основные (сплошная толстая основная линия), тонкие (сплошная тонкая, сплошная волнистая, штрихпунктирная тонкая линия). Суть работы алгоритма заключена в предварительной идентификации всех линейных объектов на изображении. Изначально алгоритм не будет знать, к какой группе отнести обнаруженный линейный объект: данный объект может принадлежать либо к группе основных линий, либо к группе тонких, либо к группе площадных объектов. Здесь даже площадной объект может обладать признаками линейного, когда отношение длины объекта к ширине больше 4, что существенно затрудняет задачу классификации. Замеряя ширину найденных линий, алгоритм формирует выборку, исходя из которой вычисляет среднее арифметическое значение ширины линии для каждой группы. Полученная информация о ширине линейных объектов поможет на следующих

этапах анализа изображения отделять линейные объекты от площадных объектов, определять пороговые значения в автоматическом режиме и вычислять точки центральной линии.

Работа алгоритма начинается с введения в систему бинарного растрового чертежа. Далее происходит наложение сетки на введенное изображение и обнаружение точек (пикселей), лежащих на пересечении графических примитивов со штрихами сетки. Данный процесс представляет собой сначала горизонтальное, а потом вертикальное сканирование изображения на наличие черных точек, говорящих о встрече некоторого примитива. Что касается выбора интервала между параллельными штрихами сканирующих линий, то здесь можно отталкиваться от разрешения изображения. Например, опытная эксплуатация показала, что при размере изображения 1600×1200 пикселей и интервале между штрихами в 10 пикселей алгоритм будет обладать оптимальным соотношением скорости работы к точности вычисления ширины линейных объектов.

После обнаружения некоторого объекта от полученной исходной точки  $(i, j)$  в основных направлениях строится циклическая гистограмма, отражающая ширину объекта в каждом из направлений. Здесь ширина объекта характеризуется длиной пробега в одном направлении по черным пикселям до первого белого. Направления измерения ширины можно последовательно строить по часовой стрелке с приращением угла  $\alpha$ , начиная от луча, совпадающего со сканирующей линией, обнаружившей данный объект. В связи с недостаточно высоким разрешением изображения и с ограниченным числом лучей циклической гистограммы длина участка пересечения лучом графического объекта может отличаться от реальной толщины объекта в данной точке. Ошибка вычисления толщины для такого случая определяется по формуле (1):

$$\Delta = \frac{1}{\cos(\alpha/2)} - 1, \tag{1}$$

где  $\alpha$  – угол между смежными лучами. Число лучей гистограммы может быть взято равным 18, так как при  $\alpha = 10^\circ$  ошибка вычисления ширины объекта не превысит 1,5%.

Для построения циклической гистограммы ширина объекта в каждом из направлений рассчитывается типовым алгоритмом Брезенхема [7]. В результате могут получиться гистограммы с пиками и впадинами. Гистограммы в большинстве случаев будут иметь гладкий непрерывный вид (рис. 1, а), однако в некоторых случаях, когда исходный растр достаточно зашумлен и имеет «дыры» в объектах, график будет терять свою гладкость (рис. 1, б). Для повышения точности определения типа объекта и его ширины необходимо для зашумленных изображений сглаживать гистограммы. Это можно сделать путем вычисления в каждой точке графика усредненного значения, принимая во внимание значения соседних точек.

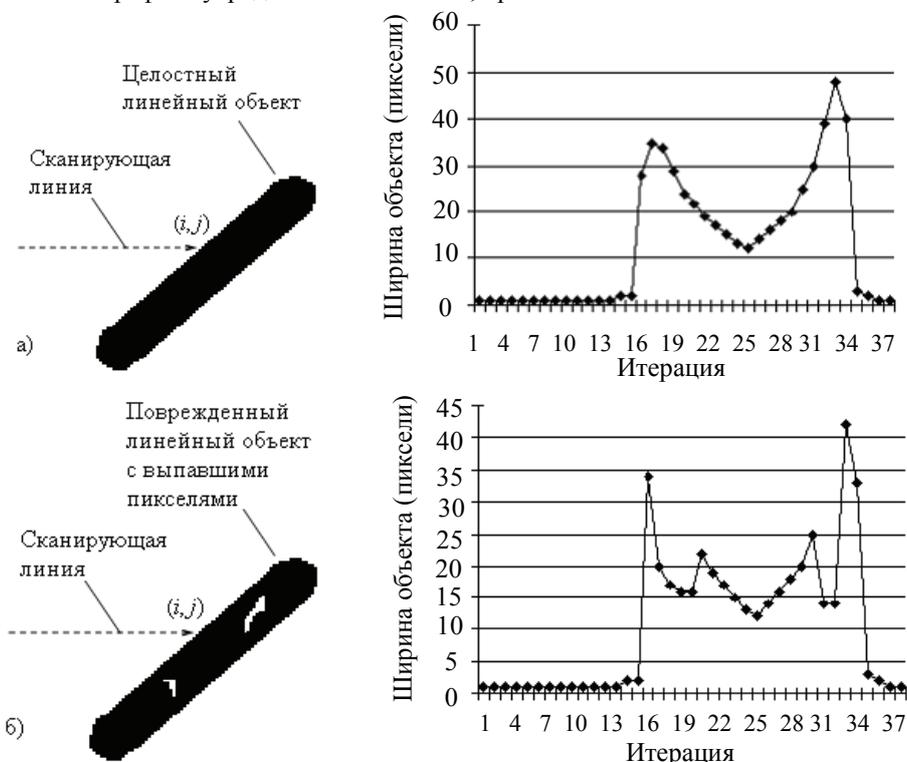


Рис. 1. Примеры гистограмм линейных объектов (слева линейный объект, справа график гистограммы): а) гладкая; б) возмущенная

Под пиком понимается точка экстремума на графике, при которой функция на прилегающем участке слева возрастает, а справа убывает. Под впадиной понимается точка экстремума на графике, при которой функция на прилегающем участке слева убывает, а справа возрастает. Будем считать любой

объект, одно из измерений которого больше измерения другого в 4 раза, линейным (длина в 4 раза больше ширины). Следовательно, для линейного объекта на графике должно существовать два пика с высотами минимум в два раза большими, чем величина впадины между ними (рис. 2). Далее из данного положения будет сформулирован критерий идентификации линейных объектов.

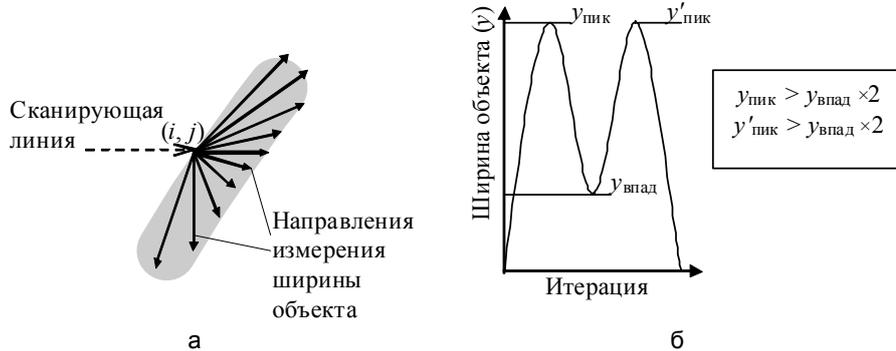


Рис. 2. Представления линейного объекта: вид на растре (а); усредненная гистограммная функция ширин объекта (б)

Получив гистограммную функцию, следует минимизировать ее до схемы экстремумов с формированием массива экстремальных точек. Данная мера является чисто оптимизационным моментом, так как для анализа графического объекта достаточно лишь информации об экстремумах. Массив экстремальных точек будет состоять из повторяющихся пар экстремумов типа «пик–впадина». Отрезок, соединяющий пару последовательных экстремумов типа «впадина–пик», будем называть возрастающим, а отрезок, соединяющий пару последовательных экстремумов типа «пик–впадина» – убывающим.

Далее находим в массиве наибольший экстремум с  $y_{\text{пик}(\text{max})}$ , являющийся самым высоким пиком (рис. 3, а). Отталкиваясь от  $y_{\text{пик}(\text{max})}$ , можно однозначно заключить, что если за данным пиком существует впадина с  $y_{\text{впад}} < y_{\text{пик}(\text{max})} / 2$ , а за впадиной существует еще один пик с  $y_{\text{пик}} > y_{\text{впад}} \times 2$ , то рассматриваемый объект – линия. Для проверки данных условий надо исследовать, с какими возрастающими и убывающими отрезками на схеме экстремумов пересекается линия  $f = y_{\text{пик}(\text{max})} / 2$  (рис. 3, а). Если прямая  $f$  пересечет 4 отрезка, значит, идентифицируемый объект – линейный, и теперь остается только проверить график между этими двумя пиками на непрерывность и найти на данном интервале минимальную впадину с  $y_{\text{впад}(\text{min})}$ . Данная величина  $y_{\text{впад}(\text{min})}$  будет являться искомой шириной линии. Будем называть явным пиком ситуацию, когда линия  $f$  пересекает возрастающий, а затем убывающий отрезок на схеме экстремумов. Следовательно, критерий идентификации линейного объекта на растре будет выглядеть следующим образом: если на схеме экстремумов, принадлежащей точке  $(i, j)$  рассматриваемого объекта, обнаружено два явных пика, значит, объект – линейный.

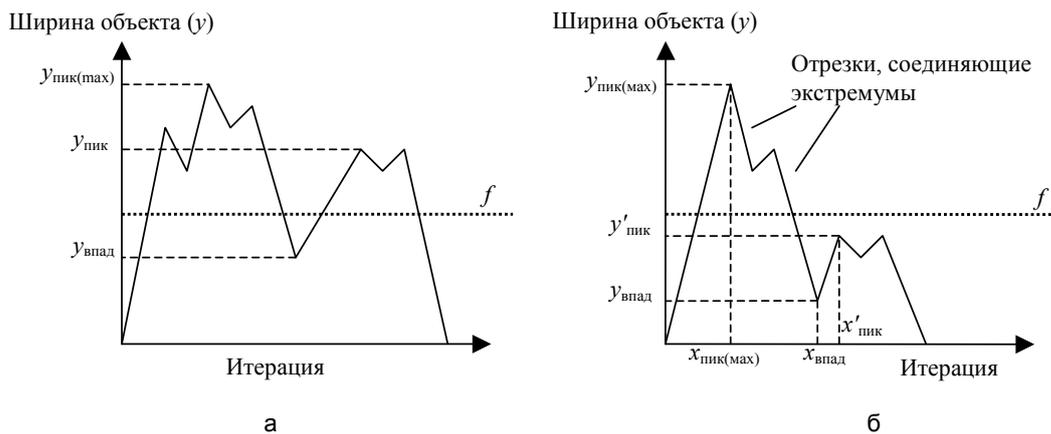


Рис. 3. Схемы экстремумов для линейных объектов: обнаружено два явных пика (а); обнаружен один явный пик (б)

Действительно, опыт показал, что для большинства обнаруженных на растре объектов данный критерий будет справедлив. Однако есть вероятность, что при построении прямой  $f$  будет найден лишь один явный пик, хотя идентифицируемый объект все же будет линейным (рис. 3, б). Для таких случаев существует ответвление алгоритма. Происходит запуск перебора массива экстремумов вначале вперед от текущего элемента  $x_{\text{пик}(\text{max})}$ , равного  $\varphi(y_{\text{пик}(\text{max})})$ . Во время этого перебора происходит проверка: если для очередного пика  $x'_{\text{пик}}$ , равного  $\varphi(y'_{\text{пик}})$ , существует уже рассмотренный на данном направлении экстремум



На рис. 4 представлена блок-схема, изображающая обобщенный алгоритм работы системы идентификации линейных объектов на растре с вычислением их ширин.

Таким образом, по окончании операции поиска линейных объектов алгоритм будет обладать статистической выборкой, содержащей значения ширин всех найденных линий. Как было сказано, все линейные объекты можно грубо отнести к группе основных или тонких линий, значит, каждая выборка должна иметь две преобладающие величины, где меньшая величина соответствует усредненной ширине тонкой линии, а большая – ширине основной линии.

#### **Апробация**

Реализация алгоритма была выполнена в среде разработки Borland Delphi 7. Так как данный алгоритм должен применяться в системах в качестве дополнительного уровня предобработки, принципиальным остается вопрос о скорости его работы. Большое внимание было уделено его оптимизации. В частности, реализован разреженный просмотр растра: наложение сетки на изображение вместо попиксельного сканирования, ограниченное число направлений измерения ширины объекта для построения гистограммы.

Лучший результат алгоритм показал при анализе отсканированных чертежей формата А4 с 600 dpi (разрешение 3350 на 5694 пикселей). На компьютере средней конфигурации Celeron 1,7 Ghz с 512 Mb оперативной памяти усредненный расчет каждого из данных чертежей проходил около 1 с вместе с точным выявлением ширин линий. Также в результате апробации выявлено, что для обеспечения необходимой точности работы алгоритма требуется на вход подавать чертежи со сканированным разрешением от 600 dpi и средней шириной тонких линий от 5 пикселей.

На рис. 1 представлен пример работы реализации алгоритма, где изображены гистограммы, построенные для линейных объектов растровых изображений разных степеней зашумленности. Если реализовать данный алгоритм на более низкоуровневом языке программирования, то скорость работы увеличится в несколько раз.

#### **Заключение**

Разработанный алгоритм, предназначенный для анализа графических данных, дает на выходе две важные величины: ширина основной и ширина тонкой линий. Далее, отталкиваясь от этих двух значений, можно вывести основные пороговые значения, которые задаются в современных системах распознавания образов и обработки изображений человеком. Таким образом, данный алгоритм автоматизирует работу систем обработки изображений.

Точное и быстрое определение пороговых значений является важным этапом в системах обработки изображений. От этих значений будут зависеть процедуры анализа изображения более высокого уровня, такие как распознавание графических образов в САПР. Разработанный алгоритм обладает всеми необходимыми характеристиками для успешной интеграции в САПР.

#### **Литература**

1. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004. – 928 с.
2. Москаленко С.В., Гатчин Ю.А. Волновой алгоритм векторизации линейных растровых изображений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 51.
3. Feng Su, Jiqiang Song, Shijie Cai. A Vectorization System for Architecture Engineering Drawings // GREC. – 2005. – P. 11–22.
4. Tombre Karl. Analysis of Engineering Drawings: State of the Art and Challenges, Selected Papers from the Second International Workshop on Graphics Recognition, Algorithms and Systems. – 1997, August 22–23. – P. 257–264.
5. Dori D., Liu W. and M. Peleg. How to Win a Dashed Line Detection Contest // In: Graphics Recognition: Methods and Applications, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 1996. – V. 1072.
6. ГОСТ 2. 303-68. Линии. – Введ.01.01.71. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 6 с.
7. Bresenham J.E. Algorithym for Computer Control and Digital Plotter // IBM Syst. J. – 1965, April. – V. 4. – № 1. – P. 25–30.

**Гатчин Юрий Арменакович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, gatchin@mail.ifmo.ru

**Москаленко Станислав Владимирович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, stan.moskalenko@gmail.com

УДК 53.084.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗОНДОВ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА НА ВИЗУАЛИЗАЦИЮ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А.В. Стовпяга, И.Н. Лобова

Проведен качественный анализ изображений рельефа поверхности биологических объектов (эритроцитов), получаемых с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) при использовании зондов различного типа с различными геометрическими параметрами. Прослежено влияние геометрических параметров зондов на СЗМ-изображения образцов и определен ориентировочный критерий отбора зондов для исследования эритроцитов.

**Ключевые слова:** сканирующая зондовая микроскопия, растровая электронная микроскопия, нанопипетка, нанозонды, анализ изображений.

### Введение

Одним из основных инструментов нанотехнологий является сканирующая зондовая микроскопия [1, 2], объединяющая широкий спектр современных средств исследования и модификации поверхностей различных материалов, в том числе и биологического происхождения, например, эритроцитов. В последнем случае существует потребность применения универсальных зондов, в частности, нанопипеток [3], дающих возможность одновременно исследовать рельеф поверхности биообъектов, картировать их жесткость и мембранную проводимость в режиме ионных токов. В данной работе производился сравнительный анализ СЗМ-изображений, полученных при использовании нанопипетки, а также вольфрамового и кремниевого зондов.

### Объект, оборудование и методика исследования

Объектом исследования являлись эритроциты, нанесенные на стеклянную подложку. В качестве эталона для калибровки СЗМ и оценки соответствия полученных изображений поверхности реального объекта применялась калибровочная мера в виде периодической двумерной решетки (TGT-решетка фирмы NT-MDT) (рис. 1). Размер решетки – 5×5 мм, наибольшее расстояние между двумя соседними конусными пиками  $3\pm 0,05$  мкм, высота пика 0,3–0,5 мкм, радиус закругления острия пика около 10 нм.

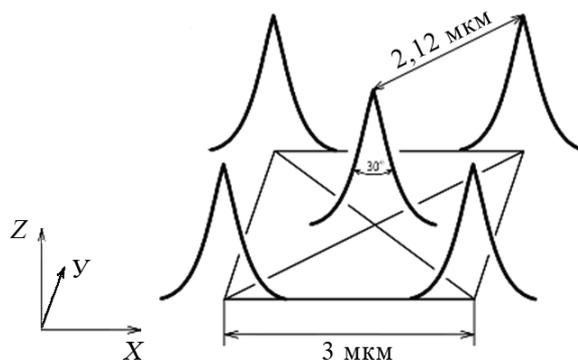


Рис. 1. Схема TGT-решетки

В процессе исследований использовались растровый электронный микроскоп (РЭМ) «Inspect», СЗМ «NTEGRA Aura» и СЗМ «NANOEDUCATOR».

В случае СЗМ, как известно, сканирование осуществляется острым твердотельным зондом (радиус закругления зонда 10–100 нм), а РЭМ позволяет визуализировать поверхность образца за счет ее сканирования электронным зондом диаметром 5–10 нм.

Методика проведения исследования включала следующие этапы:

- калибровка РЭМ с помощью калибровочной меры (TGT-решетки);
- определение геометрических параметров зондов для СЗМ с помощью РЭМ;
- калибровка СЗМ с помощью TGT-решетки с использованием зонда в виде кремниевого кантилевера на СЗМ «NTEGRA Aura» и зондов в виде вольфрамового острия и стеклянной нанопипетки, закрепленных на пьезорезонансном датчике СЗМ «NANOEDUCATOR» [4, 5];
- получение и анализ изображений поверхности эритроцитов с использованием кремниевого зонда СЗМ «NTEGRA Aura», вольфрамового зонда и нанопипетки на СЗМ «NANOEDUCATOR».

### Калибровка РЭМ

На рис. 2 представлено изображение пиков TGT-решетки, полученное с помощью РЭМ «Inspect». Расстояния между соседними пиками составляет 3 мкм, что соответствует паспортным данным.

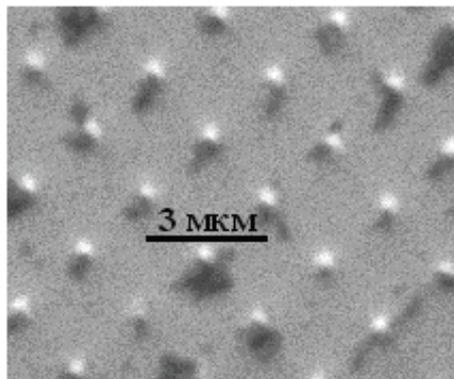


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение TGT-решетки (РЭМ «Inspect»)

### Определение геометрических параметров зондов

- С помощью РЭМ определены геометрические параметры нанопипетки и вольфрамового острия:
- радиус острия нанопипетки около 286 нм с углом при вершине около  $12^\circ$  (рис. 3);
  - радиус острия вольфрамового зонда около 57 нм с углом при вершине около  $11^\circ$  (рис. 4).

Параметры кремниевого зонда взяты из паспортных данных: радиус острия – 10 нм, угол при вершине – не более  $10^\circ$ .

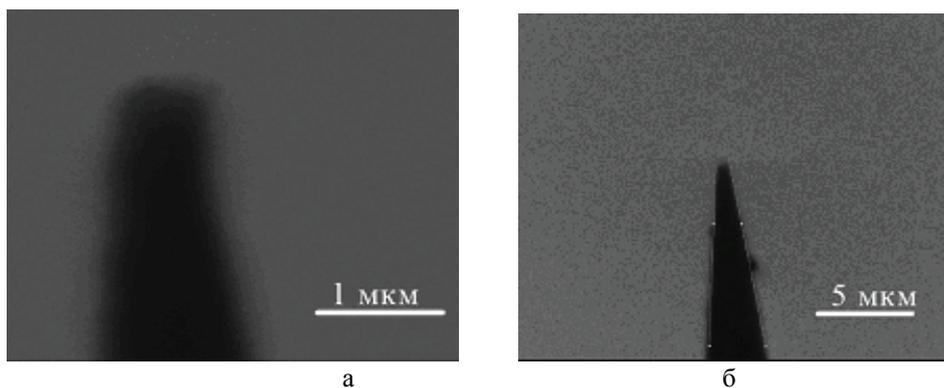


Рис. 3. Электронные микрофотографии нанопипетки (РЭМ «Inspect»): а) радиус вершины около 286 нм; б) угол при вершине около  $12^\circ$

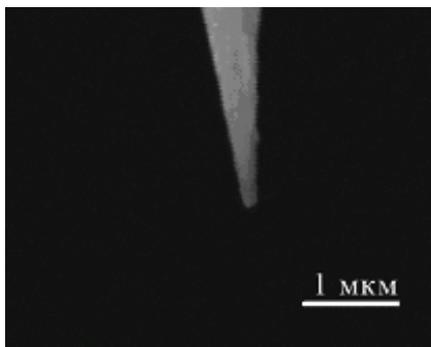


Рис. 4. Электронные микрофотографии вольфрамового зонда (РЭМ «Inspect»). Радиус закругления при вершине около 57 нм, угол при вершине около  $11^\circ$

Чем меньше радиус и угол при вершине острия, тем, как известно, лучше пространственное разрешение СЗМ и тем больше соответствие получаемых СЗМ-изображений реальному рельефу поверхности сканируемых объектов. Как следует из приведенных данных, наилучшим разрешением обладает кремниевый зонд. Ниже будет проведено сравнение результатов исследования поверхности эритроцитов, полученных с использованием различных зондов.

## Калибровка СЗМ

На рис. 5 представлены результаты калибровочного сканирования остроконечных пиков TGT-решетки с помощью кремниевого зонда. Расстояния между соседними пиками после проведения калибровки стали близки к паспортным данным TGT-решетки. В процессе процедуры калибровки определялась чувствительность микросканера СЗМ. Адекватность процесса калибровки подтверждается соответствием периода на СЗМ-изображении и паспортными данными для периода TGT-решетки.

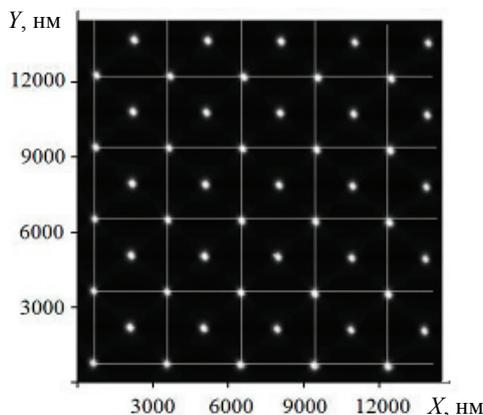


Рис. 5. СЗМ-изображения TGT-решетки, полученные кремниевым зондом

На рис. 6 представлены 3D-изображения остроконечных пиков TGT-решетки, полученные с помощью кремниевого зонда (СЗМ «NTEGRA Aura»), вольфрамового зонда и зонда в виде нанопипетки (СЗМ «NANOEDUCATOR»). Поскольку радиус закругления вершин остроконечных пиков TGT-решетки меньше, чем характерный размер вершин вольфрамового острия и нанопипетки, то на СЗМ-изображениях, представленных на рис. 6, а, б, в, фактически наблюдается периодически повторяющийся рельеф вершин используемых зондов. Из рис. 6, а, б, в, видно, что наименьший радиус, как и ожидалось, имеет кремниевый зонд, а наибольший характерный размер при вершине имеет стеклянная нанопипетка. Кроме того, следует отметить, что в случае со стеклянной нанопипеткой на СЗМ-изображении (рис. 6, в) можно обнаружить раздвоение пиков, связанное с наличием внутреннего отверстия в нанопипетке. В этом случае нанопипетка в процессе сканирования взаимодействует с вершиной пика TGT-решетки одним краем отверстия, затем проваливается в отверстие и после этого взаимодействует с вершиной пика другим краем.

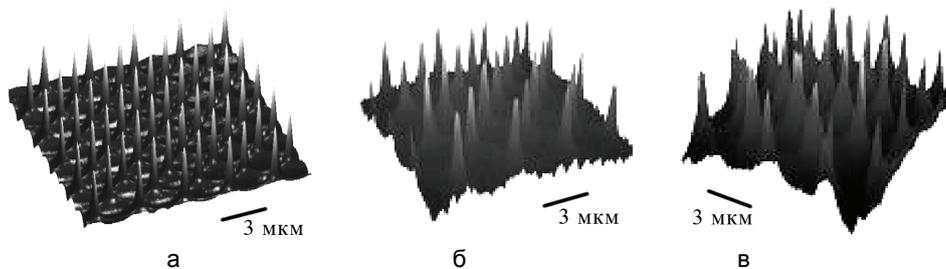


Рис. 6. 3D-изображения TGT-решетки: а) кремниевый зонд (СЗМ «NTEGRA Aura»); б) вольфрамовый зонд; в) нанопипетка (СЗМ «NANOEDUCATOR»)

Полученные 3D-изображения вершин нанозондов подчеркивают решающее влияние геометрических параметров зондов на качество СЗМ-изображений. В случае использования кремниевого зонда все пики имеют остроконечные вершины. Сканирование вольфрамовым зондом (менее острым, чем кремниевый) сглаживает изображение пиков TGT-решетки, так как радиус вольфрамового зонда больше, чем радиус пиков решетки, а использование нанопипетки приводит к раздвоению острых пиков на СЗМ-изображении.

## Получение и анализ изображений поверхности эритроцитов

Как и ожидалось, лучшие изображения поверхности эритроцитов получены на СЗМ «NTEGRA Aura» с помощью кремниевого зонда с оптической схемой регистрации отклонения кантилевера (рис. 7, а). В случае вольфрамового зонда с пьезорезонансным датчиком силового взаимодействия (СЗМ «NANOEDUCATOR») наблюдается менее точная визуализация рельефа (рис. 7, б), которая, однако, позволяет производить картирование локальной жесткости поверхности эритроцита. При использовании этого же пьезорезонансного датчика с зондом в виде стеклянной нанопипетки (рис. 7, в) наблюда-

лись наибольшие искажения при визуализации поверхности эритроцитов, что вызвано как большим радиусом острия нанопипетки, так и наличием в ней отверстия. Вместе с тем зонд-нанопипетка дает правильную информацию о размерах и средней топографии клетки.

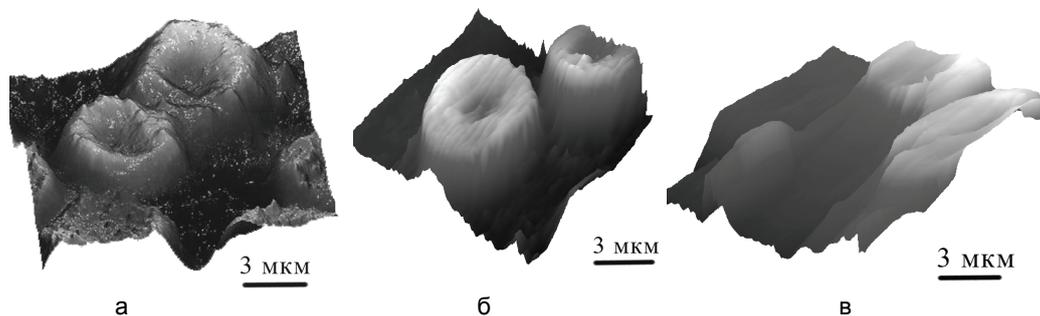


Рис. 7. СЗМ-изображения эритроцитов: а) кремниевый зонд (СЗМ «NTEGRA Aura»); б) вольфрамовый зонд, в) нанопипетка (СЗМ «NANOEDUCATOR»)

### Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- наиболее подробные и точные сведения о размерах, форме и рельефе поверхности эритроцитов получаются при использовании кремниевых зондов с оптической схемой регистрации отклонения кантилевера;
- вольфрамовый зонд с пьезорезонансным датчиком и большим радиусом вершины, чем у кремниевого, позволяет очертить внешние границы и рельеф эритроцитов менее точно и с меньшим количеством разрешаемых деталей рельефа;
- зонд с пьезорезонансным датчиком силового взаимодействия, несмотря на сложную форму в виде цилиндра с внутренним отверстием, позволяет получить информацию о размерах и усредненной топографии поверхности эритроцитов.
- зонд в виде стеклянной нанопипетки представляет особый интерес в связи с возможностью проведения СЗМ-исследований в жидкости с одновременным измерением как топографии поверхности, так и карты распределения ионных токов.

Качественный анализ полученных в данной работе результатов позволяет сделать вывод о том, что для визуализации рельефа эритроцитов с помощью СЗМ с зондом в виде нанопипетки целесообразно применять нанопипетки с параметрами не хуже, чем у использованного в работе вольфрамового зонда. Исследования эритроцитов с применением в СЗМ универсального зонда-нанопипетки с достаточным пространственным разрешением возможны при радиусе вершины зонда не более 60 нм. Данную величину можно рассматривать как ориентировочный критерий отбора нанопипеток по геометрическим параметрам.

Работа выполнена в рамках реализации и при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (НК-556П/89, ГК П557).

### Литература

1. Binning G., Quate C.F. Atomic Force Microscope // *Physical Review Letters*. – 1986. – V. 56. – № 9. – P. 930–933.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М.: Техносфера, 2005. – 144 с.
3. Shevchuk A., Frolenkov G., Sanchez D., James P.S. Imaging Protein in Membranes of Living Cells by High-Resolution Scanning Ion Conductance Microscopy // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* – 2006. – V. 45(14). – P. 2212–2216.
4. Быков В.А., Васильев В.Н., Голубок А.О. Учебно-исследовательская мини-лаборатория по нанотехнологии на базе сканирующего зондового микроскопа «НАНОЭДЬЮКАТОР» // *Российские нанотехнологии*. – 2009. – Т. 4. – № 5–6. – С. 45–47.
5. Голубок А.О., Васильев А.А., Кerpелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д. Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // *Научное приборостроение*. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 62–69.

**Лобова Инна Николаевна**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, inna\_kurchatov@mail.ru

**Стовпяга Александр Владимирович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanja100v@mail.ru

## 8

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.491, 004.056.5

**ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
В ОТКРЫТЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ  
БИЗНЕС-СРЕДАХ**

А.В. Маслобоев

Рассмотрены основные проблемы и виды угроз информационной безопасности открытых проблемно-ориентированных распределенных мультиагентных информационных систем. Предложены различные подходы к обеспечению информационной безопасности в открытых мультиагентных виртуальных бизнес-средах, основанные на реализации системы с централизованным и децентрализованным управлением безопасностью мобильных агентов, а также имитационном моделировании поведения их активных программных компонентов (агентов). Разработаны принципы функционирования и общая структура системы информационной безопасности в открытой мультиагентной виртуальной бизнес-среде (ОМABBC) развития инноваций.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, распределенные мультиагентные системы, виртуальная бизнес-среда, имитационное моделирование.

**Введение**

Актуальность исследований в области распределенного искусственного интеллекта и мультиагентных систем (МАС), согласно работе [1], определяется сложностью современных организационных и технических систем, разнообразием, сложностью и распределенностью решаемых задач, огромными объемами потоков информации и высокими требованиями к времени обработки информации. Теоретические исследования в области МАС ведутся в основном по следующим направлениям: теория агентов; коллективное поведение агентов; архитектура агентов и МАС; методы, языки и средства коммуникации агентов; языки реализации агентов; средства поддержки миграции агентов по сети. Наибольшую сложность в теоретических исследованиях и практических реализациях современных МАС представляют вопросы, связанные с обеспечением информационной безопасности агентов и информационных ресурсов, которыми они оперируют, в открытых мультиагентных виртуальных средах. Обеспечение информационной безопасности является важной задачей, которую необходимо решать при разработке МАС, ориентированных на использование в различных областях.

**Проблематика и угрозы информационной безопасности в открытых МАС**

Проблема обеспечения информационной безопасности в МАС может быть рассмотрена в нескольких аспектах. Во-первых, необходимо обеспечить защиту узлов сети от скрытых атак вредоносных программ или агентов-шпионов. Во-вторых, требуется обеспечить защиту самих агентов от воздействия приложений, запущенных на узлах сети. В-третьих, необходимо обеспечить защиту агентов МАС от атак агентов-шпионов, мигрирующих между узлами сети. Первая проблема – защита узлов от атак агентов-шпионов – может быть успешно решена посредством применения методов жесткой аутентификации исполняемого программного кода агентов, контроля целостности кода программ-агентов и ограничения прав доступа либо к самим программам-агентам, либо к информации или сервисам, которые они предоставляют. Вторая проблема – информационная безопасность агентов – является одной из основных нерешенных на сегодняшний день задач. Причиной этому является существование большого множества вредоносных программ, которые могут несанкционированным образом воздействовать на процесс функционирования агентов и манипулировать конфиденциальной информацией, которой оперируют агенты. Решение третьей проблемы основывается на создании специальных протоколов безопасности обмена сообщениями между агентами в мультиагентной среде.

К основным угрозам информационной безопасности распределенных МАС относятся: несанкционированный пассивный перехват сообщений в процессе межагентных коммуникаций, нарушение целостности передаваемых по сети данных, несанкционированный доступ к данным, отказ в обслуживании (DDoS-атаки), перехват запросов с последующей их модификацией и воспроизведением, отказ от факта получения или отправления данных и т.д. Децентрализованный характер построения распределенных МАС, отсутствие единого центра, гетерогенность компонентов, потенциальная возможность коммуникации с любым узлом делают мультиагентную среду максимально уязвимой для любого вида из перечисленных угроз.

## Существующие решения проблем информационной безопасности открытых МАС

Обеспечение информационной безопасности рассматриваемого класса систем может быть организовано в виде комплекса известных решений. Наиболее эффективными и гибкими на сегодняшний день методами решения задач обеспечения информационной безопасности агентов и МАС являются: 1) метод защищенных состояний агентов [2]; 2) методы мобильной криптографии [3]; 3) модель безопасности Ксюдонга (POM Security Model) [4]; 4) модель безопасности Бадди (Buddy Security Model) [5]; 5) методы организации систем доверительных самоорганизующихся отношений [6]; 6) методы, основанные на использовании алгоритмов конфиденциальной связи и прокси-сервера, выполняющего функции ограничения и разграничения доступа к ресурсам и сервисам на основе методов идентификации и аутентификации [7]. Несмотря на столь широкий спектр существующих решений, ни один из перечисленных подходов не обеспечивает комплексного решения проблем информационной безопасности агентов от воздействия вредоносных узлов и программ-шпионов в открытых МАС.

### Формальное представление ОМАВБС

В рамках настоящей работы решение проблемы информационной безопасности агентов и МАС рассматривается на примере задачи обеспечения информационной безопасности в ОМАВБС развития инноваций. С точки зрения общей логики функционирования виртуальная бизнес-среда имеет мультиагентную реализацию. Агентная ориентированность выражается в том, что в ней каждый реальный субъект инновационной деятельности представлен одним или несколькими мобильными программными агентами, которые представляют бизнес-предложения своих владельцев и реализуют процедуры автоматизированного поиска бизнес-партнеров для сотрудничества.

В общем случае модель ОМАВБС может быть задана в виде теоретико-множественных отношений и представляет собой следующий набор множеств:

$$OMAS = \{S, A, U, VBP, IR, O, ATR\},$$

где  $S$  – множество пользователей системы (субъектов бизнеса);  $A$  – множество агентов системы, представляющих интересы пользователей (их бизнес-предложения) в виртуальной бизнес-среде;  $U = \{SH, KH\}$  – множество узлов системы, на которых функционируют агенты, причем  $SH$  – множество серверных хостов, а  $KH$  – множество клиентских хостов;  $VBP$  – множество виртуальных бизнес-площадок (ВБП), в пределах которых объединяются агенты совместной деятельности с близкими интересами и целями;  $IR$  – множество информационных ресурсов системы;  $O$  – отношения на множествах объектов модели;  $ATR$  – множество атрибутов объектов модели.

В системе функционируют агенты  $A = \{MA, UA\}$  двух основных типов:  $MA$  – мобильные агенты, мигрирующие между узлами сети, и  $UA$  – управляющие агенты (агенты-модераторы), функционирующие в пределах ВБП и координирующие процессы взаимодействия и миграции мобильных агентов.

На множестве объектов модели могут быть заданы следующие отношения, определяющие структуру ОМАВБС:

$$O = \{SMA, SHVBP, MAVBP, UAVBP, UAMA\},$$

где  $SMA \subset S \times MA$  – отношение наличия у каждого субъекта бизнеса своего виртуального представителя – агента;  $SHVBP \subset SH \times VBP$  – отношение существования на каждом серверном узле системы ВБП;  $MAVBP \subset MA \times VBP$  – отношение существования на каждой ВБП агентов совместной деятельности с общими областями интересов;  $UAVBP \subset UA \times VBP$  – отношение принадлежности каждой виртуальной площадке своего управляющего агента (агента-модератора);  $UAMA \subset UA \times MA$  – отношение принадлежности каждому управляющему агенту множества агентов совместной деятельности, взаимодействие которых он координирует.

Каждый мобильный агент описывается следующим набором параметров:

$$MA = \{ID_{MA}, ID_{MP}, ST, D_{MA}, SS\},$$

где  $ID_{MA}$  – уникальный идентификатор мобильного агента;  $ID_{MP}$  – уникальный идентификатор серверного узла, с которого мигрирует мобильный агент;  $ST$  – множество состояний мобильного агента;  $D_{MA} \subset IR$  – множество данных, которыми оперирует мобильный агент;  $SS = \{P, OK, ZK\}$  – внутренняя система безопасности мобильного агента;  $P$  – множество криптографических методов шифрования данных с открытым и/или закрытым ключом;  $OK$  – открытый ключ, известный только мобильному агенту и его управляющему агенту (частота обновления открытых ключей мобильных агентов определяется управляющим агентом);  $ZK$  – закрытый (секретный) ключ, известный только мобильному агенту (частота обновления секретного ключа определяется мобильным агентом), которым он подписывает свои запросы и данные.

### Решение задачи обеспечения информационной безопасности в ОМABBC

Новизна предлагаемого в настоящей работе решения задачи обеспечения информационной безопасности в открытых распределенных МАС заключается в комбинации двух подходов к формированию ОМABBC, предложенных в работах [8, 9].

Первый подход основан на концепции закрытой сети «Closed Network» и заключается в формировании в мультиагентной виртуальной бизнес-среде независимых друг от друга агентных платформ (виртуальных площадок) на основе технологии [8], в пределах которых функционируют агенты с близкими интересами и целями (объединение агентов по интересам в закрытые «частные» группы), а также использовании метода защищенных состояний агентов [2] для предотвращения скрытых атак вредоносных программ и агентов-шпионов. Формирование ВПБ основано на методе поддержки распределенного реестра одноранговых узлов с неявной древовидной организацией [10] и осуществляется посредством отображения целей агентов на древовидные концептуальные модели предметной области. При этом ВПБ может представлять собой либо выделенный узел в сети, либо группу узлов, образующих закрытую частную подсеть, либо часть адресного пространства агентного представительства (частная группа агентов по интересам), реализованного на каком-либо из узлов системы.

Предложенный второй подход, предпосылки которого изложены в работе [9], предполагает реализацию в открытой мультиагентной среде специализированного программного компонента – системы безопасности мобильных агентов (СБМА), обеспечивающей реализацию криптографических методов и механизмов защиты агентов системы от различного типа компьютерных атак со стороны вредоносных программ, а также использующей средства имитационного моделирования для анализа, прогнозирования и исследования динамики поведения агентов системы. В качестве средств моделирования могут быть использованы комплексы системно-динамических или агентных моделей. Для расширения функциональных возможностей СБМА в ее состав интегрированы разработанные специальные программные компоненты, обеспечивающие поддержку межагентного взаимодействия и самоорганизации агентов, а также реализующие механизмы защиты агентов системы от различного типа компьютерных атак со стороны вредоносных программ. К этим компонентам относятся: 1) реестр серверов; 2) сервер имен агентов; 3) сервер открытых ключей шифрования; 4) модуль шифрования данных; 5) специальный реестр «доска объявлений»; 6) система управления агентами. Реестр серверов содержит информацию о функционирующих узлах системы, а также контролирует подключение новых узлов и появление новых агентов в системе. Сервер имен агентов накапливает информацию об агентах системы. Формирование и поддержание распределенного реестра агентов осуществляется на базе их привязки к древовидным концептуальным моделям предметной области. Сервер открытых ключей совместно с модулем шифрования данных представляет собой ядро системы информационной безопасности агентов, агентных представительств и узлов системы. В нем реализуются процедуры идентификации и аутентификации агентов, а также криптографические методы защиты информации с открытым ключом. Сервер ключей хранит набор индивидуальных открытых ключей для шифрования информации, которой оперируют агенты системы при взаимодействии друг с другом и с приложениями, запущенными на узлах сети. В данной работе в качестве метода шифрования информации открытым ключом предложено использовать классический криптографический алгоритм асимметричного шифрования с открытыми ключами RSA и его модификации. Для обеспечения целостности и конфиденциальности своих запросов и защиты информации о бизнес-предложениях своих владельцев агенты используют электронную подпись и известные методы шифрования закрытым ключом. Специальный реестр «Доска объявлений» содержит информацию обо всех ВПБ, зарегистрированных в системе, и входящих в их состав коалиций агентов. СБМА интегрируется с системой управления агентами, представляющей собой совокупность программных компонентов, реализующих внутреннюю логику функционирования и взаимодействия агентов, протоколы межагентных коммуникаций.

### Логика функционирования СБМА

В ходе исследования предложены два варианта реализации СБМА: система с централизованным управлением безопасностью мобильных агентов и система с децентрализованным управлением безопасностью мобильных агентов.

В случае использования системы с централизованным управлением безопасностью мобильных агентов, СБМА в ОМABBC реализуется на выделенном сервере. Сервер безопасности мобильных агентов обеспечивает централизованное хранение информации об агентах системы, доступных узлах, ВПБ, открытых ключах агентов, доступ к которым имеют только управляющие агенты системы. Здесь же реализуются модули шифрования и дешифрования данных, а также система мониторинга, анализа и моделирования поведения агентов системы, которая также доступна управляющим агентам системы. Архитектура и логика функционирования ОМABBC при таком подходе к реализации СБМА представлены на рис. 1.

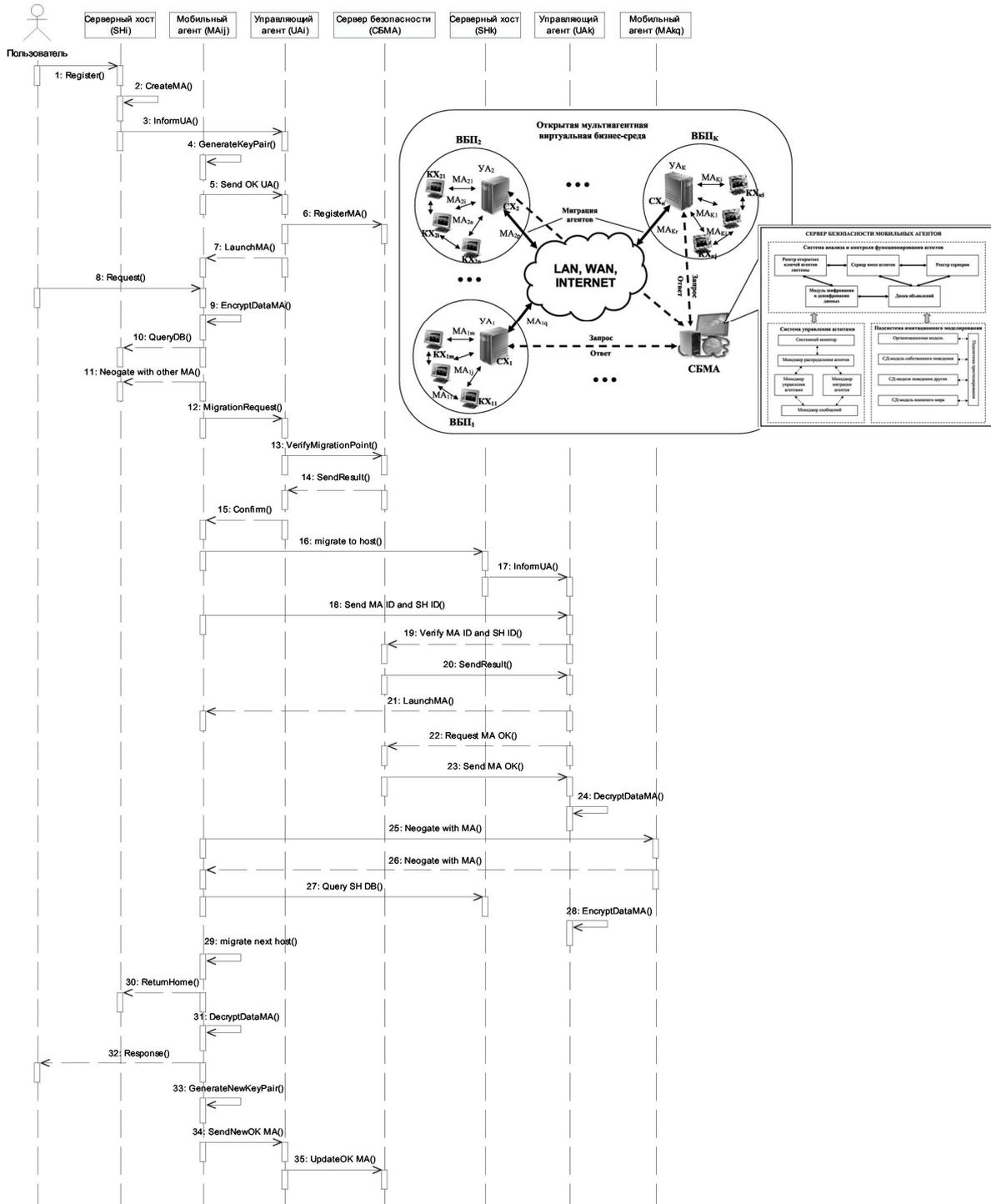


Рис. 1. Архитектура и логика функционирования OMABCS с системой централизованного управления безопасностью мобильных агентов

В случае использования системы с децентрализованным управлением безопасностью мобильных агентов СБМА в OMABCS реализуется на каждом из серверных узлов системы (порталов), на которых пользователи регистрируют свои бизнес-предложения. При таком решении СБМА является частью агентного представительства серверного узла и выполняет те же функции, что и сервер безопасности мобильных агентов: хранит информацию об агентах системы, доступных узлах, ВВП, открытых ключах агентов, доступ к которым имеют только управляющие агенты системы, реализует процедуры шифрования и дешифрования данных агентов, осуществляет мониторинг, анализ и моделирование поведения агентов системы. В этом случае часть функций по обеспечению безопасности возлагаются на управля-

щих агентов ВБП. Архитектура и логика функционирования ОМABС при таком подходе к реализации СБМА представлены на рис. 2.

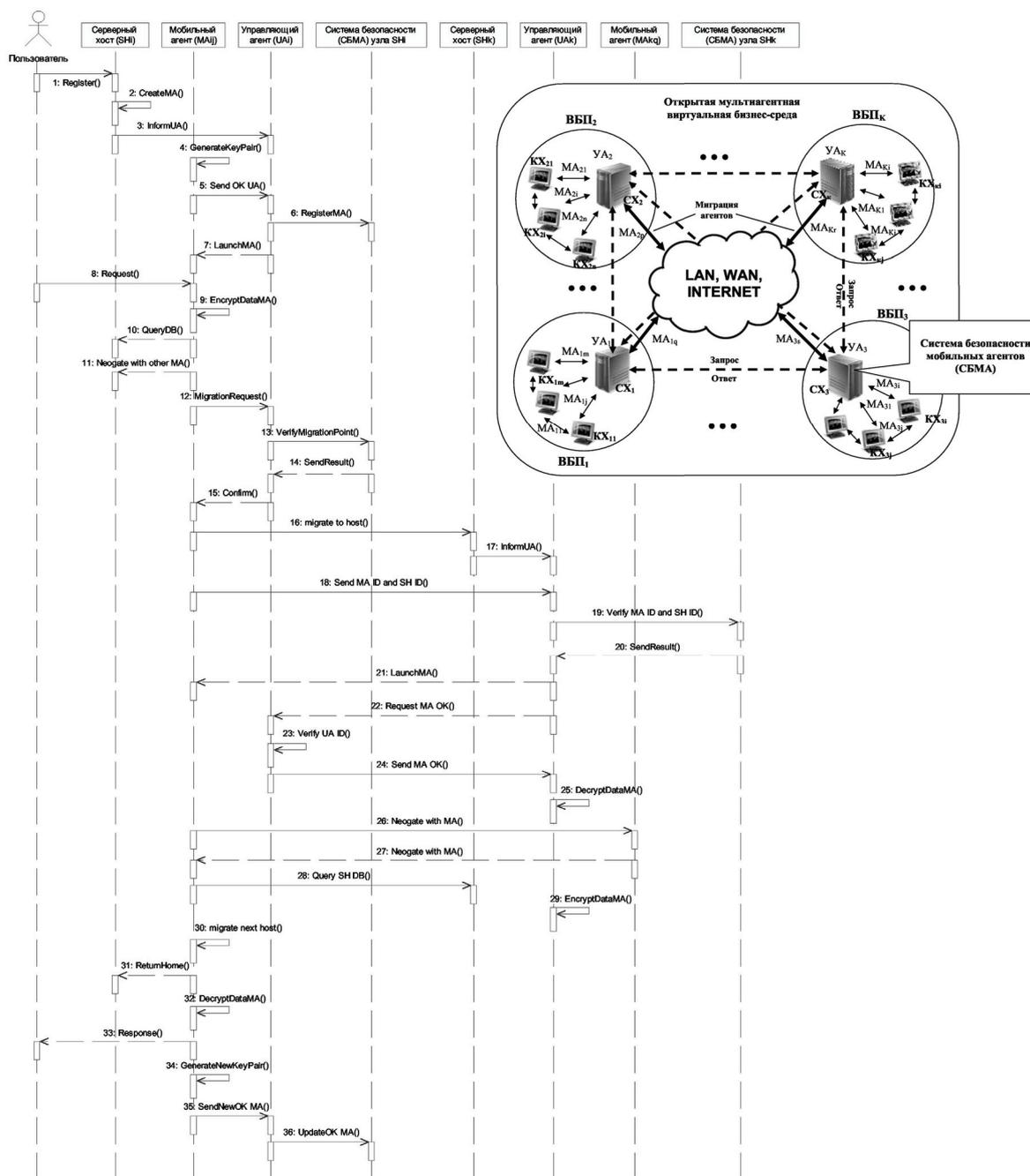


Рис. 2. Архитектура и логика функционирования ОМABС с системой децентрализованного управления безопасностью мобильных агентов

Очевидно, что реализация ОМABС с системой децентрализованного управления безопасностью (максимально возможный отказ от централизованных общесистемных сервисов обеспечения безопасности) повышает ее надежность и устойчивость к внешним и внутренним угрозам информационной безопасности, а также позволяет организовать эффективную защиту агентов и узлов системы от целенаправленного воздействия вредоносных программ и агентов-шпионов. Достоинствами данного варианта реализации СБМА, несмотря на достаточно высокую загрузку коммуникационных каналов и избыточность хранимых данных, являются также гибкость, адаптируемость и распределение нагрузки по обеспечению информационной безопасности между серверными узлами системы и управляющими агентами.

Несмотря на ряд достоинств системы с централизованным управлением безопасностью, также присущим распределенным информационным системам с централизованной архитектурой, можно отметить основные проблемы систем подобного типа, к которым можно отнести: 1) уязвимость центрального

звена (при отказе сервера безопасности нарушается защита активных компонентов и всей системы в целом, ее безопасность ставится под угрозу); 2) высокая нагрузка на центральный сервер управления безопасностью при большом количестве агентов и узлов и, как следствие – ограниченная масштабируемость; 3) централизованное администрирование, которое подразумевает полный контроль над ресурсами на стороне сервера, что не всегда приемлемо, если ресурсы принадлежат разным пользователям.

### **Заключение**

В ходе проведенных исследований проанализированы основные проблемы и виды угроз информационной безопасности открытых проблемно-ориентированных распределенных мультиагентных информационных систем. Разработаны принципы функционирования и общая структура системы информационной безопасности в ОМАВБС. Предложены различные подходы к обеспечению информационной безопасности в ОМАВБС, основанные на реализации системы с централизованным и децентрализованным управлением безопасностью, а также имитационном моделировании поведения их активных компонентов (агентов). Предложенные подходы составляют основу подсистемы информационной безопасности, реализованной в виде комплекса программ в рамках системы информационной поддержки инновационной деятельности, представляющей собой ОМАВБС инноваций. Мобильные программные агенты и предложенные механизмы управления информационной безопасностью реализованы в программной инструментальной среде разработки агентов и MAC JADE (Java Agent Application Environment).

### **Литература**

1. Рыбина Г.В., Паронджанов С.С. Модели, методы и программные средства поддержки взаимодействия интеллектуальных агентов // Информационные технологии и вычислительные системы. – М.: УРСС, 2008. – Вып.3. – С. 22–29.
2. Neeran K.M., Tripathi A.R. Security in the Ajanta MobileAgent System // Technical Report. – Department of Computer Science, University of Minnesota, May 1999.
3. Sander T., Tschudin Ch.F. Protecting MobileAgents Against Malicious Hosts. In Giovanni Vigna (ed.) // MobileAgents and Security, LNCS, Springer, 1998. – P. 44–60.
4. Xudong G., Yiling Ya., Yinyuan Y. POM-a mobile agent security model against malicious hosts // Proceedings of High Performance Computing in the Asia-Pacific Region. – 2000. – V. 2. – P. 1165–1166.
5. Page J., Zaslavsky A., Indrawan M. A Buddy model of security for mobile agent communities operating in pervasive scenarios // Proceeding of the 2<sup>nd</sup> ACM Intl. Workshop on Australian Information Security & Data Mining. – 2004. – V. 54.
6. Ramchurn S.D., Huynh D., Jennings N.R. Trust in multi-agent systems // The Knowledge Engineering Review. – Cambridge University Press New York, NY, USA, 2004. – V. 19. – Is. 1 (March 2004). – P. 1–25.
7. Min-Hui L., Chin-Chen Ch., Yan-Ren Ch. A fair and secure mobile agent environment based on blind signature and proxy host // Journal of Computer and Security. – 2004. – № 23(4). – P. 199–212.
8. Маслобоев А.В. Мультиагентная технология формирования виртуальных бизнес-площадок в едином информационно-коммуникационном пространстве развития инноваций // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 6(64). – С. 83–89.
9. Kannammal A., Iyengar N.Ch.S.N. A Framework for Mobile Agent Security in Distributed Agent-Based E-Business Systems // International Journal of Business and Information. – 2008. – V. 3. – № 1. – P. 129–143.
10. Путилов В.А., Шишаев М.Г., Олейник А.Г. Технологии распределенных систем информационной поддержки инновационного развития региона // Труды Института системного анализа РАН. – М.: УРСС, 2008. – Т. 39. – С. 40–64.

**Маслобоев Андрей Владимирович** – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук, доцент, докторант, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

УДК 004.55

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДОЙ**

А.В. Куркин, Т.В. Шеламова

Сформулирована необходимость автоматизации систем управления виртуальными образовательными средами (ВОС). Вследствие отсутствия автоматизированных систем управления (АСУ), отвечающих всем предъявленным требованиям и адаптированных для создания и функционирования ВОС – виртуального музея истории СПбГУ ИТМО (ВМУ), была разработана и предложена соответствующая модель АСУ ВОС.

**Ключевые слова:** информационные технологии, информационная образовательная среда, виртуальная образовательная среда, автоматизированная система управления, управляющий терминал, контент.

**Введение**

На современном этапе развития системы образования перед образовательными учреждениями стоит задача обеспечения оперативного и открытого доступа к информационным образовательным ресурсам, реализации образовательных и просветительных программ для повышения эффективности обучения, увеличения заинтересованности в учебе, возможности более рационально строить учебный процесс, посвящая больше внимания процессу передачи и получения знаний. Для реализации такой стратегии необходимо создание комплексной информационно-образовательной среды обучения на базе интегрированных программно-инструментальных средств. В качестве таких сред могут быть рассмотрены ВОС, создание и поддержка которых осуществляется посредством АСУ контентом данных сред.

При формировании ВОС встает ряд научно-технических задач, начиная с формирования инструментария и заканчивая формированием контента. Контент современного ресурса состоит из многих единиц хранения и включает в себя текстовые и мультимедиа документы. Создание АСУ ВОС рассматривается как сложная техническая задача, решение которой позволяет коренным образом модернизировать технологический базис системы образования. При анализе существующих АСУ отметим, что они имеют ряд недостатков и недостаточно адаптированы для построения ВОС. Таким образом, поставлена и решена задача разработки собственной системы управления, удовлетворяющей всем требованиям создания ВОС и условиям поддержки информационно-образовательного контента ВМУ.

**Виртуальная образовательная среда обучения и смешанное обучение**

Появление компьютерных и информационных технологий открыло возможности новой организации процесса обучения [1]. Электронные средства обучения на первых порах разрабатывались исключительно как локальные приложения. В настоящее время актуальным является создание информационно-образовательного пространства (ИОП) как пространства осуществления изменения личностных качеств людей в образовательных целях на основе использования современных информационных технологий. В условиях формирования глобального информационного пространства человеческого общества оно неизбежно приобретает смысл информационной системы, оптимальный процесс управления которой удовлетворяет таким критериям, как целенаправленность, быстрое действие, экономичность, самообучаемость и др. [2]. Непосредственное нахождение в образовательном пространстве осуществляется посредством информационно-образовательной среды – системно-организованной совокупности средств передачи данных, информационных ресурсов, протоколов взаимодействия, аппаратно-программного и организационно-методического обеспечения, ориентированной на удовлетворение образовательных потребностей пользователей [3]. Подобная среда должна включать в себя совокупность технических и программных средств хранения, обработки, передачи информации, обеспечивающую оперативный доступ к информации и создающую возможность для общения педагогов и обучаемых. Одной из таких информационно-образовательных сред является ВОС. ВОС – это программно-телекоммуникационная среда, обеспечивающая ведение учебного процесса, его информационную поддержку и документирование в сети Интернет. Первоначально ВОС были созданы для дистанционного обучения – целенаправленного процесса интерактивного (диалогового), асинхронного или синхронного взаимодействия преподавателя и обучаемого между собой и со средствами обучения, индифферентного к их расположению в пространстве и времени. Однако такое обучение имеет и ряд недостатков, например, отсутствие социального контакта с другими участниками обучения, опасность неправильного толкования теоретического материала и необходимость высокого уровня самообучаемости обучаемых. Поэтому ВОС сейчас наиболее часто исполь-

зуются в дополнение к традиционным занятиям преподаватель/аудитория. Для обозначения этой модели обучения все чаще используется термин *blended learning* (смешанное обучение), совмещающее дистанционную форму обучения, очную и самоподготовку. Все компоненты данной формы обучения используются для достижения наибольшей эффективности учебного процесса.

### **Автоматизированная система управления ВОС**

Для обеспечения процесса создания, редактирования и управления контентом ВОС была поставлена цель: создать автоматизированную систему управления ВОС, не используя существующие бесплатные и коммерческие CMS (Content management system). В качестве АСУ ВОС рассмотрен управляющий терминал ВМУ – <http://museum.ifmo.ru>

CMS-система должна удовлетворять множеству критериев, таких как простота инсталляции, разделение администрирования и управления содержанием, модульность, безопасность, гибкость использования, масштабируемость, структурированность данных, поисковая оптимизация, ориентировка на web 2.0, практичность, уникальность, экономичность, и, главное, должна быть адаптирована к построению ВОС.

Проанализировав существующие на рынке коммерческие системы управления контентом, такие как «1С-Битрикс: Управление сайтом», «NetCat», «UMI.CMS», «HostCMS» и др., можно сделать вывод, что наиболее удовлетворяющими предъявленным требованиям являются системы «1С-Битрикс: Управление сайтом» и «NetCat», но их приобретение требует значительных финансовых затрат, что противоречит критерию экономичности [4]. Среди систем с бесплатной лицензией, например, PHP-Nuke, XOOPS, Drupal, Joomla, FREE CMS, Moodle и др., существуют системы, в полной мере удовлетворяющие отдельным предъявляемым критериям, но каждая из них имеет свою направленность, что, опять же, имеет свои недостатки.

Использование этих систем требует к себе большого внимания. Были выявлены следующие недостатки:

- необходимость обучения управлению этими системами;
- необходимость периодического обновления программного обеспечения;
- отсутствие возможности объединения с несколькими базами данных (БД) (объединение нескольких сайтов);
- работа с жесткими шаблонами дизайна;
- автоматическая вставка лишних ключевых слов для продвижения той или иной системы, что влияет на поисковые запросы и на индекс цитирования;
- отсутствие возможности работы с несколькими серверами для хранения информации;
- отсутствие механизма работы со сквозными таблицами;
- отсутствие возможности загрузки файлов на сервер для пользователей;
- недостаточная гибкость при создании разветвленной структуры разделов и страниц;
- невозможность использования кластерных технологий, что важно для разгрузки канала связи;
- неразвитый раздел администрирования курсов.

На основе анализа систем было принято решение разработать собственную систему управления контентом. Были определены основные преимущества разрабатываемого управляющего терминала:

- контроль прав внутри системы. Это означает, что можно назначить пользователей, которым доступны те или иные опубликованные документы;
- два вида авторизации – посредством web-сервера Apache и через web-интерфейс;
- разграничения прав доступа к управлению сайтом в зависимости от пользователя;
- разработка БД происходит на этапе проектирования АСУ, тем самым БД максимально адаптирована к алгоритму построения БД и не несет дополнительной нагрузки на аппаратные нагрузки сервера;
- проектирование базы данных и связей между ее таблицами выполняется в кратчайшие сроки, что увеличивает быстродействие системы;
- поэтапная публикация материала и возможность редактирования контента несколькими администраторами;
- интеграция контента и возможность перенести готовый контент в новое решение;
- настраиваемые деловые процессы и создание своих автоматизированных деловых процессов для конкретного контента (изображений, статей и др.);
- инструмент визуальной администратии, который позволяет пользователям, не прибегая к программированию, легко управлять контентом через панель управления (каждому полю присваивается логическое название) (рис. 1).
- модульная структура АСУ, которая позволяет модифицировать систему с наименьшими затратами и в кратчайшие сроки.



Рис. 1. Вид управляющего терминала

### Возможности автоматизированной системы управления ВОС

Система управления образовательной средой ВМУ предоставляет следующие возможности.

- Авторизованный доступ к администрированию сайта. Автоматическое отражение в навигационном меню сайта изменений, производимых любым из удаленных администраторов сайта. Происходит отображение даты внесения изменений, данных до и после изменений, идентификация пользователя в системе, что позволяет восстановить данные в случае необходимости.
- Публикация информации в режиме реального времени, удаленное редактирование с возможностью поэтапной модерации, т.е. при изменении информации и подтверждении ее главным администратором (редактором) информация публикуется на сайте.
- Работа с разнотипными мультимедиа материалами (текст, таблицы, фото, аудио, видео).
- Возможность добавления интерактивных мультимедиа материалов, реализованных с помощью технологии Flash.
- Управление структурой сайта – создание новых рубрик и разделов. Все операции управления сайтом происходят через стандартный браузер без применения специализированных программ работы с файлами на сервере.
- Модульное создание различных функциональных типов страниц.
- Возможность упрощенной установки перекрестных ссылок на любые внутренние документы сайта, что позволяет связывать документы сайта в единое целое, и формирование человеко-понятных ссылок.
- Автоматическое создание разделов сайта любого уровня вложенности, т.е. любая конечная страница в дальнейшем может иметь свои дочерние разделы.
- Авторизованное управление порядком отображения разделов в меню. Формирование строки статуса, основного меню с разными уровнями вложенности.
- Временное скрытие от посетителей страницы и раздела. Чаще всего это используется, когда для подготовки информации в разделе требуется продолжительное время, или при модерации информации.
- Удаление страницы и раздела с возможностью восстановления администратором. При этом всегда производится контроль содержимого раздела – можно удалить только раздел, не имеющий дочерних подразделов.
- Активация нового пользователя определенной группы (студент/преподаватель) может проходить только после проверки администратора (редактора) сайта.
- Сбор статистики о посещаемости различных страниц сайта и вывод самых посещаемых страниц.

### **Программное обеспечение системы управления контентом**

Для создания АСУ ВОС используются следующие средства: PHP, HTML, CSS, JavaScript, DOM, а также свободная система управления базами данных (СУБД) – MySQL.

Основой для реализации проекта является управляющий терминал для управления контентом, реализованный посредством языка HTML, сгенерированный серверным языком сценариев (PHP). Для хранения исходных данных используется СУБД MySQL, она обеспечивает легкость масштабирования, простоту в использовании, экономичность. На основе использования большого количества дополнительных модулей программы PHP моделируются и реализуются неординарные решения, такие как поддержка on-line мультимедийного содержимого, всевозможные манипуляции с растровыми изображениями форматов JPG, GIF, PNG, векторный Flash, документы PDF, RSS-каналы. Использование библиотеки каскадной таблицы стилей (CSS), Document Object Model – объектная модель документа (DOM) и объектно-ориентированного скриптового языка программирования (JavaScript), позволяют масштабировать документы в зависимости от используемых посетителем технологических платформ, а их корректное внедрение позволяет получить и отобразить информацию на экране как обычного монитора, так и карманного компьютера, и сотового телефона. В информационной системе использована модульная схема программирования на основе шаблонов, что позволяет минимизировать затраты на масштабирование и повторное использование кода, поэтому внедрение новых и обновление существующих модулей происходит безболезненно.

Данное сочетание программного обеспечения и реализация неординарных решений, необходимых для построения данной системы, просто в эксплуатации и позволяет достичь высоких показателей надежности и производительности информационной системы, компоненты которой легко переносимы с одной платформы на другую [5, 6].

### **Особенность автоматизированной системы управления контентом ВМУ**

Управляющий интерфейс к базе данных разработан по правилам разработки клиентских интерфейсов, для конечного пользователя работа прозрачна и осуществляется посредством браузера с предварительным входом в закрытую область портала. Общая концепция интерфейса управляющего терминала состоит в трехуровневой модели управления, т.е. на первом уровне пользователь выбирает нужный раздел, на втором уровне из списка элементов выбирается один для редактирования, а на третьем происходит редактирование отдельного элемента.

Визуальный редактор содержимого немногим отличается от работы в Word. Например, в управляющий терминал интегрирован визуальный редактор SKEditor, который позволяет редактировать текст, таблицы и добавлять фотографии. Особенностью данного редактора является кроссбраузерная работа – отсутствие всплывающих окон, что позволяет без настроек браузеров работать с данными. По сравнению с другими редакторами данный редактор имеет ряд преимуществ – совместим со всеми известными браузерами, обладает максимальным набором функций, возможностью настраивать набор тегов для редактирования текста.

Ввиду того, что управление информационно-образовательным контентом может осуществляться не только администратором, но и преподавателем, разработана специальная система разграничения доступа:

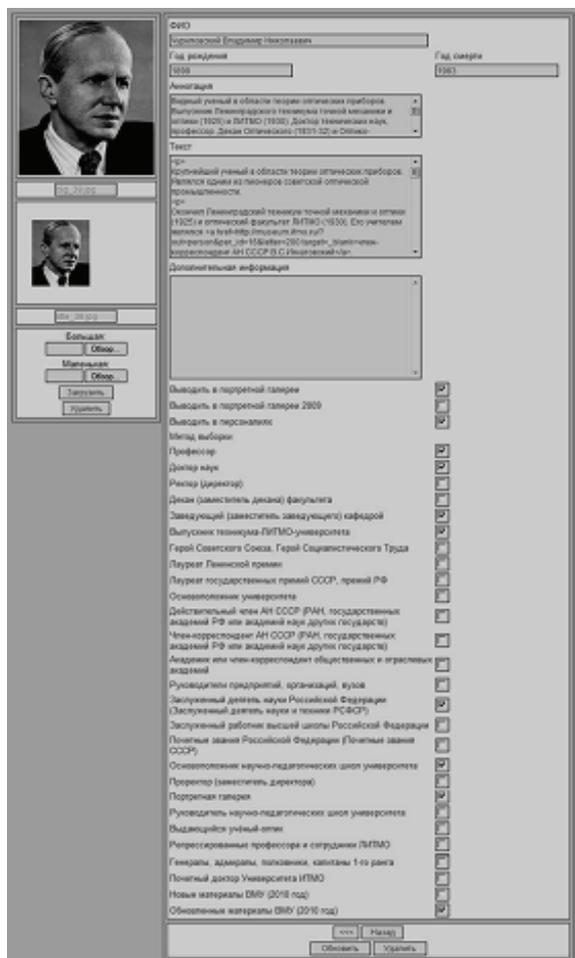
1. посредством web-сервера Apache. Администратор вводит логин и пароль в стандартную форму запроса безопасности сервера, после чего он получает доступ к системе управления сайтом, в случае неверного ввода блокируется доступ к содержимому терминала;
2. авторизация посредством стандартного web-браузера. Преподаватели получают доступ к редактированию и ведению курсов лекций через интерфейс, адаптированный для простейшего ввода данных, после соответствующей авторизации и получения доступа от администратора.

Выделим некоторые особенности модулей управляющего терминала. В разделе «Персоналии» для добавления новой единицы хранения вниманию пользователя предоставляются формы для заполнения данных. В текстовые поля вводится информация в произвольной форме согласно названию, указанному над формой, а из выпадающего списка выбирается необходимая информация (выборка), в окне с фотографией предлагается ввести файл в формате JPG (рис. 2, а). Особенностью данного модуля является формирование выборок по ранее определенным критериям. Также производится создание связей с другими разделами – осуществляется объединение баз данных ВМУ <http://museum.ifmo.ru/?out=pers> и Портала СПбГУ ИТМО [http://www.ifmo.ru/portret\\_gallery/](http://www.ifmo.ru/portret_gallery/), [http://www.ifmo.ru/rektors\\_gallery/](http://www.ifmo.ru/rektors_gallery/). Изменения в одной базе будут отображаться в другой.

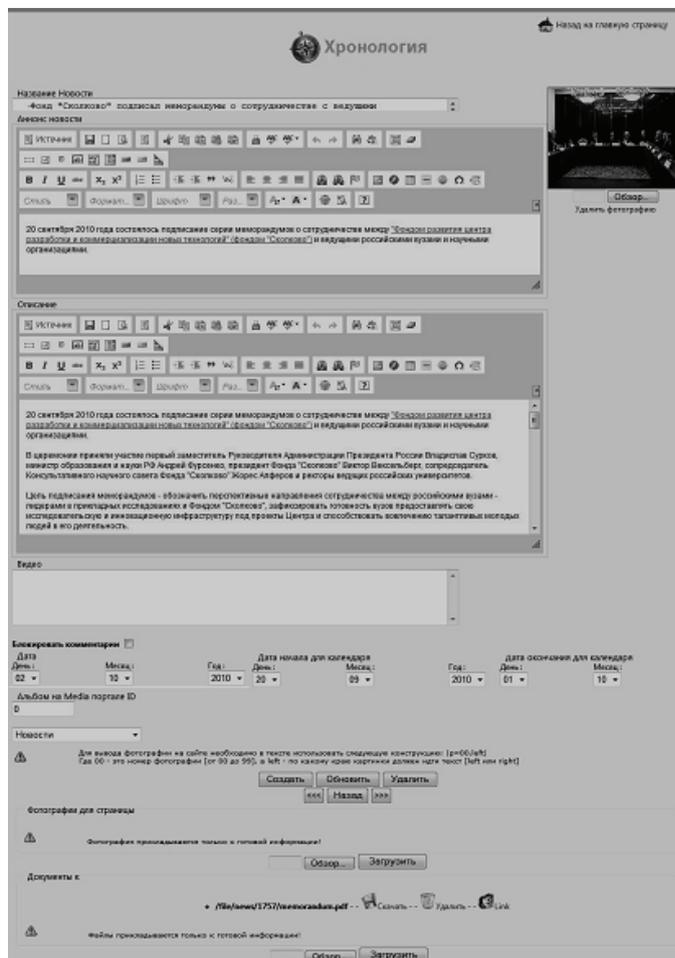
Наполнение раздела «Многотиражная газета (архив выпусков)» осуществляется путем добавления нужного номера газеты, выбором месяца, года, и пополнения файлами в форматах PDF и DjVu. Особенностью данного модуля является то, что информация хранится не только в базе данных, но и в информационном поле файлов, что позволяет маркировать файл, скачанный с сервера, информацией об авторах и

месте, откуда скачен. Хранение файлов осуществляется на нескольких серверах, что позволяет разграничить права доступа и разгрузить Интернет-трафик. В зависимости от размера файла система определяет, где необходимо хранить файл.

Модуль управление разделом «Хронология» выглядит так, как показано на рис. 2, б. В модуле реализован стандартный набор ввода текстовых и мультимедиа данных. В дополнение к этому разделу автоматически формируется календарь памятных событий и памятных дат.



а



б

Рис. 2. Модуль создания и редактирования в разделах: «Персоналии» (а); «Хронологии» (б)

В проекте реализована единая платформа с возможностью формирования облака тегов. Данное облако тегов универсально, прописывается в метаданных страницы, используется в ключевых словах поисковых запросов, что, в свою очередь, позволяет занимать топовые позиции в поисковых системах Интернет и облегчает работу пользователя с ВМУ при поиске информации. Также создан модуль с функциями информационного ресурса, обладающего возможностью разграниченного доступа для модерации контента. Преподавателям необходимо будет проходить регистрацию на сайте, и после авторизации появится возможность публикации лекций, включающих в себя текстовую и мультимедиа информацию. Материалы, введенные преподавателями, будут использоваться как на практических занятиях в аудиторные часы, так и самими студентами в удаленном доступе в зависимости от выбранной методики преподавания.

### Заключение

На основе анализа существующих систем управления контентом выделены их недостатки. Обоснована разработка собственной АСУ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к созданию и функционированию ВОС. Реализована модель многофункциональной, автоматизированной системы управления ВОС. На основе этой модели предложена и создана АСУ ВМУ, которая удобна и легка в использовании и представляет множество возможностей использования различного информационно-образовательного контента в учебном общеобразовательном процессе.

### Литература

1. Васильев В.Н., Локалов В.А., Никитин А.В., Тозик В.Т. О состоянии разработки и внедрения перспективных информационных и телекоммуникационных технологий в СПбГУ ИТМО. Аналитический доклад // Труды ВНИК с международным участием «Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования» (14–15 апреля 2010 г., Москва, НИТУ «МИСиС»). – М.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 36 с.
2. Богословский В.И. Наука в педагогическом университете: вопросы методологии, теории и практики / В.И. Богословский, В.А. Извозчиков, М.Н. Потемкин / Под ред. В.И. Богословского. – СПб: Изд-во СПб. ун-та, 2000.
3. Концепция создания и развития единой системы дистанционного образования в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://de.unicor.ru/science/groundwork/concept.html>, свободный. – Яз. рус. (дата обращения 15.09.2010).
4. Горнаков С.К. Осваиваем системы управления сайтом (CMS). – М.: ДИК Пресс, 2009. – 336 с.
5. Васильев В.Н., Колесников Ю.Л., Чуфаров Е.В., Шеламова Т.В., Щербакова И.Ю. Виртуальный музей университета как средство изучения истории оптического приборостроения и оптического образования // Оптический журнал. – 2005. – Т. 72. – № 3. – С. 69–73.
6. Колесников Ю.Л., Щербакова И.Ю., Куркин А.В. Разработка типового WEB-портала инновационной образовательной программы университета и внедрение его в условиях сетевой инфраструктуры университета // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 64. – С.112–117.

**Куркин Андрей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ведущий программист, аспирант, [kurkin@mail.ifmo.ru](mailto:kurkin@mail.ifmo.ru)

**Шеламова Татьяна Валентиновна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, [shelamova@bk.ru](mailto:shelamova@bk.ru)

УДК 334.012.64

**КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МАЛОГО БИЗНЕСА СМОЛЕНСКОЙ ОБЛАСТИ: ОТРАСЛЕВОЙ И КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ**

Е.В. Чугунова

Проводится отраслевой и кластерный анализ деятельности малого бизнеса (МБ) Смоленской области в сравнении с регионами Центрального Федерального округа (ЦФО) РФ. Выявляются тенденции возможной интеграции регионов ЦФО РФ в кластеры МБ по уровню их развития отдельных отраслей.

**Ключевые слова:** малый бизнес, кластер, регион, отрасль, анализ.

**Введение**

В динамично развивающихся странах, где взвешенная государственная политика поддержки бизнеса направлена на достижение социально-экономического роста, постепенно происходит процесс активного взаимодействия малых, средних и крупных предприятий. В Италии, например, обнаружилась общая закономерность, проявившаяся в наиболее успешном развитии сообществ малых предприятий (МП), сгруппированных на основе производственно-технологических, научно-технических и коммерческих связей в пределах географически ограниченных территорий. МБ играет важную роль в обеспечении стабильности экономического развития, повышении гибкости и адаптивности национальной экономики к изменяющимся внешним и внутренним условиям. Развитие его в кластере не просто повышает конкурентоспособность бизнеса, но и является важнейшим фактором развития инновационной экономики.

**Эволюционное развитие комплексобразования**

Понятие «кластер» было изучено известным ученым М. Портером [1] при исследовании условий развития и деятельности 100 наиболее конкурентоспособных группировок предприятий, расположенных в различных странах мира. Такие группировки предприятий одной отрасли формируются потому, что одна или несколько фирм, достигая конкурентоспособности на мировом рынке, распространяет свое влияние и деловые связи на ближайшее окружение, постепенно создавая устойчивую сеть из лучших поставщиков и потребителей. В свою очередь, успехи такого окружения оказывают положительное влияние на дальнейший рост конкурентоспособности всех участников этой группировки компаний. Эти образования и есть кластер. Такая совокупность, сочетая свойства отдельных ее элементов в процессе их взаимодействия, приобретает новые качества, которые особенно ярко и разносторонне проявляются в кластерах, образованных субъектами экономической деятельности.

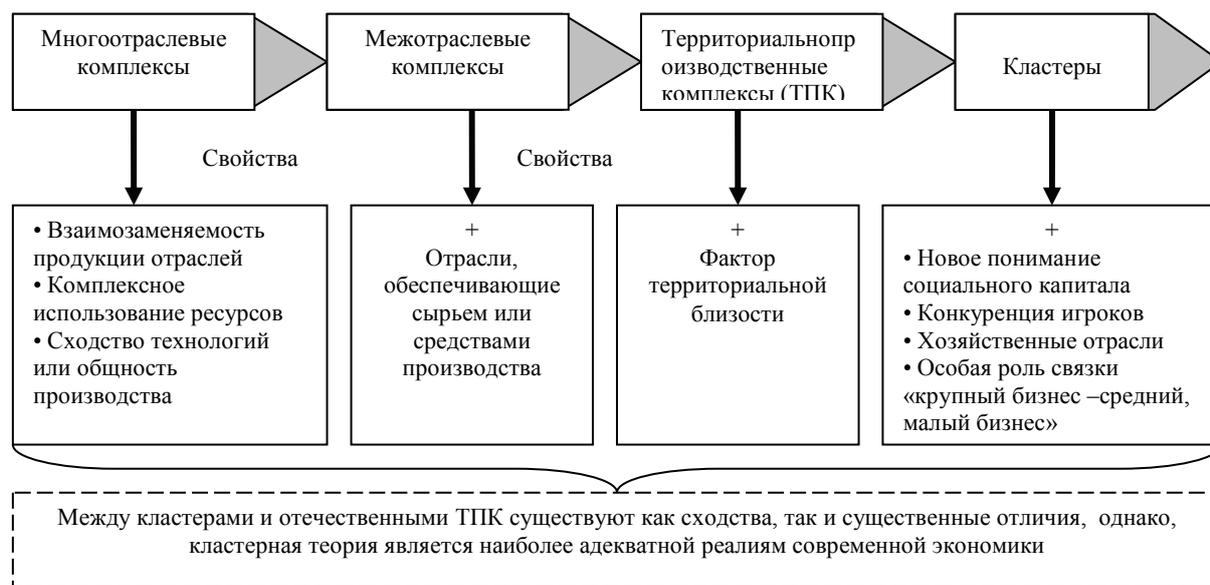


Рис. 1. Эволюционное развитие российского комплексобразования

В России в настоящее время процесс эволюции отрасли также приводит к возможности создания или расширения кластеров, которые выходят за отраслевые рамки и являются более мощной силой экономического развития. Этот процесс зависит от состояния рыночных отношений, от разнообразия предпринимательской среды, от уровня конкуренции, а также от государственной социально-экономической политики и стратегических направлений ее дальнейшего развития. Кластер вписывается в эволюционное развитие российского комплексобразования, добавляя к нему видение, соответствующее глобальному инновационному характеру современной экономики [2] (рис. 1).

Реализация кластерной политики уже в некоторых регионах РФ привело к росту конкурентоспособности бизнеса, в первую очередь, за счет реализации потенциала эффективного взаимодействия участников кластера, связанного с их географически близким расположением, включая расширение доступа к инновациям, технологиям, «ноу-хау», специализированным услугам и высококвалифицированным кадрам. Формирование и развитие кластеров стало эффективным механизмом привлечения прямых иностранных инвестиций и активизации внешнеэкономической интеграции.

**Предпосылки для формирования кластеров в регионе**

Так как отрасли-лидеры на базе не только крупного, но и малого бизнеса могут формироваться в кластеры, выявим предпосылки их формирования на территории Смоленской области с целью повышения конкурентоспособности бизнес-структур, а также возможность интеграции регионов ЦФО РФ по уровню развития МБ.

Три принципиальные характеристики, которые могут рассматриваться в качестве стартовых предпосылок для формирования кластеров, представлены на рис. 2.

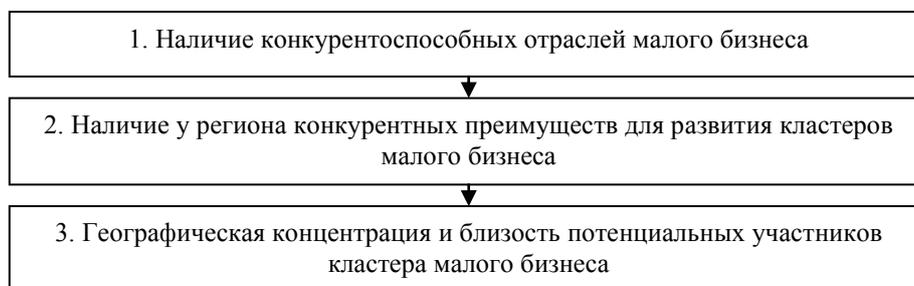


Рис. 2. Предпосылки для формирования кластеров МБ в регионе

Анализ выделенных предпосылок формирования кластера позволит выделить ведущие секторы, которые, как представляется, в ближайшей перспективе могут получить наиболее интенсивное развитие.

**Отраслевой анализ МБ регионов ЦФО РФ**

Ключевым условием для выявления и развития кластера является наличие конкурентоспособных отраслей МП на региональном рынке. Для этого необходимо проанализировать отраслевую структуру МБ регионов и выделить секторы экономики, показывающие наиболее высокую эффективность. Оценка перспективности отдельных отраслей МБ региона характеризуется показателями относительной концентрации (коэффициент локализации, душевого оборота и специализации). Если вышеуказанные коэффициенты равны или больше единицы, то можно делать вывод о наличии конкурентных преимуществ отраслей МБ. Объединение данных преимуществ создает возможность образования кластеров и будет способствовать повышению конкурентоспособности бизнеса и региона в целом. На основе обозначенных коэффициентов были выделены базовые отрасли, потенциально пригодные для объединения в кластер (табл. 1).

<b>Отрасли</b>	<b>Базовые (основные) отрасли МБ</b>
Обработывающие производства	Белгородская, Владимирская, Калужская, Костромская, Московская, Орловская, <b>Смоленская</b> , Тульская, Ярославская, Липецкая области
Строительство	Белгородская, Брянская, Московская, Тамбовская, Ярославская, Липецкая области
Оптовая и розничная торговля	Все регионы ЦФО РФ
Транспорт и связь	Рязанская, <b>Смоленская</b> , Тверская, Белгородская, Московская области
Операции с недвижимостью, аренда и предоставление услуг	г. Москва

Таблица 1. Концентрация отраслей МБ в регионах ЦФО РФ

Из табл. 1 видно, что в Смоленской области возможна интеграция отраслей взаимовыгодных МП в обрабатывающем производстве, транспорте и связи. Так как кластер носит в первую очередь промышленный характер, непроектная сфера деятельности МБ в данном аспекте рассматривается только как возможный дополнительный элемент кластера, но не как субъект отраслевого ядра.

Расчет отраслевых коэффициентов позволил выделить базовые отрасли специализации МБ в регионах, однако традиционное использование коэффициентов концентрации дает мало информации о региональных кластерах. Целесообразно прибегнуть к количественному методу кластерного анализа, который позволит выявить классификацию регионов по степени развития отраслей МБ с целью возможной дальнейшей интеграции этих регионов.

Так как Смоленская область – индустриально развитый старопромышленный регион, который специализируется именно на обрабатывающей промышленности, то интерес представляет раскрытие возможностей развития бизнес-структур, функционирующих в данной отрасли.

### Кластерный анализ МБ регионов ЦФО РФ

Для проведения кластерного анализа использовалась информационная база Госкомстата РФ, включающая следующие показатели развития малого бизнеса за 2007 год: число МП, средняя численность работников, оборот МП, инвестиции в основной капитал и среднемесячная заработная плата на МП [3]. Обработка вышеуказанных показателей проводится с использованием программного пакета STATISTICA 6.0.

Алгоритмы кластерного анализа разнообразны. Наиболее распространенными из них являются иерархические (деревообразующие) процедуры. Иерархические алгоритмы связаны с построением дендрограмм и делятся на агломеративные (характеризуемые последовательным объединением исходных элементов и соответствующим уменьшением числа кластеров) и дивизимные (число кластеров возрастает, в результате образуется последовательность расщепляющихся групп).

Проведем классификацию отрасли МП на основе агломеративного иерархического алгоритма. Показатели деятельности МП региона имеют разные величины измерения, поэтому для приведения их к одинаковым единицам необходимо сначала провести нормирование исследуемых показателей. В качестве метрики используем наиболее распространенное на практике обычное евклидово расстояние, а расстояние между кластерами определим по принципу «ближайшего соседа» (как минимальное расстояние между всеми возможными парами элементов из этих кластеров) (рис. 3). Преимущество данного принципа заключается в его математических свойствах: полученные результаты инвариантны к монотонным преобразованиям матрицы сходства [4].

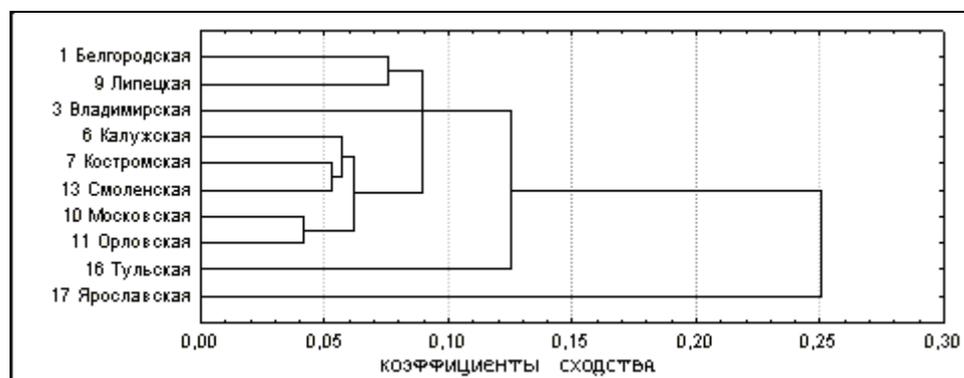


Рис. 3. Кластеризация регионов по принципу «ближайшего соседа»

Применению метода не мешает наличие «совпадений» в данных. Это означает, что метод одиночной связи является одним из немногих, результаты применения которых не изменяются при любых преобразованиях данных, оставляющих без изменения относительное упорядочение элементов матрицы сходства. Недостаток метода одиночной связи состоит в том, что он приводит к появлению «цепочек», т.е. к образованию больших продолговатых кластеров. По мере приближения к окончанию процесса кластеризации образуется один большой кластер, а все остающиеся объекты добавляются к нему один за другим.

Далее проведем кластерный анализ, определив расстояние между кластерами по принципу «дальнего соседа» (рис. 4). Суть данного метода состоит в том, что два объекта объединяются в группу (кластер), если они имеют коэффициент сходства, меньший некоторого порогового значения  $R$ . В терминах евклидова расстояния значение  $R$  определяет максимально допустимый диаметр подмножества, которое образует кластер.

При реализации этого метода, как правило, формируются относительно компактные гиперсферические кластеры, состоящие из объектов с большим сходством.

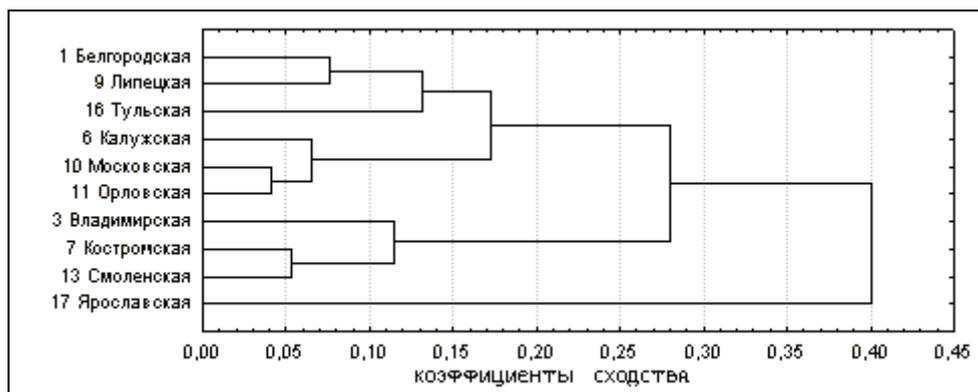


Рис. 4. Кластеризация регионов по принципу «дальнего соседа»

Как видно из рис. 4, в целом принадлежность к кластерам осталась прежней. Вместе с тем увеличилось расстояние между кластерами. Следует отметить, что классификация с использованием других методов, в частности, метода Уорда, метода минимальной связи и другие, приводит к аналогичным результатам. По уровню развития малого бизнеса в субъектах ЦФО РФ были сформированы следующие кластеры:

- 1 – Московская, Орловская, Калужская области;
- 2 – Ярославская область;
- 3 – Владимирская, Костромская, Смоленская области;
- 4 – Тульская область;
- 5 – Белгородская, Липецкая области.

Проведем кластерный анализ с помощью метода *K*-средней – дивизимный метод классификации, в котором объект относится к тому кластеру, расстояние до которого минимально, а расстояние понимается как евклидово расстояние. Данный метод позволил подтвердить ранее полученные результаты, а именно, возможное разбиение регионов по уровню развития малого бизнеса обрабатывающего производства на пять кластеров, пространственная концентрация которых указана на рис. 5.



Рис. 5. Распределение потенциальных кластеров МБ обрабатывающего производства на территории ЦФО РФ

Из проведенного кластерного анализа следует, что формирование межрегионального кластера субъектов МБ в обрабатывающих отраслях возможно только для Калужской, Московской и Орловской отраслей (1 кластер). Объединение ресурсов этих регионов будет способствовать становлению высокоэффективного кластера. Для Ярославской и Тульской областей целесообразно развивать локальный кластер.

Для 3 и 5 кластерной позиции не характерно пространственно-близкое расположение бизнес-структур, что не отвечает основным условиям кластерообразования [1]. В связи с этим наиболее благоприятным вариантом развития кластерных инициатив для этих регионов следует считать возможную интеграцию субъектов малого бизнеса на локальном уровне.

Для Смоленской области наиболее типичен последний вариант развития кластера. Регион имеет высокие потенциальные возможности развития локальных кластеров малого бизнеса в секторе обрабатывающих производств, так как обладает рядом конкурентных позиций: выгодное географическое положение региона, развитая транспортная сеть, высокая обеспеченность энергетическими ресурсами, экономический и интеллектуальный потенциал (табл. 2).

<b>Доминирующая конкурентная позиция регионов</b>	<b>Финансовая</b>	<b>Экономическая</b>	<b>Социальная</b>	<b>Территориальная</b>
Регионы	Калужская, Липецкая области, г. Москва	Владимирская, Ивановская, Курская, Московская, Ярославская области	Белгородская, Брянская, Воронежская, Орловская, Рязанская, Тамбовская области	Костромская, <b>Смоленская</b> , Тверская, Тульская области

Таблица 2. Доминирующая конкурентная позиция регионов ЦФО РФ

Существующий потенциал МБ отраслей обрабатывающих производств позволит сформировать конкурентоспособный кластер на территории Смоленской области, развитие которого приведет к социально-экономическому эффекту и благоприятно скажется на повышении конкурентоспособности региона.

#### **Заключение**

Проведенный отраслевой и кластерный анализ может стать базисом в формировании территориально-пространственных кластеров на принципах инновационного развития и наиболее рационального использования имеющейся ресурсной базы и регионального потенциала.

В проведенном исследовании также была выявлена возможность интеграции регионов ЦФО РФ в кластеры малого бизнеса по уровню их развития отдельных отраслей. Полученные результаты могут быть учтены региональными органами власти при переходе к системным действиям по использованию существующих возможностей для создания и развития кластеров.

Одновременно исследование поможет представителям органов власти выработать систему мер государственной поддержки для тех социально значимых хозяйствующих субъектов, которые не войдут в создаваемые кластеры. Для этого должна быть разработана и реализована Концепция промышленной политики на региональном уровне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РГНФ, проект № 09-02-94776и/Мл.

#### **Литература**

1. Портер М. Конкуренция. – М.: Вильямс, 2002. – 496 с.
2. Рябчонок Ю.В. Кластерные технологии – эффективный инструмент сотрудничества органов власти, крупного и малого бизнеса в целях реализации стратегии региона. – Челябинск, 2007. – 25 с.
3. Малое предпринимательство в России. 2008: Стат.сб./ М 19 Росстат. – М., 2008. – 164 с.
4. Близуруков М.Г. Статистические методы анализа рынка // Учебно-методическое пособие. – Екатеринбург, 2008. – 75 с.

*Чугунова Екатерина Владимировна* – Смоленский гуманитарный университет, аспирант, [Ekaterina\\_smol@mail.ru](mailto:Ekaterina_smol@mail.ru)

УДК 338.2

## **РОЛЬ СТРАТЕГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ КОММЕРЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ**

**О.В. Васюхин, Ж.Н. Зарубина**

Раскрываются сущностные определения стратегического менеджмента, их значимость для повышения эффективности деятельности хозяйствующих субъектов, анализируется экономическое состояние хозяйствующих субъектов в сфере капитального строительства и реконструкций, а также состояние их инновационных процессов. Обосновываются ключевые стратегические решения, необходимые и достаточные для повышения результативности инновационной деятельности, разрабатывается общая схема стратегического управления инновациями.

**Ключевые слова:** стратегическое управление, инновации, конкурентоспособность, эффективность, управление.

#### **Введение**

Мировой опыт показывает, что с середины 60-х годов XX века происходят качественные изменения в реализации предпринимательской деятельности. Руководители бизнеса в промышленно развитых странах давно это осознали и выработали те или иные методы адаптации к такого рода изменениям. Для российских же предпринимателей конца XX – начала XXI веков эта ситуация оказалась неожиданной. В связи с этим возникла необходимость выработки методологических и методических подходов, адекватных для новых условий ведения бизнеса.

К основным факторам, вызвавшим качественные изменения в осуществлении предпринимательской деятельности в России, по мнению авторов, можно отнести следующие.

1. Технические и технологические факторы, т.е. огромное воздействие результатов научно-технического прогресса. Эти результаты впечатляют как по количественным, так и по качественным параметрам. Прежде всего, необходимо отметить существенное продвижение в области применяемых материалов, как для производства традиционных товаров, так и в области капитального строительства. Это – различные новые виды химических материалов, широкое применение керамики и ее производных, широкое внедрение редкоземельных металлов и т.п.

Применение новых материалов, естественно, повлекло за собой и создание совершенно новых видов оборудования для их обработки и приборов для, например, контроля качества. Таким образом, произошли глубокие изменения в целом в технологии производства самых разных товаров и, в частности, в строительстве. На этой базе стали выделяться совершенно новые отрасли экономики, такие как информационные, биотехнологии и др. В целом это привело к усилению межотраслевой конкуренции.

2. Факторы спроса. Если до указанного периода в экономике почти всех стран большой удельный вес приходился на массовое производство, то к концу XX века его доля резко снизилась (по разным оценкам, с 25% до 8–10%). Это объясняется, прежде всего, ростом разнообразия потребностей со стороны рынка, причем подкрепленных реальными покупательскими способностями. Кроме того, указанные выше технические и технологические изменения позволяют удовлетворять одни и те же потребности разными способами и на разном уровне. В целом эти изменения привели к сокращению количества крупных монотоварных предприятий и, наоборот, к появлению множества малых и средних, при этом достаточно широко диверсифицированных фирм. Подобные изменения привели к резкому обострению внутриотраслевой конкуренции.

Свершившимся фактом можно признать глобализацию рынков. Стремительное развитие средств сообщения и коммуникаций способствует сокращению географических расстояний и постепенному стиранию культурных различий. Это приводит к тому, что все меньше предприятий ограничивают свою деятельность каким-либо локальным (региональным) или даже национальным рынком. Кроме того, мировая технологическая и сырьевая кооперация еще более усиливают процесс глобализации рынков. Это означает усиление конкуренции в мировом масштабе и возможность ослабления финансовой устойчивости отдельных регионов (и даже стран) за счет легального вывоза капитала.

3. Развитие стратегических альянсов и сетей. В процессе глобализации руководители предприятий осознают, что для расширения бизнеса только собственных ресурсов и возможностей зачастую недостаточно. Совместные усилия разных, но связанных предприятий дают больший эффект в освоении новых все более растущих рынков. В связи с этим высшие менеджеры предприятий уделяют все больше времени созданию стратегических деловых альянсов и маркетинговых сетей, которые и являются основой конкурентных преимуществ организаций-участников.

4. Глобальная информатизация бизнеса. Последние 20 лет наблюдается бурное развитие информационных технологий, которые должны быть легкими в использовании и внедрении. Это значит, что они не должны требовать наличия у участников специфической технической квалификации и что полный цикл их внедрения не должен превышать один месяц. Внедрение информационных систем должно давать быстрые и предсказуемые бизнес-эффекты. Внедряться должно только то, что приносит ценность для бизнеса. Это значит, что компании должны широко использовать методики прогнозирования и оценки бизнес-эффектов от внедрения информационных систем.

В нынешних условиях менеджеры могут реально лидировать в бизнесе только в том случае, если они широко используют информационные технологии. Принятие решений находится в прямой зависимости от того, какой объем информации поступает, от уровня своевременности и достоверности данных и, безусловно, от степени ее комплексности по любым вопросам, которые возникает в ходе предпринимательской деятельности.

Перечисленные группы факторов и многое другое объективно приводят к изменению условий конкурентного пространства на любом экономическом пространстве. Особенно актуально это для современных российских условий, где на фоне еще не до конца сложившихся и устоявшихся рыночных отношений, необходимо вводить какие-то оперативные изменения для локализации мирового экономического кризиса.

### **Оценка влияния факторов микро-макро-среды на деятельность хозяйствующих субъектов**

О влиянии нестабильности экономических, социальных, политических и других внешних условий на результативность предпринимательской деятельности говорил в своих работах такой известный исследователь в области менеджмента, как И. Ансофф [1, 2]. Им обосновано теоретическое положение о том, что нарастание уровня нестабильности внешней среды бизнеса, прежде всего, должно отражаться на применяемых концепциях и методах менеджмента. В частности, им обоснована хронология сменяемых

подходов к внутрифирменному менеджменту, которые могут дать положительные результаты при том или ином уровне нестабильности окружающей среды хозяйствующих субъектов.

Известно, что любое предприятие является искусственной, сложной и открытой социально-экономической системой, активно взаимодействующей с внешней средой. Таким образом, от того, насколько изменчива эта среда, насколько своевременна и достоверна информация о ее динамике и насколько адекватны методы ее отображения и управления, во многом зависит конечный результат деятельности хозяйствующего субъекта. И. Ансоффом проанализирован эмпирический опыт деятельности фирм в промышленно развитых странах (в частности, в США), который показывает, что условия их деятельности в наибольшей мере определяется такими факторами, как:

- динамика производственно-рыночных отношений;
- изменение географических границ рынка;
- совершенствование внутрифирменных отношений;
- усиление социально-политических аспектов.

Анализ воздействия этих факторов в реальном секторе экономики России и, в частности, в строительной сфере показал, что:

- 1) число новых задач в управлении фирмой, обусловленных изменением внешней среды бизнеса, неуклонно возрастает, многие из них являются принципиально новыми, а значит, не подлежат решению на основе опыта, накопленного в условиях административно-распределительной экономики;
- 2) расширение географических рамок рыночной экономики (например, проникновение на рыночное пространство России новых поставщиков строительных материалов и технологий) привело к появлению не только множества новых задач, но и к усложнению известных (традиционных) управленческих проблем;
- 3) сложность и новизна управленческих задач создают все возрастающую нагрузку на высшее звено управления, что требует не просто экстенсивного расширения управленческого персонала, но внедрения новых подходов и методов в управлении, а также нового управленческого мышления, основанного на новой научной парадигме;
- 4) новые задачи управления возникают все чаще, их сложность и темп появления повышают вероятность возникновения управленческих неожиданностей, т.е. непредвиденных ситуаций, требующих оперативной и адекватной реакции управляющей подсистемы.

### **Заключение**

В реальном секторе экономики России на рубеже XX–XXI веков обозначилась устойчивая тенденция к нарастанию общей для любой фирмы нестабильности внешних условий осуществления предпринимательской деятельности, которую в общем случае можно определить с точки зрения трех базовых характеристик:

- степень привычности условий деятельности фирмы;
- темпы изменения внешней среды;
- степень предсказуемости будущих состояний фирмы и ее внешних условий.

На основании сказанного авторы считают, что методология управления конкретной фирмой должна отображать тот уровень нестабильности внешней среды, в которой ей приходится (или предстоит) функционировать. Чтобы определить наиболее эффективные подходы к управлению, руководство фирмы должно дать качественную и количественную оценку того, какие перемены (степень их нарастания) ожидают ее в будущем. Укрупненно это можно сделать, например, с помощью эмпирических зависимостей, приведенных в работе И. Ансоффа [1].

Методика расчета количественной оценки нестабильности внешней среды применительно к национальной экономике России приведена в работе [3]. По мнению авторов, она может быть модифицирована для условий отдельно взятой фирмы. Для этого необходимо определить, какие из факторов нестабильности данной конкретной фирмы будут являться наиболее существенными в ближайшие 3–5 лет (например, в сфере строительства к ним можно отнести: насыщение рынка, появление новых технологий, снижение покупательской способности потенциальных потребителей и др.). Затем нужно рассчитать общую оценку нестабильности по каждому фактору на основе его эмпирических состояний по трем базовым характеристикам (степень привычности условий деятельности фирмы; темпы изменения внешней среды; степень предсказуемости будущих состояний фирмы и ее внешних условий), а далее интегрировать полученные частные значения с учетом коэффициентов их значимости.

Полученная интегральная оценка нестабильности внешней среды фирмы позволит выбрать наиболее приемлемую методологию управления хозяйствующим субъектом. По мнению группы исследователей [1, 4], выделяются четыре этапа в развитии методов управления:

- 1) управление на основе контроля за исполнением решений (изменения на основе отклонений от плановых решений);

- 2) управление на основе экстраполяции, когда темп изменения ускоряется, но будущее еще можно предсказывать путем экстраполяции прошлого;
- 3) управление на основе предвидения изменений, когда начинают возникать неожиданные явления и темп изменения ускоряется, но не настолько, чтобы нельзя было вовремя предусмотреть будущие тенденции и определить реакцию на них;
- 4) управление на основе гибких экстренных решений, которые необходимы в условиях, когда многие важные задачи возникают быстро и непредсказуемо.

При этом каждый новый метод управления создавался как ответная реакция системы управления на все возрастающий уровень внешней нестабильности. Применение же рассмотренного подхода позволит, по мнению авторов, руководителям предприятий более осознанно применять накопленный теорией и практикой арсенал методов управления в конкретных условиях хозяйствования.

### **Литература**

1. Ансофф И. Стратегическое управление: Пер. с англ. – М.: Экономика, 1989. – 452 с.
2. Ансофф И. Новая корпоративная стратегия. – СПб: Питер, 1999. – 387 с.
3. Васюхин О.В. Управление инновационной деятельностью предприятия в условиях переходной экономики. – СПб: Нестор, 2001. – 251 с.
4. Томпсон А.А., Стрикленд А.Дж. Стратегический менеджмент. Искусство разработки и реализации стратегии: Учебник для вузов / Пер. с англ. Под. ред. Л.Г. Зайцева, М.И. Соколовой. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. – 576 с.

- Васюхин Олег Валентинович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор экономических наук, профессор, зав. кафедрой, prof-vov52@mail.ru
- Зарубина Жанна Николаевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, zhanna\_sushilova@mail.ru

УДК 338.2

## **КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Е.А. Павлова, Ю.Н. Сушилова**

Рассмотрены теоретические аспекты понятия «конкурентоспособность»; представлены ключевые характеристики конкурентоспособности предприятия, а также оценка конкурентной позиции отдельных продуктов на разных рынках; сформулированы критерии и основные принципы обеспечения конкурентоспособности предприятия.

**Ключевые слова:** конкурентоспособность, эффективность, прибыльность, платежеспособность.

### **Введение**

Развитие рыночных отношений, а также открытость российской экономики для мирового бизнеса привели к тому, что в России начала XXI века происходит обострение как внутренней, так и внешней конкуренции. Вследствие этого руководители отечественных предприятий находятся в постоянном поиске новых (адекватных условиям конкуренции) инструментов управления предприятиями и рычагов обеспечения конкурентоспособности.

Ретроспективный анализ показывает, что в течение первых тридцати лет XX века ситуация в промышленно развитых странах складывалась таким образом, что предприятиям удавалось достичь успеха, а значит, и обеспечить конкурентоспособность с минимальными издержками [1, 2]. Дифференциации товарного ассортимента не существовало, а секрет успеха заключался в умении произвести продукцию с наименьшими затратами. Критериями оценки эффективности производства в это время были в основном показатели соотношения доходов и расходов.

Однако с течением времени, с внедрением новых технологий, постепенным насыщением спроса, интернационализацией и ростом конкуренции, усилением государственного регулирования в промышленных отраслях первого поколения – сталелитейной, судостроительной, станкостроения, в производстве сельскохозяйственной техники – ранее эффективные способы и методы управления уже не приводили к увеличению объема продаж и повышению конкурентоспособности предприятий. Снижение накладных расходов, сокращение персонала, увеличение производительности и объединение операций не могли остановить падение прибыли. Критериями оценки производственной деятельности к 1950 г. стали уже не только традиционные показатели соотношения доходов и расходов, но и организационной и управленческой эффективности (грузооборот, товарооборот, прибыль на вложенный капитал). Так, в 1950–1960 г.г. возникла потребность в системном подходе к управлению предприятием. Последующее развитие обще-

ственного производства и потребления привели к тому, что главным фактором конкурентоспособности предприятия становится обновление по всем направлениям: внедрение новой техники и технологий, освоение новых сырьевых рынков и рынков сбыта, быстрое внедрение на рынок новых видов продукции и т.п. Это породило интерес к новому виду управления – стратегическому.

В начале XXI века в России для повышения конкурентоспособности предприятий и продукции на предприятиях активно внедряются различные системы качества с последующей их сертификацией на соответствие стандартам серии ISO 9000. Под системой качества [3] понимают совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов, необходимых для общего руководства качеством на предприятии.

В конце XX века многолетний западный и уже наработанный отечественный опыт показали, что компании, озабоченные в основном получением текущей прибыли или обеспечением заданной рентабельности, забывают о необходимости создания конкурентных долговременных преимуществ. Для российских предприятий типовыми являются ситуации, когда при наличии прибыли предприятие является неплатежеспособным, т.е. не может погасить свои текущие обязательства, и, наоборот, имея убытки, предприятие аккуратно рассчитывается с поставщиками, сотрудниками, государством и кредиторами. Уже по этим примерам можно судить о том, что получение прибыли не может рассматриваться как стратегическая цель и как единственный и главный критерий успешности функционирования предприятия.

### **Задачи обеспечения конкурентоспособности**

По мере своего развития каждое предприятие сталкивается с определенными проблемами и задачами, преодоление и решение которых осуществляются посредством применения различных управленческих методик и технологий [4, 5]. Это приводит к пониманию необходимости обоснования концептуальных основ обеспечения конкурентоспособности предприятия в современных динамически меняющихся условиях общественного производства и потребления. Для этого необходимо, прежде всего, проанализировать задачи и выявить ключевые характеристики (индикаторы) конкурентоспособности, отражающие состояние предприятия по мере его развития.

Первая задача, которая возникает у предприятия, функционирующего в условиях рынка, – это элементарное выживание или способность отвечать по своим обязательствам, т.е. обеспечение платежеспособности. Эта задача решается принятием экстренных мер по реализации уже произведенной продукции, проведением ряда маркетинговых мероприятий: анализ рынка, оптимизация ассортимента продукции, выработка эффективной ценовой политики и т.п.

По мере обеспечения регулярной платежеспособности возникает естественная задача достижения заданной прибыльности хозяйственной деятельности. Ее решение требует дополнить зарекомендовавшие себя маркетинговые меры применением современных методов экономического и организационно-технологического анализа и управления (анализ затрат на производство, анализ себестоимости, анализ эффективности производства, технологичности и т.п.).

После успешного решения задач элементарной выживаемости необходимо переходить к проблемам более высокого уровня, а именно, к обеспечению конкурентных позиций предприятия в долгосрочной перспективе. Первой ключевой задачей на этом уровне является обоснование стратегических ориентиров развития, т.е. у руководства должно выработаться понимание того, какой должна быть компания в средне- и долгосрочном будущем. Для этого разрабатывается «пирамида стратегий» компании.

По мнению авторов, важной задачей для обеспечения конкурентоспособности предприятия является создание и внедрение адаптивной системы управления. Под адаптивностью системы управления предприятием понимается ее способность оперативно реагировать на сигналы внешней среды, а также соответствие его организационной структуры особенностям внешнего окружения бизнеса. Система управления должна способствовать реализации стратегической концепции предприятия.

### **Методические подходы к обеспечению конкурентоспособности предприятия**

В состав ключевых характеристик состояния конкурентоспособности предприятия обычно включают инвестиционную привлекательность, управляемость бизнесом, финансовую и управленческую прозрачность, адаптивность системы управления, прибыльность, платежеспособность и др. Анализируя ключевые характеристики состояния предприятия и известные подходы к оценке и повышению его конкурентоспособности, можно сформулировать основные принципы концепции обеспечения конкурентоспособности предприятия.

1. Конкурентоспособность предприятия есть интегральная характеристика, включающая уровень конкурентоспособности продукции и конкурентоспособности действующей системы управления.
2. Система критериев конкурентоспособности предприятия должна строиться с учетом горизонта планирования и управления.

- на оперативном уровне основным показателем конкурентоспособности предприятия является интегральный показатель конкурентоспособности продукции;
- на тактическом уровне конкурентоспособность предприятия оценивается показателями его общего финансово-хозяйственного состояния;
- на стратегическом уровне конкурентоспособность предприятия характеризуется показателями его инвестиционной привлекательности.

Конкурентоспособность продукции опосредованно характеризует способности предприятия обеспечить входной денежный поток, достаточный для достижения заданной эффективности производства. Оценка конкурентоспособности продукции может быть осуществлена посредством одного из трех основных методов: эвристического (экспертного), квалиметрического или комплексного (интегрального).

Авторы считают, что существующие методики комплексной оценки финансово-хозяйственной деятельности предприятия позволяют охарактеризовать конкурентоспособность предприятия на тактическом уровне. Существует довольно большое количество методик оценки состояния предприятия. Вместе с тем стандартов такой оценки, как и единой методики, не существует, так как немало предприятий обладают собственными уникальными методиками оценки.

Для оценки стоимости предприятия (бизнеса) в теории и практике традиционно используют три подхода к оценке бизнеса:

- доходный подход (income approach);
- сравнительный (рыночный) подход (market approach);
- затратный (на основе активов) подход (market based approach).

В настоящее время заслуживает внимание распространенный в зарубежной практике и новый для России подход, основанный на оценке имущественных (реальных) опционов.

### **Заключение**

Наряду с определением ключевых характеристик и критериев конкурентоспособности, необходим выбор конкретной стратегии, на основе которой будут определены дальнейшие действия предприятия. Без стратегического подхода предприятие становится неконкурентоспособным.

На данный момент наиболее распространены так называемые наступательные стратегии. Среди целей, присущих наступательным стратегиям, можно выделить следующие: увеличение объема продаж и прибыли (в количественном выражении), овладение определенным сегментом рынка, занятие определенного положения в конкурентной среде, прирост объема производства и производительности труда.

Очевидно, что предприятие как субъект рынка самостоятельно определяет для себя выбор той или иной стратегии в соответствии с поставленными долгосрочными целями, направленными на обеспечение устойчивости рыночных позиций. Такой подход не противоречит стремлению к максимизации прибыли, но создает условия для успешного функционирования в длительной перспективе.

Таким образом, авторы исходят из того, что конкурентоспособность предприятия представляет собой комплекс управленческих решений как в области развития продукта, так и в области менеджмента. И если методология оценки конкурентоспособности продукта достаточно разработана, то теоретические и методические аспекты конкурентоспособности в области менеджмента требуют дальнейшего исследования.

### **Литература**

1. Абрамишвили Г.Г. Проблемы международного маркетинга. – М.: Международные отношения, 1990. – 223 с.
2. Максимов И.П. Оценка конкурентоспособности промышленного предприятия // Маркетинг. – 1998. – № 6. – 33 с.
3. Болт Г.Дж. Практическое руководство по управлению сбытом: Пер. с англ. – М.: Экономика, 1991. – 334 с.
4. Павлова Е.А. Система планирования деятельности предприятия. – СПб: Нестор, 2003. – 157 с.
5. Васюхин О.В., Павлова Е.А. Стратегия формирования и развития инновационного потенциала промышленного предприятия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – №2(66). – С. 113–119.

- Павлова Елена Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, доцент, ea\_pavlova@mail.ru
- Сушилова Юлия Николаевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, sushilova@mail.ru

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.5+531

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА ОСЕЙ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ  
ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕНЗОРА ИНЕРЦИИ

С.Н. Шаховал, Г.И. Мельников

При определении тензора инерции произвольного твердого тела исследуется зависимость точности идентификации тензора инерции от углов между осями.

**Ключевые слова:** тензор инерции, идентификация параметров, обусловленность системы.

Задача идентификации параметров и, в частности, определения тензора инерции является важной для областей науки и техники, относящихся к машиностроению и управлению различными объектами. Развиваются современные методы определения моментов и тензоров инерции с использованием программных роботов [1, 2]. Расчет компонентов тензора инерции в точке тела по экспериментально измеренным параметрам связан с решением системы  $\mathbf{A}\mathbf{J}=\mathbf{I}$ , где  $\mathbf{A}$  – матрица системы линейных алгебраических уравнений, связывающих тензор инерции  $\mathbf{J}=(J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}, J_{xy}, J_{yz}, J_{xz})^T$  в декартовой системе координат  $O_{xyz}$  с экспериментальными значениями  $\mathbf{I}=(J_1, \dots, J_6)^T$  моментов инерции  $J_i = J_{e_i}$  ( $i=1, 2, \dots, 6$ ). Требуется хорошая обусловленность системы, обеспечивающая небольшие погрешности расчетов. Условие хорошей обусловленности запишем в виде неравенства [3]:  $|\det(\mathbf{A})| \geq 0,5$ .

В работе исследуются случаи, когда часть осей лежит на сегменте конуса, величина которого определяется угловым параметром  $\gamma \in (0; 2\pi)$ . Вторым параметром является угол  $\alpha \in (0; \pi/2)$  между центральной осью и осями, лежащими на поверхности сегмента. Ставится задача нахождения значений угловых параметров, определяющих расположение шести осей, проходящих через заданный центр тестируемого тела, при которых система имеет максимальное по модулю значение определителя матрицы  $\mathbf{A}$ , а также требуется определить интервалы значений варьируемых углов, при которых выполняется условие обусловленности. Исследуются два случая: когда пять осей равномерно распределены по поверхности сегмента, а шестая направлена вдоль (а) центральной, либо (б) перпендикулярной ей оси. Получены следующие результаты:

$$(a) \quad \alpha_0 = \arccos \frac{1}{\sqrt{5}} \approx 63,4349^\circ, \quad \gamma_0 = 4 \arccos \frac{-1 + \sqrt{5}}{4} = 288^\circ, \quad |D_{\max}(\alpha, \gamma)| = |D(\alpha_0, \gamma_0)| \approx 2,2897,$$

$$\alpha \in [40,357^\circ; 82,032^\circ] \text{ при оптимальном } \gamma = \gamma_0, \quad \gamma \in [196,968^\circ; 349,567^\circ] \text{ при оптимальном } \alpha = \alpha_0;$$

$$(b) \quad \alpha_0 = \frac{1}{2} \arccos \left( -\frac{1}{5} \right) \approx 50,768^\circ, \quad \gamma_0 = 288^\circ, \quad |D_{\max}(\alpha, \gamma)| = |D(\alpha_0, \gamma_0)| \approx 0,966,$$

$$\alpha \in [36,172^\circ; 64,915^\circ] \text{ при } \gamma = \gamma_0; \quad \gamma \in [228,955^\circ; 334,834^\circ] \text{ при } \alpha = \alpha_0.$$

Из рассмотренных двух вариантов расположения пучка осей следует вывод, что в обоих случаях можно не слишком сильно ограничивать угловые параметры для определения достаточно точных данных на практике, когда присутствует погрешность измерений. С точки зрения простоты конструкции исполнительного устройства, когда желательно иметь значения углов как можно меньше, такое расположение осей также является достаточно приемлемым. Полученный результат можно использовать на практике при создании устройства, предназначенного для определения элементов тензора инерции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 10-08-01046-а.

1. Мельников В.Г., Едачев А.С., Мельников Г.И., Шаховал С.Н. Метод определения тензора инерции на программных движениях // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12(33). – № 1(2). – С. 445–448.
2. Мельников В.Г. Энергетический метод параметрической идентификации тензоров инерции тел // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 1. – С. 59–63.
3. Шаховал С.Н. Исследование матричных алгебраических уравнений, определяющих тензор инерции через осевые моменты инерции // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 47. – С. 196–201.

Шаховал Сергей Николаевич – ЗАО «Эрикссон Корпорация АО», администратор базы данных, shakhovalsey@gmail.com

Мельников Геннадий Иванович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, melnikov@ifmo.ru

УДК 004.032.26

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ  
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Д.В. Соловьев, И.Б. Бондаренко

Рассматривается метод проектирования математического обеспечения систем автоматизации вытяжки оптического волокна для параметрической оптимизации с помощью технологий нейронных сетей.

**Ключевые слова:** проектирование математического обеспечения, нейросетевой алгоритм.

Исследован метод математического моделирования технологического процесса (ТП) вытяжки оптического волокна из заготовки. Управляемыми параметрами данного процесса являются скорость вытягивания, температура печи, диаметр волокна на выходе, а также сила натяжения тянущего устройства. На данный момент отсутствует адекватная математическая модель, формализующая зависимость всех этих четырех параметров. Установлено, что традиционными математическими методами формализовать данный сложный ТП достаточно затруднительно, а полученные математические модели при их решении не дают сходных с экспериментальными данными значений скорости и температуры ТП вытягивания оптического волокна.

Нейросетевой метод в решении сложных физико-математических задач имеет преимущества в случаях невозможности адекватной формализации задачи или отсутствия математического аппарата ее решения, а также в случаях, когда задача формализуема, имеет математический аппарат решения, но решения не удовлетворяют требованиям полученных решений по скорости, геометрическим параметрам, температуре вытягивания. Учитывая эти особенности, было решено использовать аппарат искусственных нейронных сетей для задачи параметрической оптимизации сложного ТП вытяжки оптического волокна [1, 2]. Разработана структура нейронной сети, представленная на рисунке, и модифицированный алгоритм обучения нейронной сети на основе алгоритма обратного распространения ошибки. Предложена структура трехслойного персептрона с одним скрытым слоем. Причем во входном слое выбрано три нейрона (температура печи, сила вытягивания, диаметр волокна), в скрытом слое оптимальным оказалось количество нейронов, равное восьми, а в выходном слое соответственно один нейрон – скорость вытягивания волокна из заготовки.

Этот параметр и оказался оптимизируемым в нашем случае с соблюдением соответствующих критериев качества (затухание в волокне, однородность структуры, постоянство диаметра и т.д.). В качестве алгоритма обучения за основу был выбран алгоритм обратного распространения ошибки, относящийся к группе алгоритмов обучения «с учителем». Алгоритм обратного распространения ошибки был доработан за счет введения так называемых «эпох обучения» и моментов в процесс изменения весовых коэффициентов нейронов [3]. Точность разработанного алгоритма была оценена с помощью математических критериев Стьюдента и среднеквадратического отклонения ошибки. Ошибка в результатах, выданных нейронной сетью относительно экспериментальных данных, оказалась менее одного процента. Следовательно, можно сделать заключение о точности работы предложенного нейросетевого метода при параметрической оптимизации сложного ТП вытяжки оптического волокна.

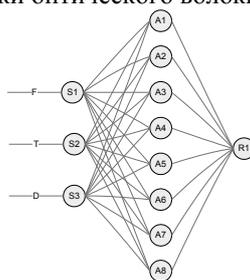


Рисунок. Структура нейронной сети

1. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели: Учебное пособие. – Воронеж: ВГУ, 1999. – 77 с.
2. Дианов Р.С. Оптимизация технологического процесса разработки газоносного пласта с применением генетических алгоритмов и нейронных сетей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Астрахань, 2004. – 167 с.
3. Соловьев Д.В. Нейросетевой метод оптимизации математических моделей сложных технологических процессов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 51. – С. 33–39.

Соловьев Денис Викторович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, 9218964588@mail.ru

Бондаренко Игорь Борисович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, igorlitmo@rambler.ru

УДК 004.725.7

**ОЦЕНКА УЩЕРБА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК  
НА ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ СЕТИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ  
ЗАЩИЩЕННЫЕ МОБИЛЬНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ РАБОЧИЕ МЕСТА****Д.А. Алексеев**

Рассматривается процесс обеспечения безопасности мобильных автоматизированных рабочих мест (МАРМ), входящих в автоматизированную систему государственного управления, и методический подход к оценке возможного экономического ущерба от компьютерных атак.

**Ключевые слова:** мобильные автоматизированные рабочие места, оценка финансовых убытков.

Сложнейшая задача, которая решается сегодня в России, – это создание «электронного правительства», посредством которого будет обеспечен доступ к государственным услугам максимального количества отечественных и зарубежных пользователей через сеть Интернет в режиме реального времени (on-line). Важнейшими инструментами обеспечения взаимодействия госструктур с пользователями являются действующая автоматизированная система государственного управления (АСГУ) и многообразие типов электронных устройств, стационарных и мобильных, к которым относятся ноутбуки, миникомпьютеры, коммуникаторы, флэш-устройства, iPad, мобильные телефоны и другие носители информации. Условно эти мобильные средства можно назвать МАРМ, в том числе и те, которые входят в состав АСГУ. Схематично АСГУ представляет собой структуру, организованную по территориально-распределенному принципу и состоящую из множества случайных пользователей, способных в режиме on-line вести с ней обмен данными через центральный сервер в установленном порядке. Организация такого взаимодействия сопровождается серьезным противоречием: необходимостью открытого доступа к АСГУ, с одной стороны, и наличием системы защиты информации от подключаемых к ней пользователей, которые могут нанести ущерб ее функционированию, с другой стороны.

Процесс обеспечения безопасности МАРМ, входящих в АСГУ, должен включать следующие основные этапы оценки рисков компьютерных атак: информационный аудит, определение степени внедряемой безопасности, обучение пользователей. Целями управления рисками являются: выявление угроз, измерение, контроль и минимизация потерь, связанных с неопределенными негативными событиями или рисками. Оценка риска включает в себя такие задачи, как анализ угроз, выбор приоритетов, выявление уязвимостей и определение типов рисков, поиск путей сокращения потерь, а также принятие решения в отношении снижения угрозы или исключения риска [1, 2]. Кроме того, управление рисками в информационных сетях является дорогостоящей проблемой, так как после успешной компьютерной атаки затраты на восстановление сетей могут быть несоизмеримо большими по сравнению с ее созданием. Так, военные США уже в 2010 г. потратили более \$ 100 млн. на восстановление сетей и программного обеспечения после компьютерных атак [3].

В методике оценки ущерба предлагается учитывать прямые и косвенные потери при нарушении работоспособности информационной системы [1, 3]. Прямые (основные) потери от атаки на АСГУ будут включать нарушение процессов управления и принятия решений. Косвенный (побочный) ущерб характеризуется несвоевременностью, ошибочностью принятия или непринятием управленческого решения. Если нарушен процесс принятия решений в области международных отношений и (или) в военной сфере, то косвенные потери будут выражены как краткосрочными, так и долгосрочными последствиями в виде утраты стратегического управления государственной системы.

При оценке ущерба принимается во внимание, что в случае линейного возрастания последствия атаки, сумма косвенных или нематериальных потерь может увеличиваться нелинейно. Тогда общее увеличение стоимости потерь при высоких скоростях, масштабах и сложностях атак может расти по экспоненциальной зависимости. В тщательно спроектированных сложных информационных территориально-распределенных системах отказоустойчивость может предотвратить некоторые катастрофические последствия несанкционированного воздействия. Тем не менее, компьютерные атаки на информационные системы, даже самые защищенные, могут привести к экономическим потерям.

Такой методический подход может быть взят за основу при разработке модели кибербезопасности, позволяющей прогнозировать реакцию системы на атаку до ее реализации, используя понятия риска, уязвимости системы, времени между атаками и вторжениями (их количество и продолжительность).

1. Климов С.М. Методы и модели противодействия компьютерным атакам. – Люберцы: КАТАЛИТ, 2008.
2. Graham J.H., Ralston P.S. Quantitatively assessing the vulnerability of critical information systems: A new method for evaluating security enhancements // International Journal of Information Management. – 2008. – 28(6).
3. CBS News. Pentagon Bill to Fix Cyber Attacks: \$100M. 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cbsnews.com/>, свобод.

*Алексеев Дмитрий Александрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dima99@gmail.com

УДК 004.021

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ****С.В. Марьин, А.В. Ларченко, С.В. Ковальчук, К.В. Князьков, Е.В. Болгова, А.В. Бухановский**

Рассматривается задача обеспечения поддержки высокопроизводительных вычислений в области компьютерного моделирования, выполняемых на базе композитных распределенных приложений.

**Ключевые слова:** распределенные вычисления, композитное приложение, компьютерное моделирование.

В отличие от классических «больших» [1] задач компьютерного моделирования (например, расчета трехмерных течений вязкой жидкости в сложной геометрической конфигурации), проблема создания распределенных предметно-ориентированных приложений моделирования сложных систем не сводится только к разработке оптимальных (для заданной архитектуры) параллельных алгоритмов и их реализации. Принципиальной проблемой является интеграция уже существующих и вновь разработанных программных модулей в единый комплекс. В отличие от традиционных подходов для создания композитных бизнес-приложений (например, на основе сервис-ориентированной архитектуры, Service-Oriented Architecture – SOA), в данном случае основная проблема состоит в том, что результатом интеграции должно являться не только обеспечение функциональных характеристик (решение задачи), но и достижение при этом максимальной параллельной производительности. В частных случаях, при ограниченном числе программных компонентов и заданном сценарии вычислений оптимальная статическая архитектура такого комплекса может быть разработана вручную. Однако вопрос остается открытым для систем с динамической архитектурой, например, проблемно-ориентированных оболочек компьютерного моделирования (Problem-Solving Environment – PSE) [2]. В таких оболочках пользователь имеет возможность вызывать отдельные вычислительные предметно-ориентированные модули, строить на их основе вычислительные цепочки и отправлять их на выполнение на высокопроизводительные вычислительные системы. Предметно-ориентированные модули в данном случае обычно бывают разработаны различными специалистами, реализуют разные принципы распараллеливания, написаны на различных языках программирования и функционируют на удаленных системах принципиально различной архитектуры. Потому построение оптимального с точки зрения производительности сценария исполнения вычислительной цепочки является нетривиальной задачей (в существующих системах она обычно отдается на откуп самому пользователю).

Таким образом, актуальной представляется задача развития подходов, методов и технологий, позволяющих проектировать и разрабатывать программные приложения, эффективно функционирующие в распределенных вычислительных средах с неоднородной иерархической архитектурой применительно к задачам компьютерного моделирования сложных систем. С практической точки зрения полученные в ходе исследования результаты позволят создать среду автоматизации процесса разработки – интеллектуальную программную оболочку, предоставляющую разработчику не только инструментарий, но и формализованные знания в области создания распределенных предметно-ориентированных программных комплексов. Наличие такой среды создаст стимул для развития соответствующих приложений в новых предметных областях, позволит существенно сократить время их разработки и отладки, а также обеспечить эффективную загрузку высокопроизводительных вычислительных ресурсов (суперкомпьютеров, связанных высокоскоростной сетью), имеющихся на настоящий день в вузах и не загружаемых на полную мощность не в силу отсутствия задач, а по причине отсутствия инструментария для их реализации.

Решение данной задачи предполагает симбиотическое направление исследований на стыке информационных технологий и предметно-ориентированного компьютерного моделирования. Его квинтэссенция состоит в том, что для достижения эффективности параллельных вычислений недостаточно только уповать на возможности сверхмощных вычислительных систем и глубинные средства исследования и оптимизации программ. Высокая производительность является следствием совокупного учета специфики предметной области, особенностей применяемых моделей, методов и алгоритмов, а также архитектурных особенностей вычислительных систем и технологий программирования. Проблема сочетания знаний из столь различных областей, по-видимому, на данном этапе может быть решена лишь на основе их отчуждения, обобщения и использования посредством интеллектуальных технологий.

В ходе выполнения исследования по данному направлению разработан экспериментальный образец интеллектуальной инструментальной оболочки (ИИО) для разработки композитных приложений моделирования сложных систем. С точки зрения интеллектуальных технологий такая оболочка является аналогом известного класса оболочек-инструментов для создания экспертных систем. Однако, в отличие от систем общего вида, данная инструментальная оболочка должна обеспечить решение только двух классов задач:

- интеллектуальная поддержка пользователя по выбору, сопряжению и использованию компонентов в составе композитного приложения (режим советующей системы);
- обеспечение эффективного исполнения композитного приложения на распределенной иерархической неоднородной вычислительной архитектуре без целенаправленного участия пользователя (режим системы автоматического управления).

Экспериментальный образец ИИО включает в себя семь базовых подсистем, а именно: подсистемы управления знаниями (ПУЗ), логического вывода (ПЛВ), человеко-компьютерного взаимодействия (ПЧКВ), управления распределенными платформами (ПУРП), хранения данных (ПХД), информационного портала (ПИП), управления инфраструктурой (ПУИ). Основные компоненты подсистем реализуются как независимые web-сервисы, взаимодействующие в распределенной среде. Пользовательское описание композитного приложения в ИИО, интерпретируемое посредством ПЧКВ, формулируется на проблемно-ориентированном языке (Domain-Specific Language – DSL) EasyFlow; при этом пользователю предоставляется возможность работы как с текстовой, так и с графической нотацией, допускающими преобразование друг в друга. Интерпретацию описания композитного приложения в исполнимую форму выполняет ПЛВ на основе детерминированных правил, описывающих способы использования прикладных сервисов, осуществляемого путем обхода соответствующей комплексной онтологии, доступ к которой выполняется посредством ПУЗ. При запуске композитного приложения на конкретных вычислительных ресурсах в рамках ПУРП решается задача распределения нагрузки в условиях неопределенности (стохастичности) и неполноты исходной информации о функционировании распределенной среды. При этом ПУИ, играя координирующую роль, реализует функции маршрутизации сообщений между отдельными подсистемами ИИО и поддержки ПУРП за счет расширенных средств мониторинга доступных вычислительных ресурсов. Важную роль в концепции организации рабочей среды для пользователя, заинтересованного в применении ИИО, играет ПИП, интегрирующая основные информационные и технологические сервисы, к которым относятся: сервисы взаимодействия с ПЧКВ, ПХД и ПУИ; сервисы поддержки совместной работы и коммуникации в рамках профессионального виртуального сообщества; сервисы представления структурированной и каталогизированной базы справочной информации, в свою очередь ассоциированной с соответствующими элементами других подсистем ИИО.

Экспериментальный образец ИИО развернут на стенде, реализующем две модели организации распределенных вычислений – метакомпьютинга и Грид. Экспериментальные исследования функциональных характеристик ИИО продемонстрировали, что накладные расходы (по времени), связанные с использованием ИИО для запуска композитных приложений, на порядок ниже собственных накладных расходов, обусловленных функционированием существующих Грид-сред. Разрабатываемая ИИО может эффективно применяться как надстройка над низкоуровневой распределенной Грид-средой, не приводя к возникновению ощутимых дополнительных нагрузок на ее вычислительную инфраструктуру.

Работа выполнена в рамках проектов «Интеллектуальные технологии распределенных вычислений для моделирования сложных систем» (государственный контракт №П469) и «Инструментальная среда для построения композитных приложений моделирования сложных систем» (государственный контракт №П1386) реализуемых при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

1. Воеводин Вл.В. Решение больших задач в распределенных вычислительных средах // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 5. – С. 32–45.
2. Rice J.R., Boisvert R.F. From Scientific Software Libraries to Problem-Solving Environments // IEEE Computational Science & Engineering. – 1996. – V. 3. – № 3. – P. 44–53.

*Марьян Сергей Владимирович* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, аспирант, igorlitmo@rambler.ru

*Ларченко Алексей Викторович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, aleksey.larchenko@gmail.com

*Ковальчук Сергей Валерьевич* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, kovalchuk@mail.ifmo.ru

*Князьков Константин Валерьевич* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, аспирант, constantinvk@gmail.com

*Болгова Екатерина Владимировна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, katerina.bolgova@gmail.com

*Бухановский Александр Валерьевич* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, директор, доктор технических наук, avb\_mail@mail.ru

УДК 004.021

**ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**А.А. Безгодов, С.В. Иванов, А.В. Бухановский**

Предлагается подход к созданию программного комплекса для исследования динамики морских объектов в экстремальных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** динамика судна, экстремальная ситуация, компьютерное моделирование

Проектирование и эксплуатация судов и объектов океанотехники требует решения задачи исследования и прогноза их поведения в экстремальных ситуациях в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Это обусловлено тем, что в сложных погодных условиях статические характеристики морских объектов (например, остойчивость, характеризуемая метацентрической высотой) становятся невозможным измерить прямыми методами, а их динамические аналоги изменяются нерегулярным образом в силу воздействия на объект внешних сил и моментов стохастической природы, порождаемых ветром, морским волнением и течениями [1]. Как следствие, учет данных факторов требует применения комплексного подхода, включающего последовательное определение характеристик внешних воздействий (ветра, волнения, течений), расчет вызванных ими возмущающих сил и моментов стохастической природы, а также моделирование нелинейных колебаний объекта в условиях нестационарных изменений внешних условий, неопределенности параметров и пр.

Анализ гибели судов в различных условиях эксплуатации позволяет выделить условия, которые способствуют возникновению экстремальных ситуаций. В частности, при движении судов лагом к волне выделяют такие ситуации, как воздействие на судно ветрового шквала в условиях сильной качки, потеря остойчивости по причине затопления палубного колодца, а также ударное воздействие гребня разрушающейся волны. Напротив, при попутном волнении начинают играть роль совершенно другие критические факторы, а именно: параметрический резонанс бортовых колебаний, потеря управляемости на гребне волны, захват судна волной (брочинг). В свою очередь, развитие каждой из вышеперечисленных ситуаций может усложняться за счет внутренних факторов, определяющих характеристики самого объекта. К ним относятся, например, смещение навалочного груза, затопление отсеков, интенсивное обледенение [2]. Многообразие набора экстремальных ситуаций и разнородность определяющих их факторов приводит к тому, что в настоящее время для компьютерных экспериментов в области динамики судна не существует единой (универсальной) модели, одинаково удобной во всех случаях. Потому основным способом решения такой задачи является использование набора имитационных моделей на основе стохастических внешних возмущений.

На рис. 1 приведена диаграмма потоков данных в процессе имитационного моделирования динамики судна, определяющая основные элементы соответствующего высокопроизводительного программного комплекса. К ним относятся скриптовая система для задания и изменения параметров моделирования и формирования сценариев, модуль имитационного моделирования (генератор морского волнения и ветра, компонент моделирования локальных сил, действующих на судно, компонент интегрирования), а также визуализатор для отображения динамических сцен.

Для получения информации о внешних возмущениях (ветре, волнении и течениях) в составе комплекса применяются современные стохастические модели, основанные на формализме многомерных динамических систем, параметрически связанных друг с другом в различных диапазонах изменчивости [3]. Эти модели позволяют воспроизводить климатические спектры с заданной повторяемостью (включая спектры, возможные 1 раз в заданное число лет), а также индуцируемые ими ансамбли пространственно-временных полей морского волнения с учетом нелинейных эффектов (это позволяет моделировать, в том числе, возникновение волн-убийц, *freak waves*).

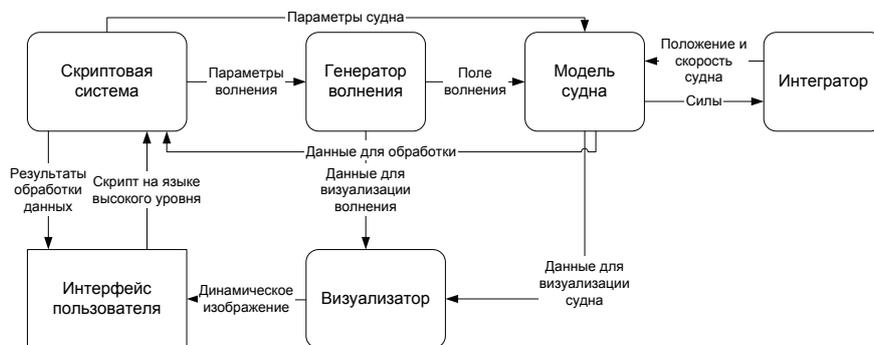


Рис. 1. Диаграмма потоков данных в процессе имитационного моделирования динамики морских объектов

Высокопроизводительный программный комплекс позволяет изучать существенно нелинейные эффекты динамики судна (параметрический резонанс, брочинг и пр.), что принципиально важно при моделировании экстремальных явлений. При этом для детального анализа всей картины поведения объекта используются технологии динамической трехмерной визуализации. Подсистема визуализации в программном комплексе реализована на основе технологий DirectX и OpenGL, что позволяет эффективно отображать трехмерные динамические сцены с использованием встроенных аппаратных возможностей как графических карт на компьютере пользователя, так и управляющих видео-серверов в полномасштабных системах стереовизуализации.

Работа выполнена при поддержке проектов «Интеллектуальная система навигации и управления морским динамическим объектом в экстремальных условиях эксплуатации», «Интеллектуальные технологии поддержки процессов исследовательского проектирования судов и технических средств освоения океана» и «Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики корабля в экстремальных условиях эксплуатации» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2007–2013 годы».

1. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях // Под ред. Ю.И.Нечаева. – Санкт-Петербург, ГМТУ, 2001 – 352 с.
2. Нечаев Ю.И., Ярисов В.В. Выбор элементов формы корпуса исходя из требований к остойчивости судна на волнении // Морские интеллектуальные технологии. №2(4), 2009, с.45 – 52.
3. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Охотского и Каспийского морей: справ. изд. / Л.И. Лопатухин, А.В. Бухановский, А.Б. Дегтярев, В.А. Рожков; Российский морской регистр судоходства. – СПб.: РМРС, 2003. – 214 с.

*Безгодов Алексей Алексеевич* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, аспирант, demiuorgh@gmail.com

*Иванов Сергей Владимирович* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, svivanov@mail.ifmo.ru

*Бухановский Александр Валерьевич* – НИИ наукоемких компьютерных технологий СПбГУ ИТМО, директор, доктор технических наук, avb\_mail@mail.ru

**OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES  
PROBABILITY DISTRIBUTION OF LEVEL-CROSSING INTERVALS OF THE NORMAL RANDOM  
PROCESS AND THE STRUCTURE OF AN OPTICAL NEAR-FIELD LOCATION SYSTEM WITH  
NOISE SYNCHRONIZATION****Ye. Lebed'ko, M. Serikova**

The structure of an optical near-field location system with noise synchronization is proposed on the basis of the probability distribution study of level-crossing intervals of the normal random process.

**Keywords:** optical near-field location, level-crossing intervals.

*Yevgeny Lebed'ko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, [eleb@rambler.ru](mailto:eleb@rambler.ru)

*Maria Serikova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, engineer, [serikovamg@gmail.com](mailto:serikovamg@gmail.com)

**DESIGN OF THE TUNABLE MIRROR OBJECTIVE FOR PULSE TERAHERTZ REFLECTOMETER  
SPECTROGRAPH-INTRAVISOR****Ye. Novoselov, V. Bespalov**

Results of the tunable mirror objective for pulse terahertz reflectometer spectrograph-intravisor modeling with Zemax program use are presented.

**Keywords:** Terahertz radiation, reflectometer, spectrograph-improviser, mirror objective.

*Yevgeny Novoselov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, [eugene.novoselov@gmail.com](mailto:eugene.novoselov@gmail.com)

*Victor Bespalov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Vice-head,, D.Sc., Professor, [victorbespaloff@gmail.com](mailto:victorbespaloff@gmail.com)

**THREE-AXIS OPTICAL-ELECTRONIC AUTOCOLLIMATOR WITH INCREASED SENSITIVITY  
OF THE ROLL ANGLE MEASURING****I. Konyakhin, T. Kopylova**

A three-axis optical-electronic autocollimator with a tetrahedral reflector wherein two dihedral angles between facets have a small deviation from  $90^\circ$  is considered in the paper. It is established that such reflector allows to make independent measurements of the roll angle. The ways of autocollimator sensitivity increase while roll angle measuring are determined. The analysis of parameters of the three-axis optical-electronic autocollimator with increased roll angle measurement sensitivity is made.

**Keywords:** three-axis optical-electronic autocollimator, roll angle, tetrahedral reflector, roll angle measurement sensitivity.

*Igor Konyakhin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, [igor@grv.ifmo.ru](mailto:igor@grv.ifmo.ru)

*Tatiana Kopylova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, [fleur3310@rambler.ru](mailto:fleur3310@rambler.ru)

**THE INFLUENCE ANALYSIS OF SPHERICAL REFLECTOR FORM ON MEASURING OF PISTON  
SHIFTS IN THE VALVE****A. Gorbachyov, E. Kuleshova**

Error calculation introduced by a spherical reflector form to the piston linear shifts measurement in the valve is considered in this paper. Error analysis is made according to the error dependence from the reflector radius. This error is established to be equal to 0,15mm and influences sufficiently the shift measuring results. Software-based error compensation method is suggested.

**Keywords:** measuring of piston linear shifts, optical-electronic system, spherical reflector, linear shifts.

*Alexey Gorbachyov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, [gorbachyov@grv.ifmo.ru](mailto:gorbachyov@grv.ifmo.ru)

*Ekaterina Kuleshova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, [enkuleshova@mail.ru](mailto:enkuleshova@mail.ru)

**PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS****STATISTICAL CHARACTERISTICS OF HYPOTHESES, CAUSED BY NEURAL NETWORK  
WITH INTERCONNECTIONS, IMPLEMENTED BY FOURIER-HOLOGRAPHY TECHNIQUE****Z. Bekyasheva, V. Vasilev, A. Pavlov**

Possible mechanisms for creative, inductive and abductive hypotheses to be put forward by two layered neural network with bidirectional interconnections, implemented by Fourier-holography technique are investigated.

**Keywords:** holography, neural networks.

*Zoya Bekyasheva* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, zoya.bekyasheva@phoi.ifmo.ru

*Vladimir Vasilev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, D.Sc., Professor, vasilev@mail.ifmo.ru

*Alexander Pavlov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior staff scientist, pavlov@phoi.ifmo.ru

### FOCUSING PROPERTIES OF FRACTAL ZONE PLATES

**Ya. Muzychenko, A. Zinchik, S. Stafeev**

The results of analytical and computer modeling of Fresnel diffraction of mono- and polychromatic light sources from the zone plates with fractal structure are presented. It is shown that the axial irradiance has additional peaks of intensity and exhibits fractal behavior. It is demonstrated that the application of fractal zone plates allows reducing chromatic aberrations by white light illumination in comparison with conventional Fresnel zone plates. The modeling was realized for fractal zone plates with different fractal dimension and generation level.

**Keywords:** Fresnel diffraction, zone plates, fractal, self-similarity, fractal dimension, aberrations.

*Yana Muzychenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, myb@rambler.ru

*Alexander Zinchik* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, zinchik\_alex@mail.ru

*Sergey Stafeev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, The Dean, Department head, D.Sc., Professor, stafeevs@yahoo.com

### WAVEGUIDE NANOSTRUCTURES IN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

**D. Matveev**

Two- and three-dimensional quantum waveguides in homogeneous electric field are considered. Mathematical models are constructed and are estimated using direct variation method. Field-induced shift of electron bound state is demonstrated for nanostructures of this kind.

**Keywords:** quantum waveguides, bound states, spectrum estimations.

*Dmitry Matveev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, d.g.matveev@gmail.com

### ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

#### FORMATION OF THE INTERVAL VECTOR-MATRIX MODELING REPRESENTATIONS OF ANTHROPOCOMPONENTS-OPERATORS AS A PART OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

**N. Dudarenko, M. Polyakova, A. Ushakov**

Formation problem of the vector-matrix modeling description (MD) for complex dynamic system (DDS) including anthropocomponents-operators based on interval representations is solved. By use of interval arithmetic and algebra methods, the value growth estimation of relative interval systems components of MD DDS is formed at transition from transfer functions to vector-matrix representation of a space condition method. By the received estimations applicability degree of the sensitivity theory tools within the limits of the first order sensitivity function for an estimation of variations by functional of DDS degeneration on angular realizations of interval system parameters of criterion matrixes is defined.

**Keywords:** interval system parameter, vector-matrix representation, complex dynamic system, relative interval estimation, functional degeneration interval.

*Natalya Dudarenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, dudarenko@yandex.ru

*Mayya Polyakova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, 12noch@mail.ru

*Anatoly Ushakov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, Ushakov-avg@yandex.ru

#### INFORMATIVE FEATURE EXTRACTION OF PASSIVE LOCATION SEISMIC SENSOR SIGNALS

**E. Kozlov, T. Levkovskaya**

The analysis of seismic signals in passive location intelligent systems in terms of informative features selection is considered. Developed algorithm for the selection of informative features of seismic signals for a moving object (one person, group of people, cars) is described. Algorithm test results allow concluding the feasibility of its application in intelligent systems of objects and territory protection.

**Keywords:** seismic signals, informative features, classification of moving objects.

*Eduard Kozlov* – United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Postgraduate, kozloveduard@mail.by

*Tatyana Levkovskaya* – United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, senior researcher, PhD, tanya@newman.bas-net.by

**POINT SPECTRUM OF SCHRODINGER OPERATOR FOR TWO CONNECTED SEMICRYSTALS WITH KRONIG-PENNEY POTENTIALS****A. Skorynina**

Spectral problem for two connected one-dimensional semicrystals is considered in the framework of Kronig-Penney model. Two variants of this connection are studied. The dispersion equations are obtained. The existence of bound states is shown. The dependence of the eigenvalues in the system parameters is described. The monodromy matrix technique is used.

**Keywords:** spectrum, one-dimensional Schrodinger operator, periodic potential, semicrystal.

*Anastasiya Skorynina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, anastasiya2705@yandex.ru

**INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION  
MANUFACTURING CHARACTERISTICS OF GYRO-DEVICES PRECISION ASSEMBLIES****S. Yakovleva, V. Gavryusev, A. Scherbak**

This article presents the structural scheme of precision assemblies manufacturing providing stability of geometric shapes and dimensions and considering three interrelated step-by-step levels: material, detail, assembly. Main courses of dimensional instability have been revealed, probable criteria of dimensional stability estimation have been defined and methods for increasing and saving accuracy of devices have been suggested for every level.

**Keywords:** dimensional stability, precision elastic limit, conditional relaxation and creep limits, precision details and assemblies, dimensions stabilization.

*Svetlana Yakovleva* – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, Postgraduate, yorkunoi@gmail.com

*Vladislav Gavryusev* – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, leading specialist, PhD, Associate professor

*Alexander Scherbak* – Concern “CSRI Elektropribor”, JSC, section chief, D.Sc., a\_sch@gtm.ru

**COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES  
ECOLOGICAL RATIONING PROBLEMS DECISION WITH INFORMATION TECHNOLOGIES  
APPLICATION****N. Vedenina**

The software for determination of chemical compound and scantily explored matters danger class based on the system analysis and information processing of their elementary composition, physical and chemical properties and toxic characteristics of their classification models is suggested. The high-quality prognosis of ecological danger of chemical compounds and scantily explored matters can be carried out by this software. This publication presents the description of software in C# language with Microsoft.NET technology.

**Keywords:** chemical compounds, scantily explored matters, elemental composition, physical chemical characteristics, toxicological characteristics, waste matter model, information processing, system analysis, software complex.

*Natalya Vedenina* – “Promanalitika” Ltd., Volgograd branch, leading expert n.v.vedenina@mail.ru

**THE GEOPHYSICAL ENVIRONMENT ANALYSIS ALGORITHM****A. Dyomin, T. Voytyuk, V. Klimanov**

The article describes the system structure for collecting and processing of geophysical information. Informational objects classification based on grouping of physical signals upon homogeneous properties was carried out. The geophysical environment analysis algorithm was described. It could be used in measuring system design, meant for collecting and processing of all types of geophysical information in real time.

**Keywords:** geophysical information, algorithm, oil, measuring system, structure.

*Anatoly Dyomin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, dav\_60@mail.ru

*Tatiana Voytyuk* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, tanya\_4ever@mail.ru

*Vitaly Klimanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, v\_klimanov@mail.ru

**REALISTIC MODELING OF FREE WATER SURFACE ON ADAPTIVE “OCTAL TREE” MESHES****K. Nikitin**

An efficient method for flow modeling of incompressible viscous liquid with free border is presented. The method unites the projection method for solving the Navier-Stokes equations and the particle level set method for the free surface evolution. The method uses adaptively refined hexahedral meshes built “octal tree” tree data structure.

**Keywords:** computational hydrodynamics, free surface flows, computer graphics.

*Kirill Nikitin* – Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, postgraduate, nikitink@dubki.ru

## METHODS OF DIGITAL IMAGES MARKING IN THE FREQUENCY DOMAIN

**A. Tropchenko, Wang Jian**

The article deals with methods of images marking with digital watermarks, for example, for authentication of multimedia products. For combination of the implemented image compression algorithms based on wavelet transform with copyright protection algorithms, Xie Liehua method of wavelet marking is the most suitable. Just in that very method the digital signature is placed in the receptive significant portion of the transformed image, which is preserved the most completely by the compression algorithms.

**Keywords:** digital watermark, marking, wavelet, robustness.

*Alexander Tropchenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, tau@d1.ifmo.ru

*Wang Jian* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, wangjian119@sohu.com

## TOOL SYSTEM FOR SCALABLE PARALLEL PROGRAMS OF NUMERICAL CALCULATIONS DESIGN

**K. Isupov, V. Knyaz'kov**

Many applied problems of high dimensionality require performing of high-precision numerical calculations in the matrix algebra basis over a field of large numbers. Modern multiprocessor computer systems typically have 32 - or 64-bit architecture, which makes it difficult to perform operations on large numbers, and reduces the efficiency of these systems. A new method was proposed for performing calculations based on using the number system with parallel architecture as a basis for implementation of numerical calculations - a system of residual classes. Tool system is developed based on this method.

**Keywords:** software complex, scalable parallel calculations, system of residual classes, large numbers, MPI, OpenMP, technology of parallel programming, parallel programs.

*Konstantin Isupov* – Vyatka State University, student, slaer\_87@hotmail.com

*Vladimir Knyaz'kov* – Vyatka State University, Professor, D.Sc., Professor, kniazkov@list.ru

## FINITE AUTOMATA VALIDATION WITH VARIABLES IN FUNCTIONAL PROGRAMMING LANGUAGES

**Ya. Malakhovski, G. Korneev**

This article describes a domain-specific language (eDSL) for automata-based programming embedded into the Haskell programming language. Proposed eDSL supports extensive code reuse and validation of state-transition functions. This is achieved through developed representation of logical formula that is free from both fixed set of input variables and fixed set of predicates. This allows combination of states in automata even if they were designed for different sets of input variables.

**Keywords:** finite automata, functional programming, Haskell.

*Yan Malakhovski* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, trojan@rain.ifmo.ru

*Georgiy Korneev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, kgeorgiy@rain.ifmo.ru

## HTML, MHT AND WORD PROCESSING ML DOCUMENTS GENERATION SYSTEM

**D. Deyev, Yu. Okulovsky**

We consider printable documents creation from business-applications and related generative programming problems. We give a description of Thorn language, which was designed for generative programming. Applying of Thorn for creation of HTML and MHT documents is covered. We consider WordProcessingML documents, list main related difficulties, and Thorn solution for WordProcessingML. A new technology that converts documents to the program that synthesizes it, is described.

**Keywords:** code generation programming, documents templates.

*Dmitry Deyev* – Ural State Forest Engineering University, assistant, deyeff@gmail.com

*Yuri Okulovsky* – Ural State University named after A. M. Gorky, laboratory head, PhD, yuri.okulovsky@gmail.com

## PROBLEM-ORIENTED PROCESSORS DESIGN

**R. Kovyazin, N. Postnikov**

The paper concerns selection of an appropriate CPU while designing a modern management-information system (MIS) with application level programming. It is shown that the traditional MIS design methodology not always provides suitable solution. In that case a new problem-oriented CPU is necessary to be created. A number of different subjects involved in the CPU design is researched: microarchitecture, instruction set architecture (ISA), instrumental tools, etc. This paper describes unique architecture of problem-oriented CPU for real-time digital signal processing named NL3 designed by LMT Ltd.

**Keywords:** VLIW, digital signal processing, microarchitecture, instruction set architecture.

*Rustam Kovyazin* – LMT Ltd., engineer, rus-k@yandex.ru

*Nikolai Postnikov* – LMT Ltd., Chief engineer, PhD, nick.postnikov@gmail.com

**QUANTITATIVE ESTIMATION METHOD OF DIGITAL IMAGE CONTRAST****V. Bezzubik, N. Belashenkov, V. Nikiforov**

A novel approach to the quantitative evaluation of digital image contrast is proposed on the basis of “center of mass” model. Comparative study results of new algorithm robustness to spatial noise are represented. It is shown that reliability of image contrast evaluation may be increased considerably in comparison with well-known techniques. Recommendations of new method application in optoelectronic systems of thermal cameras and digital microscopes are formulated.

**Keywords:** digital image processing, image contrast, noise reduction.

*Vitaly Bezzubik* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Scientific researcher, bezzubik@mail.ru

*Nickolai Belashenkov* – Public liable company “LOMO”, Assistant of technical director, PhD, belashenkov@gmail.com

*Vladimir Nikiforov* – Public liable company “LOMO”, Technical director, D.Sc., Professor, nikiforov@mail.ifmo.ru

**COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS****ALGORITHM FOR THRESHOLDS COMPUTING INCREASING THE AUTOMATION OF GRAPHIC IMAGES RECOGNITION SYSTEMS****Yu. Gatchin, S. Moskalenko**

This article represents the algorithm that is used to identify all linear objects in the engineer drawings. After finishing its work the algorithm uses extracted data set to compute different thresholds that are typically entered by human in different image analysis systems. In this way the automation of such systems increases.

**Keywords:** segmentation, linear object, threshold, image recognition.

*Yuri Gatchin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, gatchin@mail.ifmo.ru

*Stanislav Moskalenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, stan.moskalenko@gmail.com

**MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES****THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF A SCANNING PROBE MICROSCOPE FOR VISUALIZATION OF SURFACE TOPOGRAPHY OF BIOLOGICAL OBJECTS****A. Stovpyaga, I. Lobova**

Quantitative analysis of surface topography images for biological objects (red cells) obtained by scanning probe microscope (SPM) using probes of various types and geometric parameters is done. The results of image processing established the influence of geometric parameters of probes in SPM images of samples are traced and tentative criterion for probe selection while red cells research is determined.

**Keywords:** scanning probe microscopy, scanning electron microscopy, nanopipette, nanoprobe, image analysis

*Alexander Stovpyaga* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, sanja100v@mail.ru

*Inna Lobova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, inna\_kurchatov@mail.ru

**INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS****APPROACHES TO INFORMATION SECURITY SUPPORT IN THE OPEN DISTRIBUTED MULTI-AGENT VIRTUAL BUSINESS ENVIRONMENTS****A. Masloboev**

The main information security problems and types of threats of the open problem-oriented distributed agent-based information systems are considered in this paper. Different approaches to information security support (protection) in the open multi-agent virtual business environments based on mobile agent security system with centralized and decentralized control implementation and pro-active software components (agents) behavior simulation are proposed. Principles of functioning and common security system structure in the open multi-agent virtual business environment of innovation development have been designed.

**Keywords:** information security, distributed multi-agent systems, virtual business environment, simulation.

*Andrey Masloboev* – Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, PhD., Associate professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

**NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION****THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE VIRTUAL EDUCATIONAL ENVIRONMENT****A. Kurkin, T. Shelamova**

The necessity of control systems automation for virtual educational environments is formulated. A control terminal model, designed for the Virtual History Museum of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, is considered.

**Keywords:** information technology, information educational environment, virtual educational environment, control-automation system, control terminal, content.

*Andrey Kurkin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, lecturer, kurkin@mail.ifmo.ru

*Tatyana Shelamova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, shelamova@bk.ru

## **ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT**

### **SMALL BUSINESS COMPETITIVENESS OF SMOLENSK REGION: BRANCH AND CLUSTER ANALYSIS**

**E. Chugunova**

Cluster and branch analysis of Smolensk region small business in comparison with regions of the Central federal districts of Russia is made. Possible integration trends of the CFD regions of Russia in small business clusters from the point of view of their separate branches development level are defined.

**Keywords:** small business, cluster, region, branch, analysis

*Ekaterina Chugunova* – Smolensk University for Humanities, senior teacher, Ekaterina\_smol@mail.ru

### **THE ROLE OF STRATEGIC DECISIONS IN CONTROL SYSTEM OF THE COMMERCIAL ORGANIZATION**

**O. Vasyukhin, Zh. Zarubina**

Intrinsic definitions of strategic management, their importance for efficiency increase of managing subjects' activity are represented in the article. The economic climate of managing subjects in sphere of capital construction and reconstruction and also the climate of their innovative processes are analyzed. Key strategic decisions necessary and sufficient for increase of productivity of innovative activity are defined and the general scheme of strategic management in innovation is offered.

**Keywords:** strategic management, innovations, competitiveness, effectiveness, management.

*Oleg Vasyukhin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Department, D. Sc., Professor, prof-vov52@mail.ru

*Zhanna Zarubina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior tutor, zhanna\_sushilova@mail.ru

### **PRINCIPLES AND APPROACHES TO THE ENTERPRISE COMPETITIVENESS MAINTENANCE**

**E. Pavlova, J. Sushilova**

Theoretical aspects of "competitiveness" concept are analyzed; key characteristics of the enterprise competitiveness and an estimation of a competitive position of separate products in the different markets are presented in the article. Criteria and main principles of the enterprise competitiveness maintenance are formulated.

**Keywords:** competitiveness, efficiency, profitableness, solvency.

*Elena Pavlova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph D, Associate professor, ea\_pavlova@mail.ru

*Julia Sushilova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior tutor, sushilova@mail.ru

## **BRIEF REPORTS**

### **ARRANGEMENT OPTIMIZATION OF AXES BUNCH IN EXPERIMENTAL DETERMINATION OF INERTIA TENSOR**

**S. Shakhovval, G. Mel'nikov**

The dependence of inertia tensor identification accuracy from angles between the axes is studied in the problem of inertia tensor evaluation.

**Keywords:** inertia tensor, identification of parameters, system conditionality.

*Sergey Shakhovval* – ZAO «Ericsson Corporation AO», data base administrator, shakhovvalsergey@gmail.com

*Gennady Mel'nikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, melnikov@ifmo.ru

### **PARAMETRICAL OPTIMIZATION OF DIFFICULT TECHNOLOGICAL PROCESSES OF OPTICAL MANUFACTURE WITH TECHNOLOGIES OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

**D. Soloviev, I. Bondarenko**

Software design method of automation extract systems of an optical fibre for parametrical optimization by means of technologies of neural networks is considered.

**Keywords:** software design, neural network algorithm.

*Denis Soloviev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, assistant, 9218964588@mail.ru

*Igor Bondarenko* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, igorlitmo@rambler.ru

**ESTIMATION OF ECONOMIC DAMAGE FROM COMPUTER ATTACKS ON  
GEOGRAPHICALLY-DISTRIBUTED NETS WITH SECURE MOBILE WORKSTATIONS****D. Alekseev**

The process of mobile workstations protection as a part of automated state administration system and the task of financial loss estimation from computer attacks are considered.

**Keywords:** mobile workstations, assessment of financial losses.

*Dmitry Alekseev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, dima99@gmail.com

**ARTIFICIAL INTELLIGENT TECHNOLOGIES FOR DISTRIBUTED COMPUTATION  
FOR COMPLEX SYSTEM SIMULATION****S. Maryin, A. Larchenko, S. Kovalchuk, K. Knyaz'kov, E. Bolgova, A. Boukhanovsky**

The paper covers issues of technological support for computer simulation tasks performed using high-performance distributed composite applications.

**Keywords:** distributed computation, composite application, computer simulation

*Sergey Maryin* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior researcher, sm.niinkt@gmail.com

*Aleksey Larchenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior researcher, PhD, aleksey.larchenko@gmail.com

*Sergey Kovalchuk* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, kovalchuk@mail.ifmo.ru

*Konstantin Knyaz'kov* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior researcher, constantinvk@gmail.com

*Ekaterina Bolgova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior researcher, katerina.bolgova@gmail.com

*Alexander Boukhanovsky* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Director, D.Sc., Professor, avb\_mail@mail.ru

**HIGH-PERFORMANCE SOFTWARE SYSTEM FOR DYNAMIC MARINE OBJECTS SIMULATION  
IN EXTREME CONDITIONS****A. Bezgodov, S. Ivanov, A. Boukhanovsky**

The paper covers issues of dynamic marine objects simulation in extreme operation conditions.

**Keywords:** ship dynamics, extreme conditions, computer simulation.

*Alexey Bezgodov* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior staff scientist, demiurghg@gmail.com

*Sergey Ivanov* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior staff scientist, PhD, svivanov@mail.ifmo.ru

*Alexander Boukhanovsky* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Director, D.Sc., Professor, avb\_mail@mail.ru

*Уважаемые читатели!*

«Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание. Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук». Все публикации в журнале проходят рецензирование. Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска - 120 страниц.

Журнал печатает материалы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по следующим направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оптотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

На журнал «Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» можно оформить подписку в любом отделении связи, а также в редакции журнала (Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, комн. 330). Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы).

Сайт журнала <http://books.ifmo.ru/ntv/>

## ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

### ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущества (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

### ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал одинарный, поля сверху 20 мм, остальные поля 25 мм. Абзацный отступ 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полужирной пустой строкой, а от последующего текста одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста — Times New Roman, прямой; функции — Times New Roman, прямой; переменной — Times New Roman, наклонный; греческих букв — Symbol, прямой; символов — Symbol, прямой; матрицы-вектора — Times New Roman, прямой, полужирный; чисел — Times New Roman, прямой. Размеры: обычный — 12 pt, крупный индекс — 10 pt, мелкий индекс — 8 pt, крупный символ — 16 pt, мелкий символ — 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул. Разделительный знак десятичных дробей — запятая.

При оформлении рисунков и графиков используется шрифт Times New Roman. Стиль написания переменных должен соответствовать требованиям к основному тексту.

Используются только единицы измерения, соответствующие системе СИ.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Нумерация позиций — согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**Более подробную информацию смотрите на сайте <http://books.ifmo.ru/ntv/>**

Подписано к печати 15.10.2010 Тираж 350 экз. Заказ № 18(70)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»  
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи  
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.  
Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать  
(Газеты. Журналы)

<b>OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES.....</b>	<b>1</b>
Probability distribution of level-crossing intervals of the normal random process and the structure of an optical near-field location system with noise synchronization	<i>Ye. Lebed'ko, M. Serikova</i> 1
Design of the tunable mirror objective for pulse terahertz reflectometer spectrograph-intravisor	<i>Ye. Novoselov, V. Bepalov</i> 6
Three-axis optical-electronic autocollimator with increased sensitivity of the roll angle measuring	<i>I. Konyakhin, T. Kopylova</i> 9
The influence analysis of spherical reflector form on measuring of piston shifts in the valve	<i>A. Gorbachyov, E. Kuleshova</i> 12
<b>PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS.....</b>	<b>17</b>
Statistical characteristics of hypotheses, caused by neural network with interconnections, implemented by Fourier-holography technique	<i>Z. Bekyasheva, V. Vasilev, A. Pavlov</i> 17
Focusing properties of fractal zone plates	<i>Ya. Muzychenko, A. Zinchik, S. Stafeev</i> 22
Waveguide nanostructures in external electric field	<i>D. Matveev</i> 28
<b>ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS .....</b>	<b>32</b>
Formation of the interval vector-matrix modeling representations of anthropocomponents-operators as a part of complex dynamic systems	<i>N. Dudarenko, M. Polyakova, A. Ushakov</i> 32
Informative feature extraction of passive location seismic sensor signals	<i>E. Kozlov, T. Levkovskaya</i> 36
Point spectrum of Schrodinger operator for two connected semicrystals with Kronig-Penney potentials	<i>A. Skorynina</i> 41
<b>INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION .....</b>	<b>47</b>
Manufacturing characteristics of gyro-devices precision assemblies	<i>S. Yakovleva, V. Gavryusev, A. Scherbak</i> 47
<b>COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES .....</b>	<b>51</b>
Ecological rationing problems decision with information technologies application	<i>N. Vedenina</i> 51
The geophysical environment analysis algorithm	<i>A. Dyomin, T. Voytyuk, V. Klimanov</i> 56
Realistic modeling of free water surface on adaptive "octal tree" meshes	<i>K. Nikitin</i> 60
Methods of digital images marking in the frequency domain	<i>A. Tropchenko, Wang Jian</i> 64
Tool system for scalable parallel programs of numerical calculations design	<i>K. Isupov, V. Knyaz'kov</i> 68
Finite automata validation with variables in functional programming languages	<i>Ya. Malakhovski, G. Korneev</i> 73
HTML, MHT and Word processing ML documents generation system	<i>D. Deyev, Yu. Okulovsky</i> 77
Problem-oriented processors design	<i>R. Kovyazin, N. Postnikov</i> 81
Quantitative estimation method of digital image contrast	<i>V. Bezzubik, N. Belashenkov, V. Nikiforov</i> 86
<b>COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS.....</b>	<b>89</b>
Algorithm for thresholds computing increasing the automation of graphic images recognition systems	<i>Yu. Gatchin, S. Moskalenko</i> 89
<b>MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES.....</b>	<b>94</b>
The influence of the parameters of a scanning probe microscope for visualization of surface topography of biological objects	<i>A. Stovpyaga, I. Lobova</i> 94
<b>INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS.....</b>	<b>98</b>
Approaches to information security support in the open distributed multi-agent virtual business environments	<i>A. Masloboev</i> 98
<b>NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION.....</b>	<b>104</b>
The automated control system of the virtual educational environment	<i>A. Kurkin, T. Shelamova</i> 104
<b>ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT .....</b>	<b>110</b>
Small business competitiveness of Smolensk region: branch and cluster analysis	<i>E. Chugunova</i> 110
The role of strategic decisions in control system of the commercial organization	<i>O. Vasyukhin, Zh. Zarubina</i> 114
Principles and approaches to the enterprise competitiveness maintenance	<i>E. Pavlova, J. Sushilova</i> 117
<b>BRIEF REPORTS.....</b>	<b>120</b>
Arrangement optimization of axes bunch in experimental determination of inertia tensor	<i>S. Shakhovai, G. Mel'nikov</i> 120
Parametrical optimization of difficult technological processes of optical manufacture with technologies of artificial neural networks	<i>D. Soloviev, I. Bondarenko</i> 121
Estimation of economic damage from computer attacks on geographically-distributed nets with secure mobile workstations	<i>D. Alekseev</i> 122
Artificial intelligent technologies for distributed computation for complex system simulation	<i>S. Maryin, A. Larchenko, S. Kovalchuk, K. Knyaz'kov, E. Bolgova, A. Boukhanovsky</i> 123
High-performance software system for dynamic marine objects simulation in extreme conditions	<i>A. Bezgodov, S. Ivanov, A. Boukhanovsky</i> 125
<b>SUMMARY.....</b>	<b>127</b>