

## ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Теоретическое исследование свойств вогнутой пропускающей голограммной дифракционной решетки

*Муслимов Э.Р.* 1

Исследование схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье

*Назаров В.Н., Соколов Ю.А.* 6

## ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

Дифракция однопериодных терагерцовых волн с гауссовым поперечным распределением

*Езерская А.А., Иванов Д.В.,* 10

О движении центра тяжести и дисперсионном расплывании в прозрачной диэлектрической среде исходно однопериодного оптического импульса

*Капойко Ю.А., Козлов С.А.* 16

Импульсный терагерцовый рефлектометр

*Беспалов В.Г., Городецкий А.А., Грачев Я.В.,* 19  
*Козлов С.А., Новоселов Е.В.*

## МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА

Пути повышения нагрузочной способности и долговечности планетарных редукторов отечественного производства

*Берлова Е.А.* 24

## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Условное контролируемое фазовое преобразование квантовых состояний электромагнитного поля

*Мирошниченко Г.П., Трифанов А.И.* 29

Управление по выходу линейным параметрически неопределенным объектом в условиях возмущающих воздействий и неучтенной динамики

*Бобцов А.А., Шаветов С.В.* 33

Интеллектуальные информационные системы магнитных измерений

*Коробейников А.Г., Копытенко Ю.А.,* 39  
*Исмаилов В.С.*

Многочастичные состояния в искривленных слоистых наноструктурах

*Гаврилов М.И., Попов И.Ю., Попов С.И.* 45

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Портфель заказов под управлением экспертной системы

*Гнездилова С.А.* 48

Создание имитационной модели сборочной линии с использованием системы DELMIA

*Алёшина Е.Е., Саломатина А.А.,* 50  
*Яблочников Е.И.*

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Реализация радиально-базисной нейронной сети на массивно-параллельной архитектуре графического процессора

*Матвеева Н.О.* 54

Метод навигации по тексту документа с помощью автоматической обработки его содержимого

*Табарча А.И.* 58

Оптимизация кластера с ограниченной доступностью кластерных групп

*Богатырев В.А., Богатырев С.В.,* 63  
*Богатырев А.В.*

Псевдорегулярные кодовые шкалы для цифровых преобразователей угла

*Ожиганов А.А., Прибыткин П.А.* 67

Реализация алгоритма шумоподавления в речевом тракте систем мобильной связи на базе СБИС

*Чураев С.О., Адамова А.Д., Палташев Т.Т.* 72

Внесение изменений в автоматные программы

*Федотов П.В., Степанов О.Г.* 77

Проблемы эффективного использования сетевых сервисов

*Дергачев А.М.* 83

Методика сборки и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования

*Тишкин В.О.* 87

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Изготовление и аттестация зондов из стеклянных микрокапилляров для сканирующего зондового микроскопа

*Стоняга А.В., Французов Г.С.* 93

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Информационная безопасность при облачных вычислениях: проблемы и перспективы

*Беккер М.Я., Гатчин Ю.А., Кармановский Н.С.,* 97  
*Терентьев А.О., Федоров Д.Ю.*

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Технология LEGO MINDSTORMS NXT в обучении студентов основам адаптивного управления

*Бобцов А.А., Капитанюк Ю.А., Капитонов А.А.,* 103  
*Колубин С.А., Пыркин А.А., Чепинский С.А.,*  
*Шаветов С.В.*

Методология проектирования тренажеров с иммерсивными обучающими средами

*Сергеев С.Ф.* 109

Оценка числа победителей заключительных этапов олимпиад

*Васильев В.Н., Харченко Т.В., Клименко В.В.* 114

## ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ

Концептуальные аспекты системы управления информатизацией предприятия

*Литвиненко О.А.* 120

Развитие государственного регулирования предпринимательской деятельности в сфере торговли

*Луговской Р.А.* 123

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Каскадная схема идентификации частоты гармонического сигнала

*Арановский С.В., Бобцов А.А., Горин А.В.* 129

Применение метода В-слайнов для расчета Х-разветвителей, изготовленных методом диффузии титана в подложках ниобата лития

*Серебрякова В.С., Дейнека Г.Б.* 130

Методы и технологии комплексного информационного обеспечения жизненного цикла инноваций

*Маслобоев А.В., Шишаев М.Г.* 132

Двухлинзовые склеенные объективы с асферической поверхностью второго порядка

*Андреев Л.Н., Ежова В.В.* 134

Метод повышения надёжности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматике

*Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я.,* 136  
*Пирожникова О.И.*

## SUMMARY



**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)



# 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 15.12.2010 Тираж 350 экз. Заказ № 19(71)

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)

## OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

Theoretical research of concave transmission hologram diffraction grating properties	<i>E. Muslimov</i>	1
Diffraction control scheme of object displacements with the variable scale of Fourier spectrum	<i>V. Nazarov, Yu. Sokolov</i>	6

## PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

Diffraction of one-period terahertz electromagnetic waves with Gaussian transversal distribution	<i>A. Ezerskaya, D. Ivanov, V. Bespalov, S. Kozlov</i>	10
On the center of gravity movement and dispersive spreading of the initial single-period optical pulse in the transparent dielectric media	<i>Yu. Kapoyko, S. Kozlov</i>	16
Pulse terahertz reflectometer	<i>V. Bespalov, A. Gorodetsky, Ya. Grachyov, S. Kozlov, Ye. Novosyolov</i>	19

## MECHANICS AND MECHATRONICS

Ways of increasing load capacity and durability of domestic planetary reducers	<i>E. Berlova</i>	24
--	-------------------	----

## ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

Conditional controlled phase shift operation for quantum states of electromagnetic field	<i>G. Miroshnichenko, A. Trifanov</i>	29
Output control of linear parametrically uncertain object in conditions of disturbances and neglected dynamics	<i>A. Bobtsov, S. Shavetov</i>	33
Intelligent information systems of magnetic measurements	<i>A. Korobeynikov, Yu. Kopytenko, V. Ismagilov</i>	39
Many-particles states in curved layered nanostructures	<i>M. Gavrilov, I. Popov, S. Popov</i>	45

## INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION

Portfolio of orders under expert system control	<i>S. Gnezdilova</i>	48
Simulation model creation of the assembly line with Delmia system	<i>E. Alyoshina, A. Salomatina, Ye. Yablochnikov</i>	50

## COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

Realization of the radial basic neural network on massive parallel GPU	<i>N. Matveyeva</i>	54
Navigation method through the text of the document by its content automatic processing	<i>A. Tabarcha</i>	58
Clusters optimisation with the limited availability of clusters groups	<i>V. Bogatyrev, S. Bogatyrev, A. Bogatyrev</i>	63
Pseudoregular code scales for digital angular transducers	<i>A. Ozhiganov, P. Pribytkin</i>	67
Development of integrated noise reduction algorithm in the voice channel of cell communication systems for ASIC	<i>S. Churayev, A. Adamova, T. Paltashev</i>	72
Modification of automata programs	<i>P. Fedotov, O. Stepanov</i>	77
Problems of efficient use of network services	<i>A. Dergachev</i>	83
Technique of data assemblage and processing, received in 3D scanning process	<i>V. Tishkin</i>	87

## MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

Making of probes for scanning probe microscope from glass capillary and their attestation	<i>A. Stovpyaga, G. Frantsuzov</i>	93
---	------------------------------------	----

## INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

Information security in cloud computing: problems and prospects	<i>M. Becker, Yu. Gatchin, N. Karmanovskiy, A. Terentiev, D. Fyodorov</i>	97
---	---	----

## NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

Lego Mindstorms NXT for teaching the principles of adaptive control theory to students	<i>A. Bobtsov, Yu. Kapitanyuk, A. Kapitonov, S. Kolyubin, A. Pyrkin, S. Chepinskiy, S. Shavetov</i>	103
Methodology of immersive learning environment simulator design	<i>S. Sergeev</i>	109
Estimation of the final Olympic stages participants' number	<i>V. Vasilev, T. Kharchenko, V. Klimenko</i>	114

## ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

Conceptual aspects of business informatization control system	<i>O. Litvinenko</i>	120
Development of state regulation of enterprise activity in trade sphere	<i>R. Lugovskoy</i>	123

## BRIEF REPORTS

Cascade scheme for harmonic signal frequency identification	<i>S. Aranovskiy, A. Bobtsov, A. Gorin</i>	129
B-splines method application for calculation of X-splitters, manufactured by diffusion of titanium in the substrate of lithium niobate	<i>V. Serebryakova, G. Deineka</i>	130
Methods and technologies for complex information support of innovation life-cycle	<i>A. Masloboev, M. Shishaev</i>	132
Two-lens stuck objectives with a aspheric surface of the second order	<i>L. Andreev, V. Ezhova</i>	134
Reliability increase method of elastic sensing elements of control systems and automation	<i>V. Tklich, R. Labkovskaya, O. Pirozhnikova</i>	136

## SUMMARY

УДК 681.785.552.2

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОГНУТОЙ ПРОПУСКАЮЩЕЙ ГОЛОГРАММНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Э.Р. Муслимов

Проведено теоретическое исследование абберационных и фокусирующих свойств новой элементной базы – пропускающей вогнутой голограммной дифракционной решетки (ПВГДР). Показана возможность построения на основе такой решетки спектрографа с плоским полем, приведены выражения для определения параметров схемы и параметров записи. Проведено моделирование ряда схем таких спектрографов, на его основе выработаны рекомендации к выбору конструктивных параметров.

**Ключевые слова:** ПВГДР, абберационная функция, коррекция аббераций, плоское поле, моделирование.

### Введение

Известно, что вогнутая дифракционная решетка может являться единственным элементом оптической схемы спектрального прибора. Кроме того, голограммные дифракционные решетки (ГДР) в сравнении с классическими нарезными обладают широкими возможностями для коррекции аббераций. По сравнению же с неклассическими нарезными решетками они характеризуются меньшим уровнем рассеянного света, равномерностью дифракционной эффективности по спектральному диапазону, а также возможностью изготовления решеток больших размеров на поверхности любой формы. При этом на практике наиболее распространены отражательные вогнутые голограммные дифракционные решетки (ВГДР). В то же время все вышеперечисленные достоинства относятся и к ПВГДР. Помимо этого, использование таких дифракционных решеток позволило бы в ряде случаев получить более простые конструктивные решения [1], а также, учитывая успехи в технологии их изготовления, увеличить дифракционную эффективность [2]. В связи с этим представляется актуальным исследование абберационных свойств пропускающих дифракционных решеток и их коррекционных возможностей.

### Теоретическое исследование

ГДР представляет собой зарегистрированную на светочувствительном материале интерференционную картину, образованную двумя когерентными пучками света. Записывающие когерентные пучки получают, разделяя светоделительными зеркалами излучение лазера. При этом форма штрихов и расстояние между ними определяются положением записывающих источников и длиной волны записи [3]. Совмещенная схема записи и работы ПВГДР приведена на рис. 1.

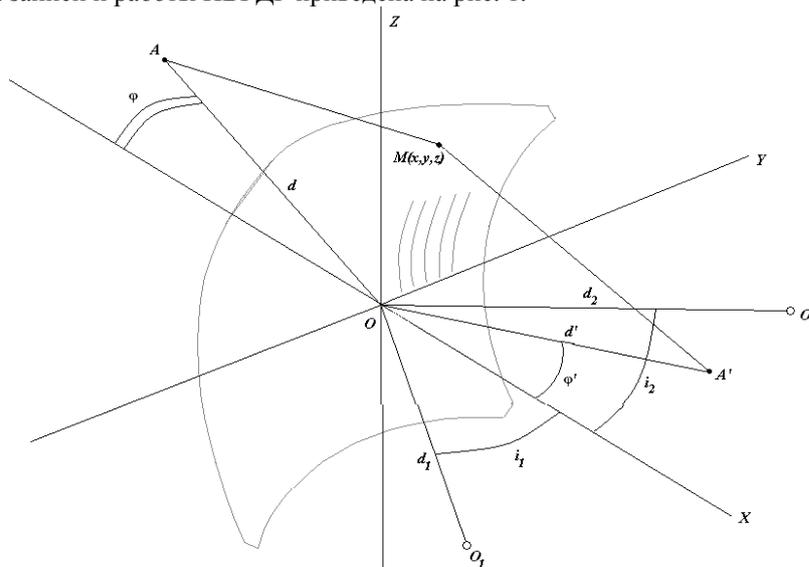


Рис. 1. Схема записи и работы ПВГДР:  $A$  – точка на входной щели;  $A'$  – ее изображение;  $O$  – вершина решетки;  $M(x, y, z)$  – произвольная точка на поверхности решетки;  $O_1$  и  $O_2$  – точечные источники записи;  $\varphi$ ,  $\varphi'$  – углы падения и дифракции соответственно;  $d$ ,  $d'$  – удаление от вершины решетки точек  $A$  и  $A'$  соответственно;  $(i_1, d_1)$  и  $(i_2, d_2)$  – полярные координаты источников записи

Для исследования абберационных и фокусирующих свойств вогнутых отражательных дифракционных решеток принято использовать характеристическую (абберационную) функцию [4–7]. Аналогичный подход для исследования свойств классической (имеющей эквидистантные прямолинейные штрихи) пропускающей вогнутой дифракционной решетки использован в работе [5]. Развита в этой работе теория распространена на ПВГДР.

Функция оптического пути для луча, выходящего из центра входной щели и дифрагированного в произвольной точке решетки, имеет вид

$$V = (AM) + (MA') - k\lambda m(y, z),$$

где  $k$  – порядок дифракции;  $\lambda$  – длина волны;  $m(y, z)$  – количество штрихов на поверхности решетки между точками  $O$  и  $M$ ;  $N$  – число штрихов на 1 мм поверхности решетки в ее центре;  $R$  – радиус поверхности решетки;  $\lambda_0$  – длина волны записи.

Разлагая функцию оптического пути в ряд и группируя слагаемые, получаем:

$$V = -yF_0 + \frac{y^2}{2R}F_1 + \frac{z^2}{2R}F_2 + \frac{y^3}{2R^2}F_3 + \frac{yz^2}{2R^2}F_4 + \frac{y^4}{8R^3}F_5 + \frac{y^2z^2}{4R^3}F_6 + \frac{z^4}{8R^3}F_7 + \dots \quad (1)$$

Именно соотношение (1) и принято называть абберационной функцией.

Условие  $F_0 = 0$  дает основное уравнение пропускающей ГДР. Каждый из коэффициентов в разложении (1) характеризует определенную абберацию:  $F_1$  характеризует фокусировку в меридиональной плоскости и абберацию дефокусировки соответственно;  $F_2$  – фокусировку в сагиттальной плоскости и астигматизм соответственно;  $F_3$  – меридиональную кому;  $F_4$  – сагиттальную кому;  $F_5, F_6, F_7$  – абберации третьих порядков [7]. Равенство коэффициента  $F_i$  нулю является условием коррекции соответствующей абберации.

Первые четыре коэффициента имеют следующий вид:

$$F_0 = -\sin \varphi + \sin \varphi' - \frac{k\lambda}{\lambda_0} (\sin i_1 - \sin i_2),$$

$$F_1 = R \left[ \left( -\frac{\cos^2 \varphi}{d} + \frac{\cos \varphi}{R} \right) + \left( \frac{\cos^2 \varphi'}{d'} - \frac{\cos \varphi'}{R} \right) \right] - \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_1,$$

$$F_2 = R \left[ \left( -\frac{1}{d} + \frac{\cos \varphi}{R} \right) + \left( \frac{1}{d'} - \frac{\cos \varphi'}{R} \right) \right] - \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_2,$$

$$F_3 = R^2 \left[ -\frac{\sin \varphi}{d} \left( -\frac{\cos^2 \varphi}{d} + \frac{\cos \varphi}{R} \right) - \frac{\sin \varphi'}{d'} \left( \frac{\cos^2 \varphi'}{d'} - \frac{\cos \varphi'}{R} \right) \right] - \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_3,$$

где слагаемые, содержащие параметры голографирования, обозначены в виде коэффициентов

$$H_1 = R \left( \frac{\cos^2 i_1}{d_1} - \frac{\cos i_1}{R} \right) - R \left( \frac{\cos^2 i_2}{d_2} - \frac{\cos i_2}{R} \right),$$

$$H_2 = R \left( \frac{1}{d_1} - \frac{\cos i_1}{R} \right) - R \left( \frac{1}{d_2} - \frac{\cos i_2}{R} \right), \quad (2)$$

$$H_3 = R^2 \frac{\sin i_1}{d_1} \left( \frac{\cos^2 i_1}{d_1} - \frac{\cos i_1}{R} \right) - R^2 \frac{\sin i_2}{d_2} \left( \frac{\cos^2 i_2}{d_2} - \frac{\cos i_2}{R} \right).$$

Отметим, что соотношения (2) для коэффициентов, определяющих координаты источников записи, полностью совпадают с соответствующими соотношениями для отражательной голограммной решетки. Это позволяет при определении параметров записи по известным значениям  $H_i$  использовать алгоритмы и программы, разработанные для отражательных голограммных решеток.

Для использования современных серийных фотоэлектрических многоканальных приемников необходимо, чтобы спектр фокусировался на плоскости. Найдем соотношения, позволяющие определить параметры схемы и записи ПВГДР, при которых спектр располагается на плоскости, перпендикулярной лучу средней длины волны  $\lambda_{cp}$ , т.е.

$$d' = \frac{d'_{cp}}{\cos(\varphi'_0 - \varphi')}.$$

Минимизации дефокусировки по полю будем добиваться по методу наименьших квадратов. Из практики известно, что для остальных аббераций достаточно осуществлять коррекцию на средней длине

волны [7]. Все условия записываются для центра входной щели, положение которой считается заданным. Тогда условия коррекции aberrаций на плоскости задаются системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial I_1}{\partial H_1} = 0, \\ \frac{\partial I_1}{\partial d'_{cp}} = 0, \\ R \left( -\frac{1}{d} + \frac{\cos \varphi}{R} \right) + \left( \frac{1}{d'_{cp}} - \frac{\cos \varphi'_0}{R} \right) - \frac{k\lambda_{cp}}{\lambda_0} H_2 = 0, \\ R^2 \left[ -\frac{\sin \varphi}{d} \left( -\frac{\cos^2 \varphi}{d} + \frac{\cos \varphi}{R} \right) + \frac{\sin \varphi'_0}{d'_{cp}} \left( \frac{\cos^2 \varphi'_0}{d'_{cp}} - \frac{\cos \varphi'_0}{R} \right) \right] - \frac{k\lambda_{cp}}{\lambda_0} H_3 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$I_1 = \int_{\varphi'_1}^{\varphi'_2} F_1 d\varphi'.$$

Учтем также зависимость длины волны от угла дифракции

$$\frac{\sin \varphi - \sin \varphi'}{\sin i_1 - \sin i_2} = \frac{k\lambda}{\lambda_0}$$

и частоты штрихов от углов голографирования

$$\sin i_1 - \sin i_2 = N\lambda_0.$$

Тогда из первых двух уравнений системы (3) после интегрирования и дифференцирования получим систему линейных уравнений вида

$$\begin{cases} \frac{R}{6d'_{cp}} a_1 + a_2 - \frac{H_1}{N\lambda_0} a_3 = 0, \\ -\frac{R}{d'_{cp}} a_3 - a_4 + \frac{H_1}{N\lambda_0} a_5 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \cos 2\varphi'_0 \sin \varphi' \cos^5 \varphi' + (5 \cos 2\varphi'_0 + 6 \sin^2 \varphi'_0) \left( \frac{3}{8} \varphi' + \frac{1}{4} \sin 2\varphi' + \frac{1}{32} \sin 4\varphi' \right) - \sin 2\varphi'_0 \cos^6 \varphi' \Big|_{\varphi'_1}^{\varphi'_2}, \\ a_2 &= S \cos \varphi'_0 \left( \sin \varphi' - \frac{1}{3} \sin^3 \varphi' \right) - S \sin \varphi'_0 \frac{\cos^3 \varphi'}{3} - \cos \varphi'_0 \left( \frac{3}{8} \varphi' + \frac{1}{4} \sin 2\varphi' + \frac{1}{32} \sin 4\varphi' \right) + \sin \varphi'_0 \frac{\cos^4 \varphi'}{4} \Big|_{\varphi'_1}^{\varphi'_2}, \\ a_3 &= -\cos \varphi'_0 \frac{\cos^4 \varphi'}{4} + \sin \varphi'_0 \left( \frac{\varphi'}{8} - \frac{\sin 4\varphi'}{32} \right) - \sin \varphi \cos \varphi'_0 \left( \sin \varphi' - \frac{1}{3} \sin^3 \varphi' \right) + \sin \varphi \sin \varphi'_0 \frac{\cos^3 \varphi'}{3} \Big|_{\varphi'_1}^{\varphi'_2}, \\ a_4 &= -S \cos \varphi' - S \sin \varphi \cdot \varphi' - \frac{\sin^2 \varphi'}{2} + \sin \varphi \sin \varphi' \Big|_{\varphi'_1}^{\varphi'_2}, \\ a_5 &= \frac{1}{2} \varphi' - \frac{\sin 2\varphi'}{4} + \sin^2 \varphi \cdot \varphi' + 2 \sin \varphi \cos \varphi' \Big|_{\varphi'_1}^{\varphi'_2}, \\ S &= -\frac{R \cos^2 \varphi}{d} + \cos \varphi. \end{aligned}$$

Решая систему уравнений (4), находим значения  $H_1$  и  $d'_{cp}$ , затем из уравнений (3) определяем  $H_2$  и  $H_3$ , после чего из уравнений (2) при известных значениях  $N$  и  $\lambda_0$  можем найти координаты источников записи. Найти решение системы уравнений (4), которое соответствовало бы действительной входной щели ( $d > 0$ ), не удается, поэтому решетка должна устанавливаться в сходящемся пучке, формируемом некоторой предшествующей оптической системой (например, объективом астрономического телескопа).

Результаты моделирования схем спектрографов с ПВГДР

В качестве примера рассмотрим спектрограф нормального падения с плоским полем для видимого спектрального диапазона 380–770 нм на основе ПВГДР, имеющей радиус кривизны 400 мм и число штрихов на 1 мм в вершине 255. Обратная линейная дисперсия равна 9,593 нм/мм. Входная щель расположена в центре кривизны решетки, т.е.  $d = 400$  мм. Проведя расчет для указанных параметров при длине волны записи  $\lambda_0 = 441,6$  нм, получим:

$$d'_{cp} = 403,87 \text{ мм}, H_1 = -0,016016, H_2 = -0,00095, H_3 = -0,002237.$$

Тогда параметры записи решетки имеют следующие значения:

$$d_1 = 1498,501219 \text{ мм}, d_2 = 1199,562949 \text{ мм}, i_1 = 34^\circ 41' 32'', i_2 = 27^\circ 9' 55''.$$

Результаты расчета aberrаций и аппаратных функций (АФ) спектрографа для входной щели шириной 0,035 мм с шагом 0,007 мм представлены в табл. 1, где используются следующие обозначения:  $\delta y'$  – ширина АФ на половине высоты;  $\Delta y'$  – составляющие aberrаций в меридиональной плоскости;  $\Delta z'$  – составляющие aberrаций в сагиттальной плоскости;  $y'$  – координата точки пересечения главного луча с поверхностью изображения;  $m$  и  $M$  – меридиональная и сагиттальная координаты точки пересечения главного луча с плоскостью входного зрачка соответственно. За меридиональную плоскость при этом принимается плоскость дисперсии, а за сагиттальную – плоскость, перпендикулярная ей и содержащая входную щель. В качестве подложки использован ахроматический мениск.

$m$	$M$	$\lambda_{cp} = 575 \text{ нм}$		$\lambda_1 = 380 \text{ нм}$		$\lambda_2 = 770 \text{ нм}$	
		$y' = 0 \text{ мм}$		$y' = -20,252 \text{ мм}$		$y' = 20,404 \text{ мм}$	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
20	0	0,0165	0	-0,0333	0	-0,0330	0
14,1	0	0,0116	0	-0,0236	0	-0,0228	0
-14,1	0	-0,0117	0	0,0243	0	0,0205	0
-20	0	-0,0167	0	0,0348	0	0,0282	0
0	-14,1	0	0	0	-0,0988	0	0,0987
0	-20	0	0	0	-0,1401	0	0,1400
$\delta y'$		0,036		0,067		0,059	
$\delta \lambda, \text{ нм}$		0,345		0,643		0,566	

Таблица 1. Результаты расчета aberrаций и АФ спектрографа

Схема может также иметь светосильный вариант с относительным отверстием 1:3 (под относительным отверстием понимается отношение диаметра входного зрачка к удалению плоскости спектра)  $d'_{cp}$ . В этом случае для устранения остаточной дефокусировки вблизи плоскости изображения устанавливается цилиндрическая линза.

Для определения оптимальных параметров спектрографа было проведено моделирование ряда схем. Во всех схемах рабочим являлся видимый спектральный диапазон, использовалось нормальное падение. При этом во всех схемах сохранялись значения относительного отверстия (1:10) и длины спектра (не более 32,2 мм). Выполнение последнего условия достигалось варьированием частоты штрихов  $N$ .

Зависимость предела разрешения от радиуса решетки, полученная по результатам моделирования, представлена на рис. 2. Видно, что предел разрешения, как и aberrации, уменьшается с увеличением радиуса (и расстояния до щели). Следовательно, для получения меньших aberrаций при одинаковой светосиле и размерах приемника необходимо увеличивать габариты спектрографа, которые, как правило, ограничены. С другой стороны, исследование технологичности различных схем спектрографов показало, что наиболее выгодными с технологической точки зрения являются схемы с небольшими значениями радиуса кривизны и частоты штрихов ПВГДР, поскольку для них реализуема компактная схема записи.

Однако в указанных схемах не учитывались aberrации оптической системы, формирующей сходящийся пучок. Определенный практический интерес представляет случай, когда изображение входной щели формируется в нулевом порядке другой ГДР – отражательной. Такая установка позволит существенно расширить возможности прибора – работать одновременно в двух спектральных диапазонах с различной дисперсией, используя общую систему обработки спектров. В этом случае отражательная решетка вносит значительные aberrации, в первую очередь – большой астигматизм. Коррекция астигматизма возможна за счет введения асферики на первой поверхности подложки. Результаты aberrационного расчета для спектрографа с указанными выше параметрами, работающего в нулевом порядке серийного спектрографа ДФС-458, представлены в табл. 2. Первая поверхность подложки является торической, при

этом  $R_m=402,83$ ;  $R_s=223,00$ , где  $R_m$  и  $R_s$  – радиусы кривизны в меридиональном и сагиттальном сечениях соответственно.

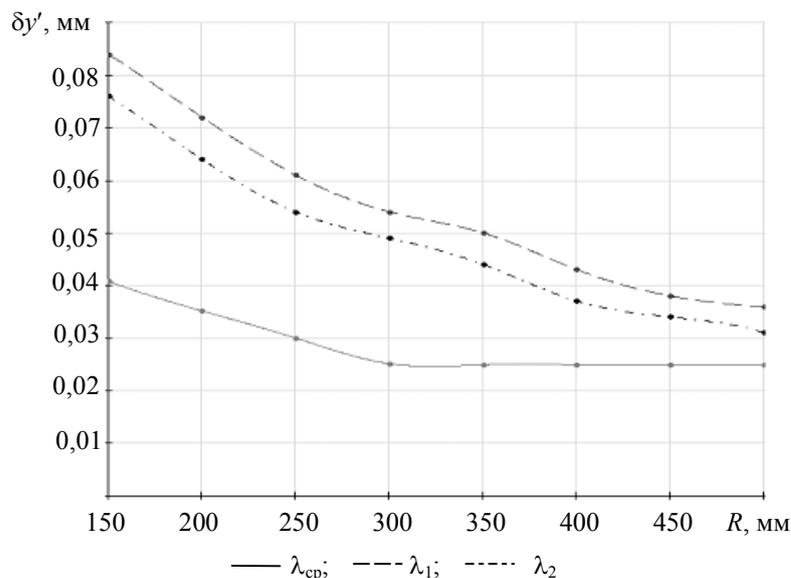


Рис. 2. Зависимость предела разрешения спектрографа с ПВГДР от радиуса решетки

m	M	$\lambda_{cp}=575$ нм $y'=0$ мм		$\lambda_1=380$ нм, $y'=-20,25$ мм		$\lambda_2=770$ нм $y'=20,40$ мм	
		$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$	$\Delta y'$	$\Delta z'$
28	0	0,0526	0	-0,0848	0	-0,0827	0
14	0	0,0132	0	-0,0295	0	-0,0285	0
-14	0	-0,0154	0	0,0010	0	0,0002	0
-28	0	-0,0619	0	-0,0291	0	-0,0303	0
0	15	0,0165	0,0381	0,0160	-0,1528	0,0170	0,1523
0	30	0,0660	0,0744	0,0639	-0,3075	0,0679	0,3028

Таблица 2. Результаты абберационного расчета для спектрографа с отражательной решеткой

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что ВПГДР обладает абберационными и фокусирующими свойствами, отличными от свойств отражательных решеток, и на ее основе могут быть получены перспективные схемы спектральных приборов.

### Литература

1. Нагулин Ю.С., Павлычева Н.К. Плоская прозрачная дифракционная решетка в сходящемся пучке // Оптико-механическая промышленность. – 1978. – № 7. – С. 73–74.
2. Батомункуев Ю.Ц., Мещеряков Н.А. Внеосевые объемные голограммные элементы для ближнего инфракрасного диапазона спектра // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 43–47.
3. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
4. Beutler H.G. The theory of the concave grating // J. Opt. Soc. Am. – 1945. – V. 35. – P. 311–350.
5. Noda H., Namioka T., Seya M. Geometric theory of the grating // J. Opt. Soc. Am. – 1974. – V. 64. – № 8. – P. 1031–1042.
6. Majumdar K., Singh Mahipal. On the theory of concave transmission grating // Optics Communications. – 1970. – V. 1. – Is. 7. – P. 329–333.
7. Павлычева Н.К. Спектральные приборы с неклассическими дифракционными решетками. – Казань: Изд-во Казан. ГТУ, 2003. – 198 с.

Муслимов Эдуард Ринатович – Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, студент, ehduard-muslimv@rambler.ru

УДК 531.7.082.5: 535.42/.44

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ДИФРАКЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МАСШТАБОМ СПЕКТРА ФУРЬЕ

В.Н. Назаров, Ю.А. Соколов

Исследована возможность создания дифракционного метода контроля линейных и угловых перемещений объектов по схеме с изменяющимся масштабом их спектра Фурье. Разработана математическая модель, описывающая амплитудно-фазовое распределение света в плоскости регистрации, хорошо согласующаяся с экспериментальными результатами.

**Ключевые слова:** дифракция, интерференция, дифракционные измерения.

### Введение

Дифракционные методы контроля находят широкое применение при проведении угловых и линейных измерений в научной и производственной практике [1, 2]. Они основаны на получении и анализе дифракционной картины за контролируемыми объектами после их освещения излучением лазера. По этой информации судят о геометрических параметрах или пространственном положении объектов. Таким образом измеряют, например, размеры отверстий, волокон, лент, проводов, контролируют профиль изделий, определяют оптические характеристики сред, проводят автоколлимационные измерения. Известно применение этого метода контроля и в медицине [2–5]. Это обусловлено рядом преимуществ дифракционных измерений перед традиционными, например, большей чувствительностью, простотой реализации, возможностью автоматизации.

Световое возмущение в плоскости регистрации часто описывается спектром Фурье-функции амплитудного пропускания контролируемых объектов. Математический аппарат дифракции соответствует в этом случае приближению Френеля–Кирхгофа [6]. Для решения ряда задач используют также и геометрическую теорию дифракции (ГТД) [7]. Исследован ряд схем дифракционного контроля, определены их метрологические характеристики, составлены алгоритмы измерений.

Представляет интерес создание и исследование новых, не использованных ранее схем этого метода, позволяющих увеличить чувствительность, точность контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов, расширить функциональные возможности метода.

### Теоретические положения

В рамках данной работы исследуется схема дифракционного контроля, изображенная на рис. 1. Она расширяет функциональные возможности схемы с изменяющимся масштабом спектра Фурье контролируемого объекта, установленного между линзой и ее фокальной плоскостью [5].

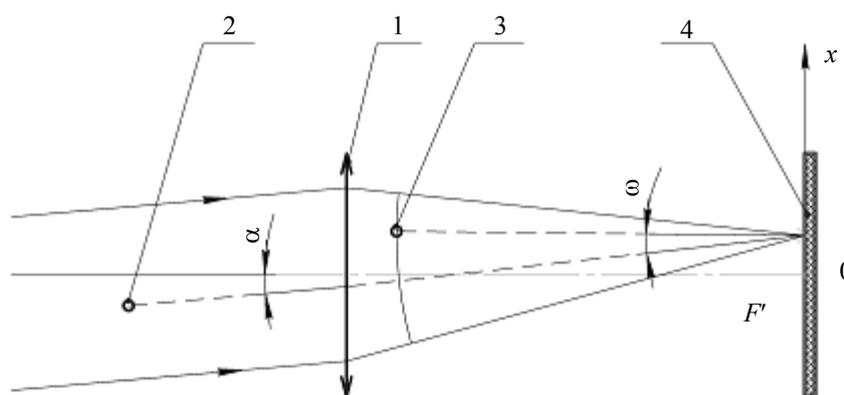


Рис. 1. Схема дифракционного контроля положений объектов 2 и 3 и угла падения излучения  $\alpha$

На рис. 1 с двух сторон от тонкой линзы 1 установлены объекты 2 и 3 в виде нитей. Как известно, по принципу Бабиня их можно заменить при дальнейшем анализе щелевыми апертурами. На систему под наклоном  $\alpha$  падает плоский фронт волны коллимированного излучения He-Ne-лазера и освещает первый объект. На второй объект, расположенный за линзой, падает сферический фронт. В задней фокальной плоскости 4 линзы 1 образуется дифракционная картина, подобная картине дифракции от двух щелей. Расстояние между дифракционными полосами в главном максимуме определяется начальным углом

$\omega$ , под которым сходятся центральные лучи от каждой щели, и может быть приближенно определено как  $t = \lambda/\omega$ .

При линейном смещении нитей 2 и 3 или изменении угла  $\alpha$  падения света на линзу 1 угол схождения  $\omega$  лучей между направлениями на главные максимумы от каждой нити изменяется. Это приводит к изменению числа полос в дифракционной картине, смещения которых можно измерить, например, с помощью ПЗС-приемника. Это открывает возможность контроля положений объектов 2 и 3 или угла  $\alpha$  падения излучения на систему.

Световое возмущение в фокальной плоскости 4 зависит от расположения объектов 2 и 3 относительно линзы 1. В [8] это учтено только для продольного расположения одиночных объектов вдоль оптической оси. Для практической реализации схемы необходимо учесть и поперечные смещения одновременно для двух объектов. Поэтому амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости 4 от первого объекта 2 следует представить в виде приближения Фраунгофера следующим образом:

$$U_1(x) = \frac{\exp[jk(z_1 + z_2)] \cdot \exp\left[\frac{jk}{2f} x^2 \left(1 - \frac{L}{f}\right)\right]}{j\lambda f} \cdot \int_{-a/2+v_1}^{a/2+v_1} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{f} - \sin\alpha\right)\right] d\xi, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $z_1$  и  $z_2$  – расстояния, которые проходит излучение при наклонном падении света до линзы 1 и ее фокальной плоскости, соответственно (рис. 2);  $f$  – фокусное расстояние линзы;  $x$  – координата в фокальной плоскости линзы;  $L$  – расстояние от первого объекта до линзы;  $a$  – размер объекта (диаметр первой нити);  $v_1$  – смещение объекта от оси системы;  $\alpha$  – угол падения света на объект.

Множитель  $\exp\left[\frac{jk}{2f} x^2 \left(1 - \frac{L}{f}\right)\right]$  в (1) учитывает фазовое искажение Фурье-образа, вызванное смещением нити из передней фокальной плоскости линзы.

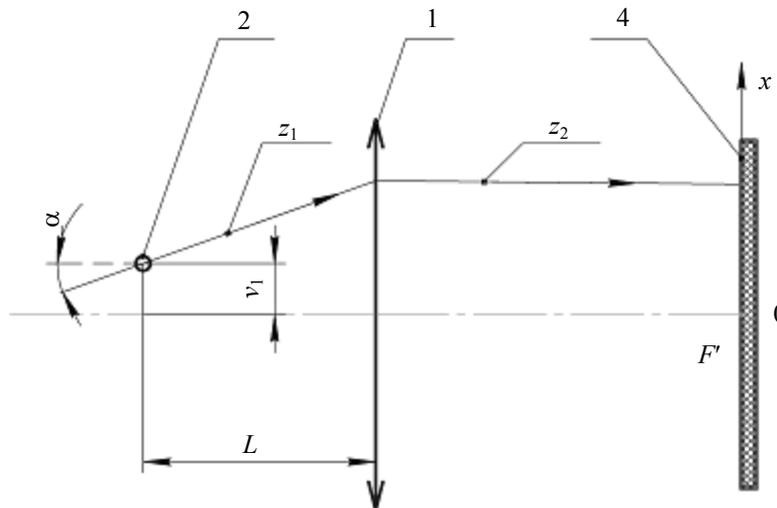


Рис. 2. Схема образования дифракционной картины от первого объекта

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости 4 от второго объекта 3, расположенного за линзой, тоже представим в виде приближения Фраунгофера (при этом необходимо учесть, что масштаб его Фурье-спектра зависит от расстояния до фокальной плоскости, а сам объект освещается сферической волной):

$$U_2(x) = \frac{\exp[jk(z_1 + z_2 - z_3)] \cdot \exp(jkz_3)}{j\lambda d} \cdot \frac{f}{d} \cdot \exp\left(\frac{jk}{2d} x^2\right) \cdot \int_{-b/2+v_2}^{b/2+v_2} \exp\left[-jk\xi\left(\frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin\alpha\right)\right] d\xi,$$

где  $z_3 = \sqrt{d^2 + [f \cdot \tan(\alpha) - v_2]^2}$  – расстояние от объекта до центра дифракционной картины (рис. 3);  $d$  – расстояние от объекта до экрана;  $b$  – размер объекта (диаметр второй нити);  $v_2$  – смещение объекта от оси системы.

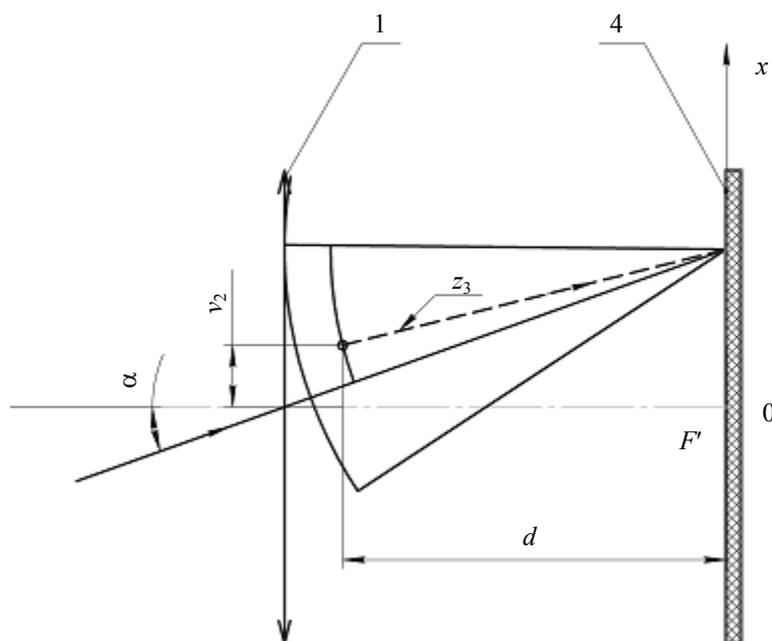


Рис. 3. Схема образования дифракционной картины от второго объекта

Амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости линзы от двух объектов представим в виде

$$U_{\Sigma}(x) = U_1(x) + U_2(x).$$

Тогда интенсивность света в плоскости регистрации можно представить в виде

$$I(x) = U_{\Sigma}(x) \cdot U_{\Sigma}^*(x)$$

или

$$I(x) = \left( \frac{1}{\pi f} \right)^2 \left[ \left\{ a \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi a}{\lambda} \left( \frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \left( \frac{f}{d} \right)^4 \cdot \left\{ b \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin \alpha \right) \right] \right\}^2 + \right. \\ \left. + 2ab \left( \frac{f}{d} \right)^2 \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi a}{\lambda} \left( \frac{x}{f} - \sin \alpha \right) \right] \cdot \operatorname{sinc} \left[ \frac{\pi b}{\lambda} \left( \frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin \alpha \right) \right] \cdot \right. \\ \left. \cdot \cos \left[ \frac{\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2}{d} \cdot \left[ 1 - \frac{d}{f} \left( 1 - \frac{L}{f} \right) \right] + \frac{2\pi}{\lambda} \left[ v_1 \left( \frac{x}{f} - \sin \alpha \right) - v_2 \left( \frac{x}{z_3} - \frac{f}{z_3} \sin \alpha \right) \right] \right] \right\} \right],$$

где  $\operatorname{sinc}(x) = \sin(x)/x$ .

### Результаты моделирования

На рис. 4, б, представлены результаты расчета распределения интенсивности света в плоскости регистрации при следующих значениях параметров разработанной математической модели:  $f=600$  мм;  $\alpha=9^\circ$ ; размеры нитей  $a=b=110$  мкм;  $L=12$  мм;  $d=f$ ;  $v_1=0$ ;  $v_2=1,7$  мм. На рис. 4, а, представлена фотография дифракционной картины, полученная в ходе экспериментальных исследований цифровым фотоаппаратом, закрепленном на штативе. Эксперименты проводились на базе оптической скамьи ОСК-2 с установленной на ней линзой с указанным фокусным расстоянием. Источником излучения служил He-Ne-лазер, работающий в одномодовом режиме. В качестве объектов 2 и 3 по схеме рис. 1 использовались проволоки диаметром 110 мкм, жестко зафиксированные при указанных в модели геометрических параметрах схемы. Следует отметить хорошее совпадение экспериментальных результатов с полученной математической моделью.

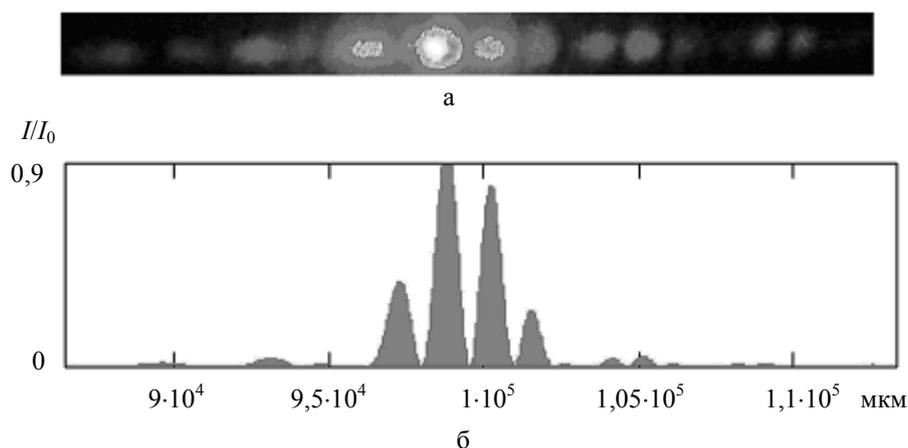


Рис. 4. Дифракционная картина, полученная в фокальной плоскости линзы при указанных параметрах установки (а), и соответствующий ей график распределения интенсивности света, полученный при помощи математической модели (б)

### Заключение

Разработана математическая модель схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом их спектра Фурье. Представлены выражения, описывающие амплитудно-фазовое распределение света в фокальной плоскости линзы для каждого из объектов и итоговое распределение интенсивности света в плоскости регистрации для всей системы, учитывающие положения объектов в пространстве относительно линзы, а также угол падения излучения на систему. Работоспособность полученной математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

Представляет интерес дальнейшее изучение разработанной математической модели рассмотренной схемы дифракционного контроля, исследование зависимостей параметров дифракционной картины от смещения объектов и угла падения света на них, поиск областей наибольшей чувствительности к таким изменениям.

### Литература

1. Назаров В.Н., Линьков А.Е. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69. – № 2. – С. 76–81.
2. Иваницкий Г.Р., Куниский А.С. Исследование микроструктуры объектов методами когерентной оптики. – М.: Энергия, 1981.
3. Арефьев А.А., Старостенко Б.В. Определение показателя преломления оптически прозрачных сред дифракционным методом // Измерительная техника. – 1986. – № 5.
4. Иванов А.Н., Назаров В.Н. Использование муарового эффекта для создания высокоточных дифракционных схем контроля геометрических параметров объектов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 4. – С. 70–74.
5. Ivanov A.N., Nazarov V.N. Using the moiré effect to increase the accuracy of diffraction methods for monitoring the geometrical parameters and the spatial position of objects // Journal of Optical Technology. – 2009. – V. 76. – № 1. – P. 39–42.
6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970.
7. Тарлыков В.А. Лазерная дифрактометрия микрообъектов типовой формы. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2000.
8. Гудмен. Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970.

**Назаров Виктор Николаевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, naz\_1946@mail.ru

**Соколов Юрий Александрович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, sokolov-juri@yandex.ru

УДК 535.4

## ДИФРАКЦИЯ ОДНОПЕРИОДНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН С ГАУССОВЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ

А.А. Езерская, Д.В. Иванов, В.Г. Беспалов, С.А. Козлов

Получены аналитические выражения для пространственного распределения временных спектров терагерцовых волн из всего одного полного колебания на эмиттере электромагнитного поля в областях дифракций Френеля и Фраунгофера и для пространственно-временного распределения их поля в области дифракции Фраунгофера. Показано, что для терагерцовой волны с гауссовым поперечным распределением в дальней зоне дифракции происходят изменения не только пространственной, но и временной структуры излучения: из однопериодной в дальней зоне дифракции вблизи оси волна становится полупериодной, а ее спектр смещается в область высоких частот. Приведены оценки расстояний до характерных областей дифракции.

**Ключевые слова:** терагерцовое излучение, параксиальный, дифракция Френеля, дифракция Фраунгофера.

### Введение

Терагерцовое электромагнитное излучение является пограничным между радиоволнами и оптическим излучением. Для радиофизиков это субмиллиметровые радиоволны, для оптиков – излучение дальнего инфракрасного диапазона спектра.

Исследования техники и физики терагерцового излучения начались давно [1], но с появлением новых высокоэффективных систем генерации и детектирования такого излучения [2, 3], а также в связи с проясняющимися перспективами его широкого применения [4, 5] интерес к этим исследованиям в последние два десятилетия резко вырос.

Были найдены возможности получать терагерцовое излучение оптическими методами, например, с помощью фемтосекундных лазеров, используя явление фотопроводимости полупроводников [6]. Излучение при этом имеет вид всплеска электромагнитного поля, представляющего собой лишь одно его полное колебание (рис. 1). Такие импульсы часто называют однопериодными. В настоящей работе рассмотрены особенности дифракции таких предельно коротких по числу колебаний терагерцовых волн для частного, но важного на практике случая, – их параксиального распространения в однородных изотропных прозрачных диэлектрических средах.

### Динамика полей и спектров однопериодных терагерцовых волн в диэлектрических средах

Параксиальная дифракция однопериодного терагерцового излучения изучалась и ранее [7, 8]. В значительном числе работ анализ динамики поля широкополосного излучения проводился методами численного моделирования. Обычно рассчитывался интеграл Френеля–Кирхгофа или его модификации [7]. В работе [8] для гауссовых волновых пакетов получены аналитические выражения для поля волны на оси пучка. В данной работе получены аналитические выражения для общего пространственного распределения временных спектров однопериодных в плоскости источников волн в областях дифракции Френеля и Фраунгофера и для пространственно-временного распределения их поля в области дифракции Фраунгофера.

Дифракционная динамика декартовых компонент пространственно-временного спектра

$$g_{x,y,z}(k_x, k_y, \omega, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_{x,y,z}(x, y, t, z) \exp(-i(k_x x + k_y y + \omega t)) \, xdydt \quad (1)$$

с пространственной и временной частотами  $k_x$ ,  $k_y$  и  $\omega$  проекций на декартовы оси вектора  $E_{x,y,z}$  электрического поля  $E$  оптической волны, распространяющейся вдоль оси  $z$  (выделенность этого направления в области пространства, где анализируется эволюция поля электромагнитного излучения, формализуется асимптотическими требованиями  $\frac{\partial E_{x,y,z}}{\partial x} \rightarrow 0$ ,  $\frac{\partial E_{x,y,z}}{\partial y} \rightarrow 0$ ,  $E_{x,y,z} \rightarrow 0$  при  $x, y \rightarrow \pm\infty$ ) в однородной, изотропной диэлектрической среде с дисперсией показателя преломления  $n(\omega)$ , описывается соотношениями [9]

$$\begin{cases} g_{x,y}(k_x, k_y, \omega, z) = C_{x,y}(k_x, k_y, \omega) \exp(-i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \cdot z) \\ g_z(k_x, k_y, \omega, z) = \frac{k_x C_x(k_x, k_y, \omega) + k_y C_y(k_x, k_y, \omega)}{\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} \cdot \exp(-i\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \cdot z) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $k = \frac{\omega}{c} n(\omega)$ ,  $c$  – скорость света в вакууме. В (2)  $C_x$  и  $C_y$  – компоненты пространственно-временного спектра излучения в плоскости  $z = 0$ , которые предполагаются известными. Отметим, что в однородных изотропных диэлектриках электрическое поле оптической волны характеризуется нулевой дивергенцией  $\nabla \mathbf{E} = 0$ , и граничное условие для  $z$ -компоненты спектра, как видно из (2), не произвольно, а связано с  $C_x$  и  $C_y$ .

Динамика электрического поля оптической волны по известному решению для спектра (2) определяется преобразованием Фурье

$$E_{x,y,z}(x, y, t, z) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_{x,y,z}(k_x, k_y, \omega, z) \exp(i(k_x x + k_y y + \omega t)) dk_x dk_y d\omega. \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) описывают дифракционно-дисперсионную эволюцию в диэлектрических средах пространственно-временных спектров и полей оптических волн, у которых как пространственный, так и временной спектры могут быть сверхуширенными, т.е. волн, поперечные размеры которых сопоставимы с центральной длиной волны, а длительность – с центральным периодом колебаний.

Далее в работе ограничимся анализом распространения излучения с широким только временным спектром. Будем рассматривать параксиальное излучение, т.е. волны, пространственный спектр которых узок:

$$\{k_x^2\}, \{k_y^2\} \ll \frac{\{\omega^2\}}{c^2} n^2(\omega). \quad (4)$$

В неравенстве (4)  $\{k_x^2\}$ ,  $\{k_y^2\}$ ,  $\{\omega^2\}$  – значения квадратов пространственных и временных частот области пространственно-временного спектра, в которой находится практически вся энергия волнового пакета.

Тогда, как следует из (2), наличием продольной компоненты поля волнового пакета можно пренебречь, а выражения для спектров поперечных компонент его поля записать в более простом виде:

$$g_{x,y}(k_x, k_y, \omega, z) = C_{x,y}(k_x, k_y, \omega) \exp\left(-ikz \left(1 - \frac{k_x^2 + k_y^2}{2k^2}\right)\right). \quad (5)$$

Рассмотрение особенностей дифракционной динамики полей и спектров параксиальных волн из малого числа колебаний в диэлектрических средах в настоящей работе проведем для гауссова граничного (при  $z = 0$ ) поперечного пространственного распределения ее поля. Такие условия близки, например, полю эмиттеров терагерцового излучения в виде фотопроводников, поверхности которых облучаются импульсами мощных фемтосекундных лазеров инфракрасного диапазона спектра [5, 6].

Пусть излучение линейно поляризовано вдоль оси  $x$ , и его спектр при  $z = 0$  имеет вид

$$C_x(k_x, k_y, \omega) = \pi \rho^2 \exp\left(-\frac{\rho^2(k_x^2 + k_y^2)}{4}\right) G_0(\omega). \quad (6)$$

Другими словами, поле осесимметрично и представляется на поверхности эмиттера соотношением

$$E_x(x, y, t) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\rho^2}\right) F_0(t), \quad (7)$$

где  $\rho$  – поперечный размер распределения поля волны;  $F_0(t)$  – ее временной профиль, который пока не конкретизируется;  $G_0(\omega)$  – преобразование Фурье от  $F_0(t)$ .

Тогда в соответствии с (5) пространственно-временной спектр волны на произвольном расстоянии  $z$  описывается соотношением

$$g(k_x, k_y, \omega, z) = \pi \rho^2 \exp\left(-\frac{\rho^2(k_x^2 + k_y^2)}{4}\right) \cdot \left(1 - i \frac{2cz}{\rho^2 n(\omega) \omega}\right) \cdot \exp\left(-i \frac{n(\omega) \omega z}{c}\right) \cdot G_0(\omega), \quad (8)$$

а рассчитываемое по формуле (3) с учетом соотношения (8) дифракционно-дисперсионное расплывание ее поля может быть представлено в виде

$$E(x, y, t, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, y, \omega, z) \exp(i\omega t) d\omega, \quad (9)$$

где пространственная зависимость временного спектра излучения имеет вид

$$G(x, y, \omega, z) = \frac{1 + i \frac{2cz}{\rho^2 n(\omega) \omega}}{1 + \left(\frac{2cz}{\rho^2 n(\omega) \omega}\right)^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\rho^2} \cdot \frac{1 + i \frac{2cz}{\rho^2 n(\omega) \omega}}{1 + \left(\frac{2cz}{\rho^2 n(\omega) \omega}\right)^2}\right) \exp\left(-i \frac{n(\omega) \omega z}{c}\right) G_0(\omega). \quad (10)$$

В соотношениях (8)–(10) и далее индекс  $x$ , означающий, что рассматривается излучение, линейно поляризованное вдоль оси  $x$ , для упрощения записи опускается.

Отметим, что в выражениях (8) и (10) показатель преломления  $n(\omega)$  может быть комплексным  $n(\omega) = n(\omega) + ik(\omega)$ , поэтому эти соотношения описывают дифракционную динамику спектров излучения не только в прозрачных средах с дисперсией показателя преломления, но и в поглощающих средах с дисперсией коэффициента поглощения  $\kappa(\omega)$ . В данной работе ниже среды будем полагать прозрачными с  $\kappa(\omega) = 0$ .

Из (8) и (9) ясна важность оценки характерных расстояний

$$z_1 = \frac{\rho^2}{2c} \{n(\omega) \omega\}_{\min}, \quad (11)$$

$$z_2 = \frac{\rho^2}{2c} \{n(\omega) \omega\}_{\max}. \quad (12)$$

Здесь  $\{n(\omega) \omega\}_{\max}^{\min}$  – минимальное и максимальное значения величины  $\{n(\omega) \omega\}$  из диапазона частот, в котором находится практическая часть энергии излучения. При

$$z \ll z_1 \quad (13)$$

соотношения (8)–(9) принимают вид

$$g(k_x, k_y, \omega, z) = \pi \rho^2 \exp\left(\frac{-\rho^2 (k_x^2 + k_y^2)}{4}\right) \cdot \exp\left(-i \frac{n(\omega) \omega z}{c}\right) \cdot G_0(\omega), \quad (14)$$

$$E(x, y, t, z) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\rho^2}\right) \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\omega) \cdot \exp\left(i\omega \left(t - \frac{n(\omega) z}{c}\right)\right) d\omega. \quad (15)$$

Неравенство (13) обычно называется приближением тени [10]. Оно соответствует расстояниям вблизи поверхности эмиттера излучения. Как видно из (14)–(15), при малых  $z$  изменения поперечного распределения поля еще не происходит, но следует учитывать изменение фазы волны (и ее поглощение) на пройденном волновым пакетом расстоянии. При

$$z \ll z_2 \quad (16)$$

соотношение (10) принимает вид

$$G(x, y, \omega, z) = i \frac{\rho^2 n(\omega) \omega}{2cz} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\left(\frac{2cz}{\rho n(\omega) \omega}\right)^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\left(\frac{2cz}{n(\omega) \omega}\right)^2}\right) \exp\left(-i \frac{n(\omega) \omega z}{c}\right) \cdot G_0(\omega). \quad (17)$$

Неравенство (16) определяет область дифракции Фраунгофера для всех спектральных компонент излучения. Выражение (17) для каждой из этих компонент описывает хорошо известную из учебных курсов [11] динамику гауссовых лазерных пучков в дальней зоне.

Приступим к анализу изменения временного профиля волнового пакета при его дифракционном расплывании. Ограничимся при этом случаем диэлектрических сред, дисперсией которых можно пренебречь, и будем полагать  $n(\omega) = n_0 = const$ . Для таких сред выражение для динамики спектра (17) может быть переписано в виде

$$G(x, y, \omega, z) = iT(z) \omega \cdot \exp\left(-T^2(z) \omega^2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{\rho^2}\right) \cdot \exp\left(-i\omega \frac{n_0}{c} \left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right) \cdot G_0(\omega), \quad (18)$$

где  $T(z) = \frac{\rho^2 n_0}{2c} \cdot \frac{1}{z}$ , а его преобразование Фурье (9) представлено как соотношение

$$E(x, y, t', z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} T(z) \exp\left(-T^2(z)\omega^2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{\rho^2}\right) \cdot i\omega G_0(\omega) \exp(i\omega t') d\omega, \quad (19)$$

где «запаздывающее» вследствие кривизны сферического волнового фронта время

$$t' = t - \frac{n_0}{c} \left( z - \frac{x^2 + y^2}{2z} \right). \quad (20)$$

Из соотношения (19) следует, что временной спектр поля излучения в новых переменных  $x, y, t', z$  имеет вид

$$G(x, y, \omega, z) = T(z) \exp\left(-T^2(z)\omega^2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{\rho^2}\right) \cdot i\omega G_0(\omega). \quad (21)$$

На оси волнового пакета при  $x = 0, y = 0$  выражение для спектра (21) принимает простой вид

$$G(0, 0, \omega, z) = T(z) \cdot i\omega G_0(\omega), \quad (22)$$

из которого следует, что временная структура поля на оси пучка при любой форме импульса на границе среды  $E_0(t) = 0$  в дальней зоне дифракции определяется ее производной [12]

$$E(0, 0, t', z) = T(z) \frac{\partial E_0(t')}{\partial t'} \quad (23)$$

Как видно из (21) и (22), временной спектр поля излучения в области дифракции Фраунгофера при малых  $x$  и  $y$  смещен по сравнению со спектром на входе в среду  $G_0(\omega)$  в высокочастотную область; при больших  $x$  и  $y$  – в низкочастотную область. Закон сохранения общей энергии излучения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |G(x, y, \omega, z)|^2 dx dy d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |G(x, y, \omega, 0)|^2 dx dy d\omega \quad (24)$$

для зависимости (21) при этом, как легко проверить, соблюдается (интеграл (24) от координаты  $z$  не зависит).

Временную эволюцию поля волнового пакета в дальней зоне дифракции проиллюстрируем для однопериодной на границе волны вида (рис. 1, а)

$$E(t) = E_0 \frac{t}{\tau} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right), \quad (25)$$

которая хорошо аппроксимирует терагерцовое излучение фотопроводящих полупроводниковых эмиттеров, облучаемых импульсами фемтосекундных лазеров [7, 13]. Волна (25) имеет спектр (рис. 1, б)

$$G_0(\omega) = -\frac{\sqrt{\pi}}{2} \tau^2 E_0 i \omega \exp\left(-\left(\frac{\tau\omega}{2}\right)^2\right). \quad (26)$$

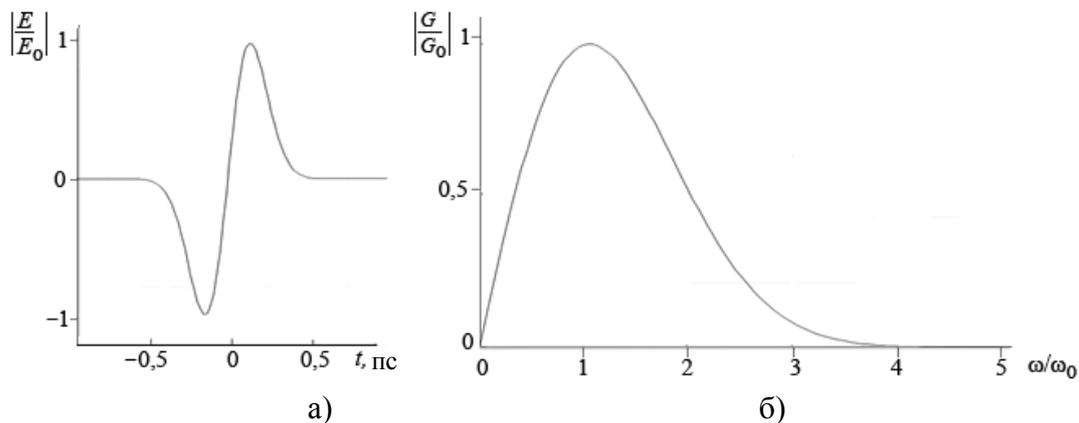


Рис. 1. Нормированные зависимости электрического поля  $E$  от времени  $t$  (а) и модуля спектра  $|G|$  от нормированной частоты  $\omega/\omega_0$  (б) на эмиттере терагерцовой электромагнитной волны

Преобразование Фурье (9) от (21) с учетом конкретного вида спектра излучения эмиттера (26) выполняется в элементарных функциях, и

$$E(x, y, t', z) = E_0 \cdot A^3(x, y, z) \cdot \frac{T(z)}{\tau} \left[ 1 - 2 \left( A(x, y, z) \frac{t'}{\tau} \right)^2 \right] \cdot \exp \left( - \left( A(x, y, z) \frac{t'}{\tau} \right) \right), \quad (27)$$

где  $A(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2T(z)}{\tau} \right)^2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{\rho^2}}}$ ,  $T(z) = \frac{n_0 \rho^2}{2cz}$ , а «запаздывающее» время  $t'$  определяется соотно-

шением (20). Вблизи оси пучка при

$$x^2 + y^2 \ll \frac{\rho^2 \tau^2}{4T^2(z)} = \alpha^2 z^2, \quad (28)$$

где

$$\alpha = \frac{c\tau}{n_0 \rho}, \quad (29)$$

выражение для поля (27) упрощается и принимает вид

$$E(t', z) = E_0 \frac{T(z)}{\tau} \left[ 1 - 2 \left( \frac{t'}{\tau} \right)^2 \right] \exp \left( - \left( \frac{t'}{\tau} \right) \right), \quad (30)$$

которое, как отмечено выше, есть умноженная на  $T(z)$  производная поля на эмиттере излучения  $E_0(t)$ .

### Оценки расстояний до характерных областей дифракции и изменений пространственно-временных параметров однопериодной терагерцовой волны

Проведем оценку характерных дифракционных расстояний для однопериодной на эмиттере терагерцовой волны (27) с гауссовым поперечным распределением (7), полагая длительность волнового пакета  $\tau = 0,2$  пс, а его поперечные размеры –  $\rho = 3$  мм. Временной профиль такой волны и ее спектр приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что основная часть энергии излучения лежит в интервале частот от  $\nu_{\min} = 0,1$  ТГц до  $\nu_{\max} = 3,5$  ТГц.

На расстоянии, в несколько раз меньшем  $z_1 = 10$  мм (11), для рассматриваемого волнового пакета выполняется приближение тени (13) и изменение его пространственно-временной структуры еще не происходит. На расстоянии, в несколько раз большем  $z_2 = 35$  см (12), реализуется дифракция Фраунгофера и терагерцовое излучение принимает вид сферической волны (27). Поперечный размер светового пятна в этой зоне дифракции увеличивается в  $\frac{\tau}{2T}$  раз и, например, на расстоянии в 1 м становится равным 10 см. В углах, в несколько раз меньших  $\alpha = 0,1$  (29), зависимостью поля от поперечной координаты можно пренебречь и его временной профиль принимает вид (30). На рис. 2 приведены этот временной профиль (а) и его спектр (б), пунктиром даны временной профиль и спектр на эмиттере при  $z = 0$ . Из рисунка видно, что из однопериодной в дальней зоне дифракции вблизи оси волна становится полупериодной, а ее спектр смещается в область высоких частот.

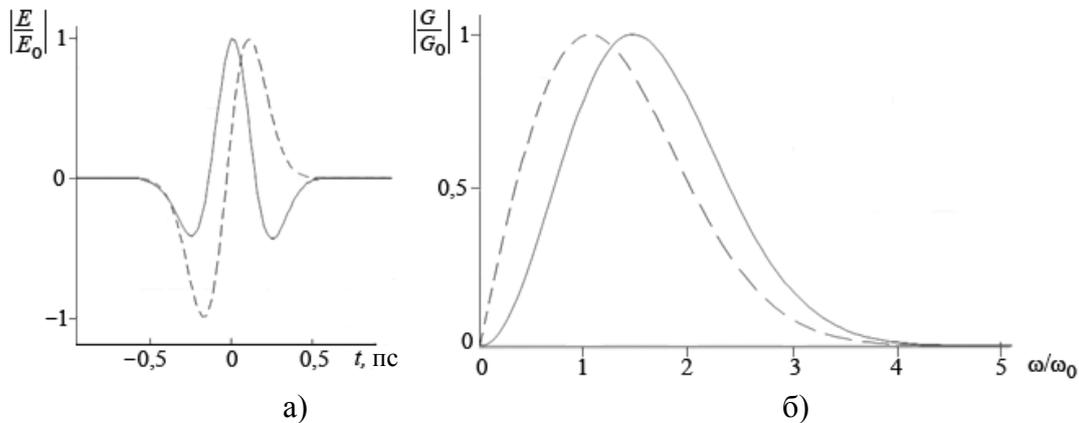


Рис. 2. Нормированные зависимости электрического поля  $E$  от времени  $t$  (а) и модуля спектра  $|G|$  от нормированной частоты  $\omega/\omega_0$  терагерцовой волны (б) в зоне дифракции Фраунгофера вблизи оси волнового пакета. Пунктиром показаны эти зависимости на эмиттере

### Иллюстрации пространственно-временной структуры дифрагировавшей терагерцовой волны

На рис. 3 продемонстрированы плоскостные изображения поля волнового пакета с гауссовым в плоскости источника поперечным распределением в ближней и дальней зоне дифракции. Светло-серым участкам изображения соответствуют максимальные положительные значения поля, темно-серым – максимальные отрицательные значения. Как видно из рисунка, в дальней зоне однопериодная волна превращается в полупериодную, вблизи оптической оси максимум частоты сдвигается в область высоких частот, однако по мере удаления от оптической оси наблюдается обратная динамика – сдвиг спектра в область низких частот. Волновой фронт пучка в дальней зоне уширяется и становится сферическим.

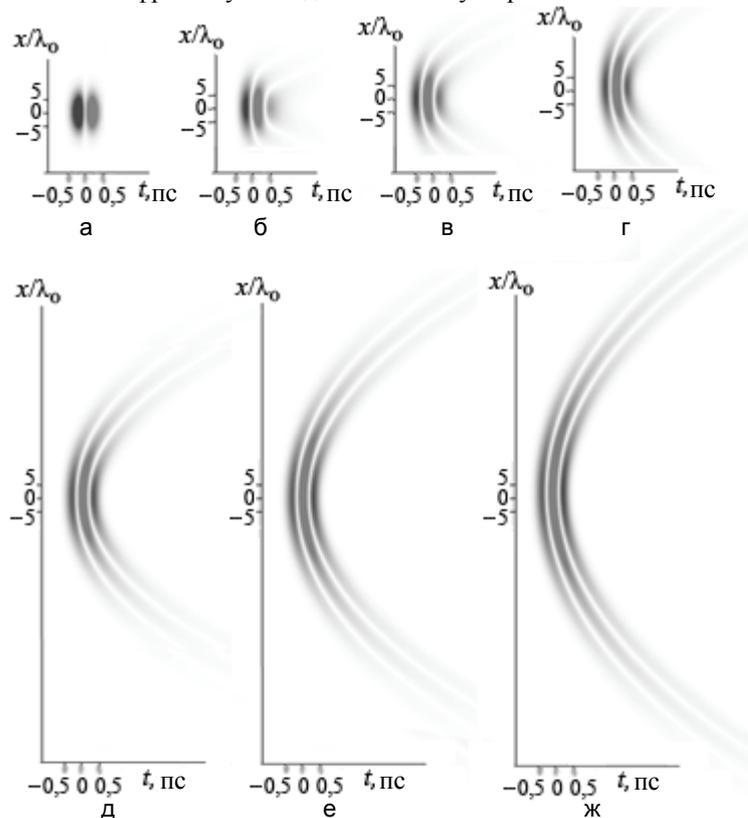


Рис. 3. Пространственно-временная эволюция электрического поля терагерцового излучения с гауссовым поперечным распределением и входными пространственно-временными параметрами  $\lambda_0 = 0,3$  мм,  $\rho = 10\lambda_0$ ,  $\tau = 0,2$  пс по мере распространения в воздухе на расстояниях: а) 0; б) 40 мм; в) 75 мм; г) 125 мм; д) 200 мм; е) 300 мм; ж) 400 мм

### Заключение

В работе показано, что по мере дифракционного распространения парааксиального терагерцового волнового пакета происходят изменения не только пространственной, но и временной структуры излучения: для любой временной зависимости электрического поля вблизи оптической оси на эмиттере электрическое поле вблизи оси в дальней зоне дифракции определяется ее производной. В частности, однопериодная терагерцовая волна в зоне дифракции Фраунгофера превращается в полупериодную, а ее спектр вблизи оптической оси смещается в область высоких частот, в то время как по мере удаления от оси наблюдается смещение в противоположном направлении – в область частот ниже исходной центральной частоты импульса в плоскости источника.

Работа поддержана грантами НШ-5707.2010.2, РНП 2.1.1/4923, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы ГК № П872.

### Литература

1. Волков А.А., Горшунов Б.П., Козлов Г.В. Динамические свойства проводящих материалов // Труды ИОФАН. – М.: Наука, 1990. – Т. 25. – С. 112–161.
2. Беспалов В.Г. Сверхширокополосное импульсное излучение в терагерцовой области спектра: получение и применение // Оптический журнал. – 2006. – Т. 73. – № 11. – С. 28–37.

3. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. Corvallis: Springer Science+Business Media, 2009. – 347 p.
4. Fitzgerald A. J., Cole B. E., Taday P. F. Nondestructive analysis of tablet coating thicknesses using terahertz pulsed imaging. J. Pharm. Sci. – 2006. – V. 94. – № 1. – P. 177–183.
5. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz wave photonics.–N.Y.: Springer Science+Business Media, 2010. – 246 p.
6. Крюков П.Г. Фемтосекундные импульсы. Введение в новую область лазерной физики. – М.: Физматлит, 2008. – 208 с.
7. Gürtler A., Winnewisser C., Helm H., Jepsen P.U. Terahertz pulse propagation in the near field and the far field // JOSA A. – 2000. – V. 17 – № 1. – P. 74–83.
8. Kaplan A.E. Diffraction-induced transformation of near-cycle and subcycle pulses // JOSA B. – 1998. – V.15 – № 3. – P. 951–956.
9. Козлов С.А., Самарцев В.В. Основы фемтосекундной оптики. – М.: Физматлит, 2009. – 292 с.
10. Литвиненко О.Н. Основы радиофизики. – Киев: Техника, 1974. – 208 с.
11. Бутиков Е.И. Оптика. – М.: Высш. шк., 1986. –512 с.
12. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 346 с.
13. Greene B.I., Saeta P.N., Douglas R.D., Schmitt-Rink S., Chuang S.L. Far-infrared light generation at semiconductor surfaces and its spectroscopic applications // IEEE J. Quant. Electron. – 1992. – V.28. – № 10. – P. 2302–2312.

- Езерская Анна Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, a.a.ezerskaya@gmail.com
- Иванов Дмитрий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, dmitry.haxpeha@gmail.com
- Беспалов Виктор Георгиевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbespaloff@gmail.com
- Козлов Сергей Аркадьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru

УДК 535.135

**О ДВИЖЕНИИ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ И ДИСПЕРСИОННОМ РАСПЛЫВАНИИ  
В ПРОЗРАЧНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ИСХОДНО  
ОДНОПЕРИОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА**

**Ю.А. Капойко, С.А. Козлов**

Получены выражения для скоростей движения центра тяжести и дисперсионного расплывания импульсов, содержащих на входе в волноведущую среду лишь одно полное колебание светового поля. Показано, что для таких предельно коротких по числу колебаний входных оптических импульсов эти скорости прямо пропорциональны дисперсионным характеристикам волновода и обратно пропорциональны квадрату исходной длительности импульса.

**Ключевые слова:** однопериодные импульсы, распространение, дисперсия.

**Введение**

При теоретическом анализе распространения импульсного излучения в волноведущих средах, в которых можно пренебречь изменением поперечной структуры светового пучка, рассматривается деформация формы и фазовая модуляция оптического импульса. Это дает исчерпывающую информацию об изменении его структуры в среде [1]. Когда такой полный анализ является трудоемким или не необходимым, часто ограничиваются рассмотрением изменения в среде интегральных параметров импульса, например, его длительности [2, 3]. Так, в работе [4] получены широко используемые на практике выражения, характеризующие эволюцию в оптических средах среднеквадратичной длительности квазимонохроматических световых импульсов произвольной на входе в среду формы (обзор статей в развитие результатов этой работы можно найти, например, в [2, 3]).

Бурное развитие в последние два десятилетия оптики волн из малого числа колебаний [5] привело к необходимости изучения распространения сверхширокополосных импульсов, которые не могут быть рассмотрены в рамках квазимонохроматического приближения. В работе [6] были получены аналитические выражения, описывающие динамику в прозрачных оптических средах средних параметров (центра тяжести и длительности) импульсов без ограничения на их начальную длительность. В настоящей работе показано, что для предельно коротких по числу колебаний однопериодных входных оптических импульсов эти выражения могут быть записаны в виде элементарных функций от характеристик среды и входных параметров импульсов.

**Модель динамики поля импульса в волноведущей среде**

В настоящей работе ограничимся простейшей моделью дисперсии эффективного показателя преломления волноведущей среды

$$n(\omega) = N_0 + a_1 c \omega^2, \tag{1.1}$$

где  $\omega$  – частота,  $c$  – скорость света в вакууме,  $N_0, a_1$  – константы, характеризующие волноводную и материальную дисперсию оптического волновода. Дисперсии (1.1) соответствует уравнение динамики поля световой волны вида [7]

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{N_0}{c} \frac{\partial E}{\partial t} - a_1 \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} = 0, \tag{1.2}$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $z$  – направление распространения волны,  $t$  – время.

Анализ движения средних параметров импульсов, динамика поля которых описывается уравнением (1.2), проведем для входного импульса вида

$$E = E_0 \frac{t}{t_0} e^{-t^2/t_0^2}, \tag{1.3}$$

где  $E_0$  – амплитуда,  $t_0$  – длительность импульса. На рис. 1 иллюстрирован всплеск электромагнитного поля (1.3), представляющий собой лишь одно его полное колебание, и спектр импульса. Такие однопериодные импульсы устойчиво получают, например, в терагерцовом спектральном диапазоне [8, 9].

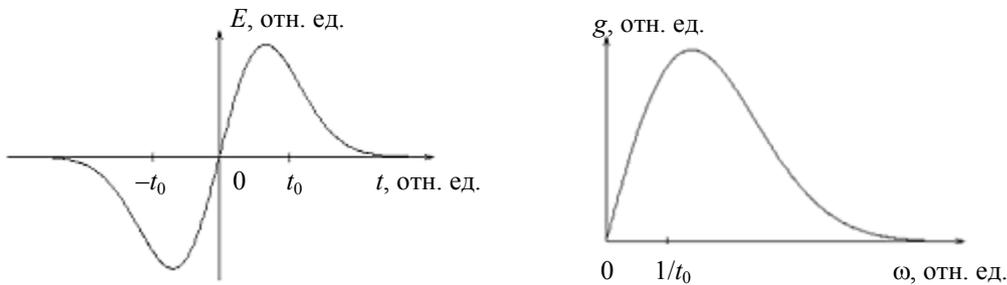


Рис. 1. Поле и спектр однопериодного импульса

**Движение центра тяжести импульса**

Рассмотрим зависимость от координаты  $z$  момента распределения поля  $E$  первого порядка [10]

$$\langle t \rangle = \frac{1}{W} \int_{-\infty}^{+\infty} t E^2 dt, \tag{2.1}$$

где  $W = \int_{-\infty}^{+\infty} E^2 dt$  – энергия импульса. Найдем  $\frac{d \langle t \rangle}{dz}$ , для этого продифференцируем (2.1) по  $z$ , заменив

$\frac{dE}{dz}$  из волнового уравнения (1.2) и полагая

$$\begin{cases} E^{t \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0, \\ \frac{\partial^n E}{\partial t^n} \Big|_{t \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0, n \geq 1, \end{cases} \tag{2.2}$$

получим

$$\frac{d \langle t \rangle}{dz} = \frac{N_0}{c} + \frac{3}{2} a_1 \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right)^2 dt. \tag{2.3}$$

Используя (1.2) и (2.2), можно показать, что производная (2.3) по координате  $z$  равна нулю, т. е. выражение (2.3) является интегралом движения уравнения (1.2). Тогда можно заменить распределение поля  $E$  на начальное (1.3) и, произведя упрощения, получить для однопериодного на входе в среду импульса выражение для скорости его движения в среде вида

$$\frac{d \langle t \rangle}{dz} = \frac{1}{c} \left[ N_0 + \frac{9 a_1 c}{t_0^2} \right]. \tag{2.4}$$

**Эволюция длительности импульса**

Под длительностью импульса в работе будет пониматься квадратный корень из центрального момента распределения поля второго порядка [2]

$$\tau = \langle \Delta t^2 \rangle^{1/2} = \left[ \frac{1}{W} \int_{-\infty}^{\infty} (t - \langle t \rangle)^2 E^2 dt \right]^{1/2} = \left[ \langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right]^{1/2}, \quad (3.1)$$

где

$$\langle t^2 \rangle = \frac{1}{W} \int_{-\infty}^{\infty} t^2 E^2 dt - \quad (3.2)$$

момент распределения поля второго порядка.

Используя (1.2) и (2.2), можно показать, что первая производная (3.2) по координате  $z$  определяется зависящим от  $z$  выражением

$$\frac{d \langle t^2 \rangle}{dz} = \frac{2}{W} \frac{N_0}{c} \int_{-\infty}^{\infty} t E^2 dt + \frac{6}{W} a_1 \int_{-\infty}^{\infty} t \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right)^2 dt, \quad (3.3)$$

а вторая производная (3.2) по координате  $z$  определяется выражением

$$\frac{d^2 \langle t^2 \rangle}{dz^2} = \frac{2N_0^2}{c^2} + \frac{18}{W} a_1^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right)^2 dt - \frac{12}{W} \frac{N_0 a_1}{c} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right)^2 dt, \quad (3.4)$$

причем выражение (3.4) не зависит от координаты  $z$ , т. е. является интегралом движения уравнения (1.2).

С учетом (3.1), а также сохранения величин (2.3) и (3.4) при распространении импульса выражение для квадрата среднеквадратичной длительности импульса можно привести к виду

$$\tau^2 = \tau_0^2 + \left( \frac{d \langle t^2 \rangle}{dz} \right)_0 z + \left[ \frac{1}{2} \frac{d^2 \langle t^2 \rangle}{dz^2} - \left( \frac{d \langle t \rangle}{dz} \right)^2 \right]_0 z^2, \quad (3.5)$$

при получении которого полагали  $\langle t \rangle_0 = 0$  (время, в которое центр тяжести импульса проходит плоскость  $z = 0$ ), а также ввели обозначение  $\tau_0^2 = \langle t^2 \rangle_0^{1/2}$  – длительность импульса на входе в среду.

Для однопериодного на входе в среду импульса скорость дисперсионного расплывания определяется соотношением

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 \langle t^2 \rangle}{dz^2} - \left( \frac{d \langle t \rangle}{dz} \right)^2 = \frac{1}{\tau_0^4} 54 a_1^2. \quad (3.6)$$

### Заключение

В работе получены выражения для скоростей движения центра тяжести и дисперсионного расплывания импульсов, содержащих на входе в волноведущую среду лишь одно полное колебание светового поля. Показано, что для таких импульсов эти скорости прямо пропорциональны дисперсионным характеристикам волновода и обратно пропорциональны квадрату начальной длительности импульса.

Работа поддержана грантами НШ-5707.2010.2 и РНП 2.1.1/4923.

### Литература

1. Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. – М.: Наука, 1979 – 383 с.
2. Ахманов С. А., Выслоух В. А., Чиркин А. С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 312 с.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика – М.: Мир, 1996. – 324 с.
4. Anderson D., Lisak M. Analytic study of pulse broadening in dispersive optical fibers // В кн. Physical Review A (Jan 1, 1987) vol. 35, number 1.
5. Козлов С.А., Самарцев В.В. Основы фемтосекундной оптики – М.: Физматлит, 2009. – 292 с.
6. Барсуков В.С., Карасев В.Б., Козлов С.А., Шполянский Ю.А. Дисперсионное расплывание фемтосекундных световых импульсов с континуумным спектром // В кн. Оптические и лазерные технологии – СПб: СПбГУ ИТМО, 2001. – С. 11–17.
7. Карпман В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах – М.: Наука, 1973. – 176 с.
8. Крюков П. Г. Фемтосекундные импульсы – М.: Физматлит, 2008. – 208 с.
9. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology – New-York: Springer, 2009.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров – М.: Наука, 1968. – 720 с.

**Капойко Юрий Александрович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, karojko@yandex.ru

**Козлов Сергей Аркадьевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru

УДК 535.14+535.33

## **ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР** **В.Г. Беспалов, А.А. Городецкий, Я.В. Грачев, С.А. Козлов, Е.В. Новоселов**

Описан экспериментальный макет и принципы работы импульсного терагерцового рефлектометрического спектрографа-интравизора. При помощи данного макета получены временные формы отраженного ТГц сигнала от слоистых сред – CD-диск, дискета, зубная ткань. Продемонстрирована возможность подробного изучения структуры диэлектрических слоистых сред при помощи данного метода.

**Ключевые слова:** терагерцовая оптика, спектроскопия, голография и томография, рефлектометрия.

### **Введение**

Терагерцовая (ТГц) оптика и спектроскопия, а также технологии, использующие наиболее длинноволновый оптический интервал частот, привлекают все больший интерес вследствие широкого использования в научных целях, а также для применений в гражданской и военной технике. Возникновение этого направления связано прежде всего с появлением источников и приемников когерентного ТГц излучения в 70–80 годах XX века [1, 2]. За последующие годы, в связи с развитием фемтосекундных лазеров и микроэлектроники, в исследованиях ТГц области наметился значительный сдвиг. Появились новые методы генерации, управления распространением и детектированием ТГц излучения, написаны первые монографии [3, 4].

Наиболее развиты к настоящему времени методы генерации и детектирования ТГц излучения с использованием импульсных лазеров ближнего ИК-диапазона спектра фемтосекундной длительности [5]. Как правило, в данных методах генерируются ТГц импульсы, состоящие из нескольких колебаний поля длительностью 0,1–10 пс, соответственно спектр излучения представляет собой континуум, простирающийся в отдельных случаях до 0,1–40 ТГц [4]. Методы детектирования с использованием фемтосекундных импульсов ближнего ИК-диапазона спектра позволяют регистрировать непосредственно временную форму электрического поля ТГц импульса, а путем Фурье-преобразования – комплексный спектр излучения, спектры пропускания или отражения веществ, а также диэлектрические проницаемости в данном диапазоне частот [6].

В ТГц области частот наблюдается огромное число спектральных особенностей веществ, энергия ТГц квантов (1 ТГц соответствует 4,1 МэВ) соответствует вращательным переходам молекул, колебательным модам органических соединений, колебаниям решетки в твердых телах, внутризонным переходам в полупроводниках и энергетическим щелям в сверхпроводниках. Импульсная ТГц спектроскопия с разрешением во времени (THz time-domain spectroscopy) позволяет исследовать все вышеперечисленные спектральные особенности.

Отраженное от объекта широкополосное ТГц излучение несет большой объем информации как о его внутренней структуре, так и о спектральных свойствах, однако процессы дифракции и многократного рассеяния на внутренней структуре объекта затрудняют обработку данных и не позволяют сделать однозначный вывод о его строении и составе. В данной работе проведено исследование процесса отражения широкополосного ТГц излучения от различных объектов, включая отражения от их внутренней структуры, а также от слоистых комплексных покрытий, нанесенных на исследуемый образец. Данная методика исследований может рассматриваться как идеальная (неконтактная, неионизирующая, безопасная) технология неразрушающего контроля, обеспечивающая высокое пространственное разрешение как по покрытиям, так и по глубине изделия.

### **Лабораторный макет для исследований отражения импульсного ТГц излучения от слоистых диэлектрических структур**

Для проведения экспериментов по регистрации ТГц сигналов на отражение от слоистых диэлектрических структур был разработан и реализован лабораторный макет (рис. 1).

В оптической схеме лабораторного макета лазерный пучок от фемтосекундного лазера (средняя выходная мощность на длине волны 1040 нм не менее 1,4 Вт, длительность одиночного импульса по полувисоте  $\approx$  150 фс) при помощи светоделительной пластины 1 разделяется на пробный пучок и пучок накачки. Средняя мощность пробного пучка в данной схеме составляет  $\sim$  1% от средней мощности пучка накачки ( $\sim$  10 мВт), и этого вполне достаточно для дальнейшей схемы электрооптического детектирования. Пробный пучок, пройдя систему зеркал 3, попадает на электрооптический кристалл – детектор ТГц излучения. Пучок накачки, пройдя через линию оптической задержки 2 с шаговым двигателем, управляемым с персонального компьютера, с помощью системы зеркал 3 попадает под углом падения  $45^\circ$  на нелегированный полупроводниковый кристалл арсенида индия (InAs), помещенный в постоянное магнитное поле, в котором путем возбуждения фотоносителей и происходит генерация ТГц излучения [7].



личных задержках сигнал рассогласования, можно измерить зависимость амплитуды ТГц излучения от времени  $E(t)$ . Для увеличения соотношения сигнал–шум в схеме используется синхронный нановольтметр, сигнал с которого оцифровывается и подается на персональный компьютер. Одновременно регистрируется величина временной задержки оптической линии, результаты обрабатываются в реальном времени, и на дисплее компьютера рисуется кривая  $E(t)$ . Как правило, временная форма импульсного ТГц излучения составляет одно полное колебание, а центральная частота его спектра находится в районе 0,5–1,5 ТГц. Фемтосекундный лазер FL-1 с энергией одиночного импульса 13 нДж работает в импульсно-частотном режиме с частотой следования одиночных импульсов порядка 75 МГц. Импульсно-частотный режим генерации позволяет осуществить когерентную генерацию широкополосного ТГц излучения. В данном случае имеется в виду когерентность между любыми ТГц импульсами из частотной последовательности (цуга). Например, при частоте следования возбуждающего фемтосекундного лазера 100 МГц первый и стомиллионный ТГц импульс когерентны между собой, т.е. имеют одну и ту же временную форму, спектр и распределение фаз (идентичный волновой фронт) по сечению пучка. Таким образом, эти импульсы могли бы интерферировать, если задержать второй импульс на 1 с при регистрации в одном и том же месте пространства. Именно данное обстоятельство позволяет осуществлять когерентное электрооптическое детектирование при изменении длины оптической линии задержки. Так как при детектировании терагерцового излучения получаем временную зависимость электрического поля  $E(t)$  ТГц импульсов в каждой точке плоскости, можно вычислить опорный комплексный спектр излучения, падающего на образец  $E_{оп}(\omega)$ , вычислив Фурье-преобразование соответствующей временной последовательности. Поставив на пути ТГц излучения нужный объект, можно измерить измененную временную форму ТГц импульса и комплексный спектр излучения, прошедшего через него,  $E_{об}(\omega)$ . По двум полученным комплексным спектрам можно вычислить показатель преломления, коэффициент поглощения и дисперсию исследуемой среды [6].

#### Результаты предварительных экспериментов по регистрации ТГц сигналов на отражение от различных сред

С использованием лабораторного макета (рис. 1) на первом этапе исследований были получены сигналы от алюминиевого зеркала 6 (рис. 2), полностью отражающего приходящий ТГц импульс. Полученная зависимость величины напряженности электрического поля от времени приведена на рис. 2, а, б. Анализ временной зависимости показывает, что генерируемый ТГц импульс на переднем фронте имеет однопериодную структуру (рис. 2, б) (0–3,5 пс) с временной шириной положительного пика по уровню половинной амплитуды около 1 пс. За основной однопериодной структурой следуют переколебания (4–25 пс) значительно меньшей амплитуды, отражающие дисперсионные свойства среды, что в основном связано с наличием в воздухе паров воды и их линий поглощения в ТГц диапазоне частот.

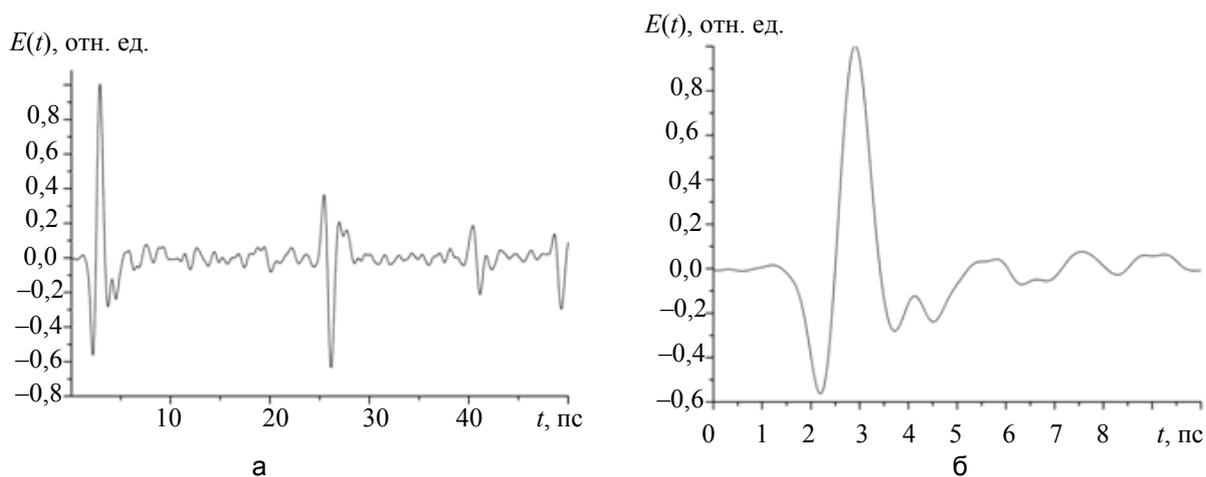


Рис. 2. Зависимость величины напряженности электрического поля ТГц импульса, отраженного от алюминиевого зеркала, от времени: 0–50 пс (а); первые 10 пс (б)

В области 24–28 пс (рис. 2, а) наблюдается однопериодная структура, по форме точно соответствующая первой, только в противофазе и с амплитудой уже отрицательного пика, равного 0,65 от первого. Данная структура, задержанная по времени на 24 пс, связана с отражением ТГц импульса от второй поверхности светоделителя ТГц излучения на основе пластины из высокоомного кремния толщиной 1 мм (рис. 1, деталь 7).

Следующая временная структура, совпадающая по фазе с первой однопериодной структурой, 39–42 пс, соответствует двойному переотражению в кристалле CdTe толщиной 3 мм, используемом в качестве детектора ТГц поля (рис. 1, деталь 9). Последняя структура на рис. 2, а, в противофазе с первой однопериодной структурой соответствует повторному переотражению ТГц импульса от первой и второй поверхностей светоделителя ТГц излучения.

На втором этапе исследовалось отражение от слоистых структур. В качестве простых объектов был выбран CD-диск в пластиковом конверте и компьютерная дискета. Измерялось отражение ТГц импульса от пластикового конверта, от CD-диска и от всего объекта, от диска дискеты и всей дискеты (рис. 3).

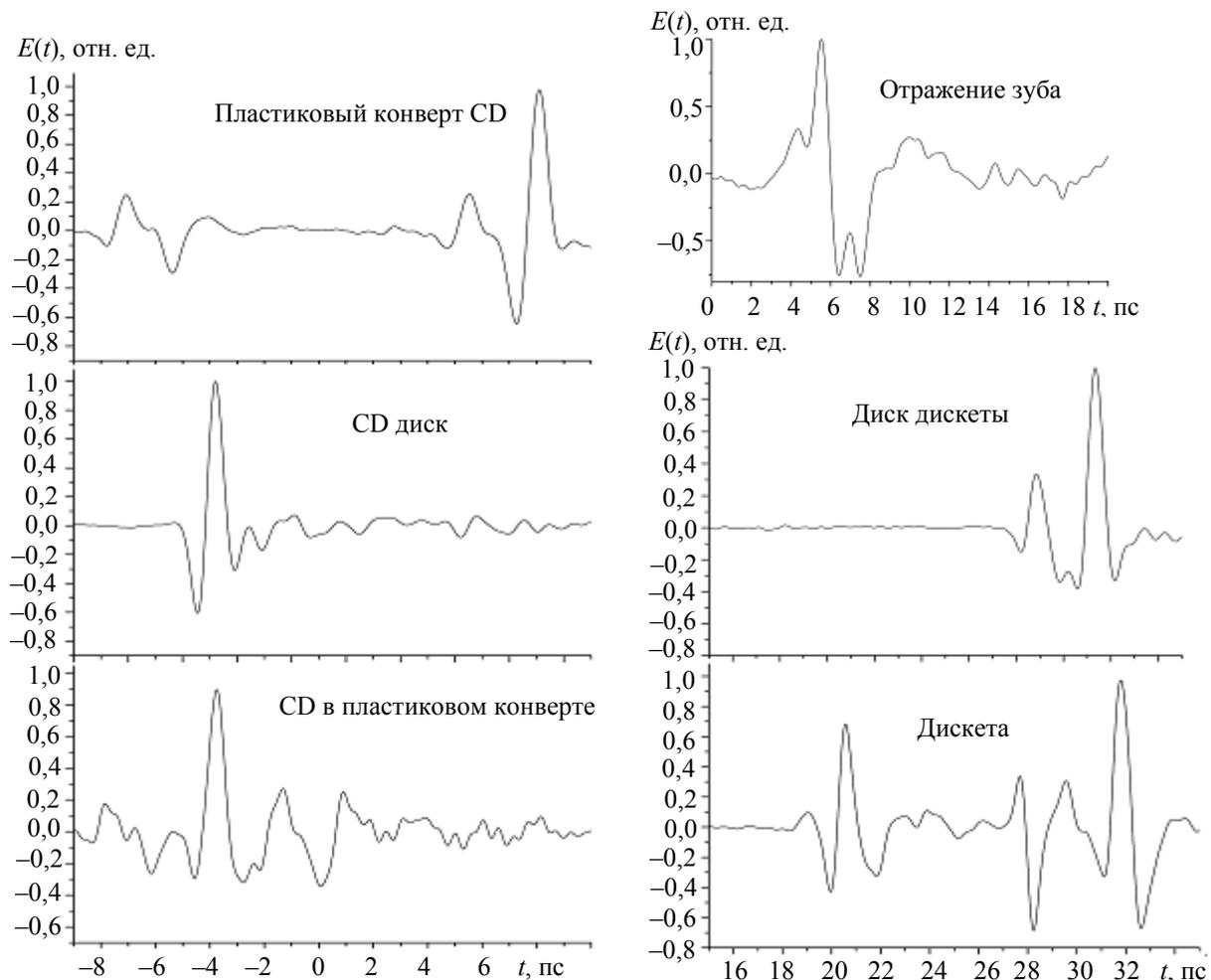


Рис. 3. Отражение ТГц импульса от различных объектов

При отражении от пластикового конверта четко видны пики отражения от первого и второго слоя конверта, причем второй пик находится в противофазе с первым. При отражении от самого CD-диска отражается структура, практически идентичная первичной (рис. 2). Этого и следовало ожидать, поскольку данная сторона CD-диска является зеркалом.

Более сложная структура отражения ТГц импульса наблюдалась в случае дискеты, поскольку в ней находился целый ряд диэлектрических поверхностей. Поскольку толщина диска дискеты составляет всего 50 мкм, то отражения ТГц импульса с длительностью порядка 1 пс (соответствующей длине пробега света в вакууме 300 мкм) от передней и задней поверхностей перенакладываются и образуют структуру из двух пиков (рис. 3). Следует отметить, что путем математического моделирования на основании результатов измерения можно вычислить толщину дискеты и показатель преломления материала.

Весьма перспективным является неинвазивное определение состояния зуба с использованием ТГц излучения. С использованием лабораторного макета были проведены эксперименты по отражению от зуба человека. На рис. 3 приведены временные зависимости ТГц импульса при отражении от зубных тканей. Из рисунка четко видно отражение от переднего слоя зубной эмали, имеющей две поверхности раздела – наружный слой и внутренний слой. Исходя из графика, можно определить оптическую толщину эмали, измеряя временной интервал между пиками временной зависимости. Согласно нижнему гра-

фику, удвоенный пробег ТГц излучения по слою зубной эмали составляет 1,1 пс, что соответствует оптической толщине 165 мкм. На заднем фронте отраженного импульса, за структурой отражения от зубной эмали, наблюдается отражение от дентина.

Таким образом, предварительные эксперименты позволили сформулировать следующие выводы:

- переотражения от светоделиителя в схеме лабораторного макета приводят к появлению паразитных сигналов и затрудняют обработку временной зависимости ТГц поля;
- поскольку ТГц импульс с длительностью порядка 1 пс соответствует длине пробега света в вакууме 300 мкм, для четкого определения границ раздела необходимо использовать более толстые образцы, а для образцов толщиной менее 300 мкм необходимо использовать методы математического моделирования;
- пространственная разрешающая способность метода определяется диаметром ТГц пучка на объекте и центральной длиной волны ТГц излучения и составляет 1 мм в наших экспериментах;
- перспективно использовать методы ТГц рефлектометрии для определения состояния зубных тканей.

### **Заключение**

Разработан и создан лабораторный макет для проведения измерений отражения ТГц излучения от различных сред. С использованием лабораторного макета получены сигналы отражения от слоистых сред – CD-диска, дискеты, зубной ткани. Продемонстрирована возможность подробного изучения структуры слоистых сред при помощи данного метода.

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

### **Литература**

1. Auston D.H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon // *Appl.Phys.Lett.* – 1975. – V. 26. – P. 101–103.
2. Mourou G.A., Stancampiano C., Antonetti A., Orszag A. Picosecond microwave pulses generated with a subpicosecond laser driven semiconductor switch. // *Appl. Phys. Lett.* – 1981. – V. 39. – № 4. – P. 295–365.
3. Zhang X.C., Xu J. Introduction to THz wave photonics // NY: Springer, 2009. – 246 p.
4. Lee Yun-Shik. Principles of terahertz science and technology. Springer Science+Business Media, LLC, XII. 2009. – 340 p.
5. 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.
6. Grischkowsky D., Keiding S.R., van-Exter M.P., Fattinger C. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors // *J. Opt. Society Am.* – 1990. – V. 7. – № 10. – P. 2006–2015.
7. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле // *Оптика и спектроскопия.* – 2002. – Т. 93. – № 1. – С. 158–162.

- |  |   |
|--|---|
| <b>Беспалов Виктор Георгиевич</b>      | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, victorbepaloff@gmail.com          |
| <b>Городецкий Андрей Александрович</b> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник, gorodetsky@phoi.ifmo.ru |
| <b>Грачев Ярослав Владимирович</b>     | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, grachev_y@mail.ru  |
| <b>Козлов Сергей Аркадьевич</b>        | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, декан, kozlov@mail.ifmo.ru        |
| <b>Новоселов Евгений Владимирович</b>  | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, eugene.novoselov@gmail.com                                 |

УДК 621.833.6

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е.А. Берлова

Рассмотрены сравнительные характеристики российских и зарубежных планетарных редукторов. Выявлены причины низкой нагрузочной способности отечественных редукторов, показаны методы повышения нагрузочной способности и долговечности.

**Ключевые слова:** редуктор, нагрузки, точность, сателлит, эпицикл, напряжения, крутящий момент.

### Введение

Планетарные редукторы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Однако редукторы отечественного производства обладают меньшими нагрузочными способностями и долговечностью, чем зарубежные аналоги. Ниже показаны пути повышения характеристик планетарных редукторов.

Основным достоинством планетарных передач является многопоточность передачи энергии. По этой причине планетарные передачи обладают меньшими габаритами и массой, чем редукторы простого ряда, при одинаковых нагрузках и долговечности. Многие широко распространенные схемы планетарных редукторов обеспечивают большие передаточные отношения при высоких значениях КПД [1]. Кинематическая схема планетарного редуктора приведена на рис. 1.

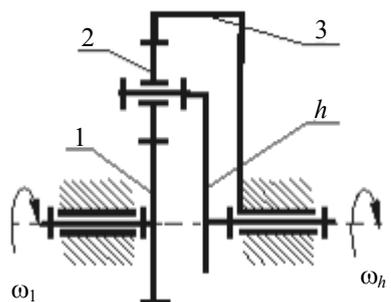


Рис. 1. Кинематическая схема планетарного редуктора: 1 – шестерня; 2 – сателлит; 3 – эпицикл;  $h$  – водило

### Обзор состояния производства планетарных редукторов

Требования потребителей к редукторам обуславливают появление на рынке большого разнообразия различных типов и серий планетарных редукторов.

Фирмы-производители таких редукторов, как Flender и Hyosung выпускают, в основном, крупногабаритные редукторы с мощностью 15–75000 кВт и номинальным крутящим моментом 5300–32500000 Н·м [2, 3]. Фирма Bonfiglioli выпускает широкий диапазон планетарных редукторов множества типоразмеров с моментом на выходе 1000–500000 Н·м [4]; редукторы Alpha серии SP отличаются высокой точностью передачи движения [5]. Также широко распространены редукторы таких фирм, как Sumitomo, Brevini.

Российская промышленность выпускает серии планетарных редукторов, такие как 1МП, МРв, МПз, МПО и т.п. [6]. К сожалению, большинство редукторов было разработано десятилетия назад, имеет устаревшую конструкцию. Последней разработкой отечественной промышленности являются редукторы серии ЗМП. В серии представлены редукторы с радиусами расположения осей сателлитов 25–160 мм с номинальным крутящим моментом 75–16000 Н·м [7, 8]. При этом ряды типоразмеров российских редукторов гораздо реже, чем у иностранных аналогов.

На российских предприятиях (например, НТЦ «Редуктор») в данное время производится модернизация планетарных редукторов. Однако нагрузочная способность модернизированных редукторов невелика и превышает отечественные аналоги на 10–20%; отличия в конструкции незначительны.

Автором проведен анализ и сравнение технических характеристик зарубежных и отечественных редукторов. На рис. 2 приведена сравнительная характеристика зависимостей номинальных крутящих моментов на тихоходном валу от радиуса расположения осей сателлитов для зарубежных и отечественных планетарных редукторов.

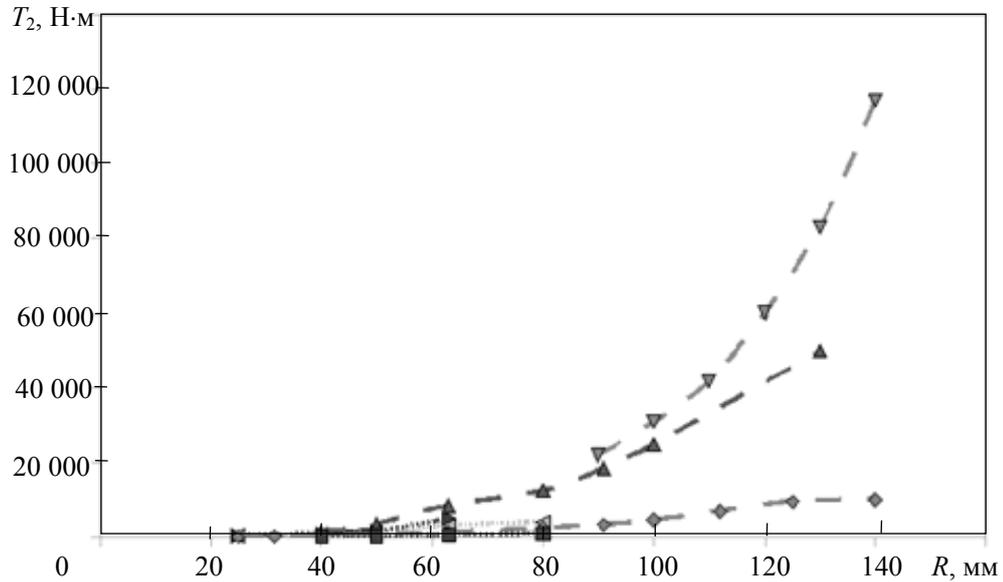


Рис. 2. Номинальный крутящий момент редукторов ( $T_2$ ) в зависимости от радиуса водила (радиуса расположения осей сателлитов):

■ 1МП    ◆ ЗМП    ▼ Flender    ▲ Bonfiglioli    ▴ Alpha    ◁ Sumitomo    ◆ Brevini

На рис. 3 приведены графики сравнения крутящего момента редукторов на единицу массы.

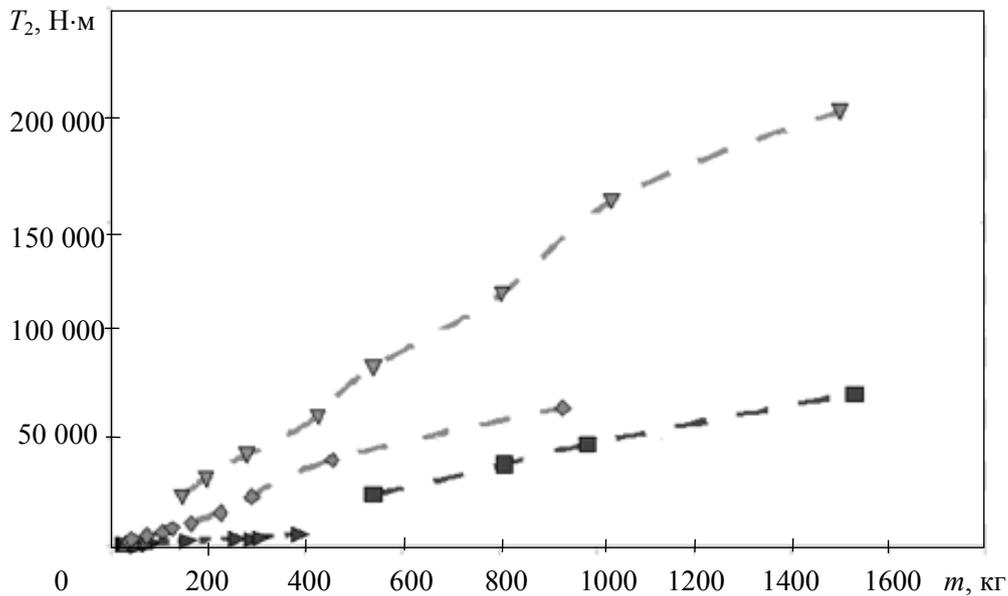


Рис. 3. Номинальный крутящий момент редукторов ( $T_2$ ) в зависимости от массы:

■ Hyosung    ◆ Bonfiglioli    ▼ Flender    ▲ Alpha    ◆ ЗМП

Из рассмотрения графиков, приведенных на рис. 2, 3, можно сделать выводы, что нагрузочная способность российских редукторов в несколько раз ниже зарубежных.

Методы повышения нагрузочной способности и долговечности

Для увеличения нагрузочной способности и долговечности редукторов можно использовать следующие методы [1]:

1. обеспечение равнопрочности зацепления центрального колеса – сателлита и сателлита – эпицикла, что достигается заменой материала эпицикла;
2. применение косозубого, шевронного или арочного зацепления;
3. повышение точности производства как зубчатых колес, так и других элементов редуктора;
4. использование безопорного водила (в целях повышения одновременности работы сателлитов);
5. уточнение методов расчета планетарных редукторов, в частности, решение статически неопределимой задачи в зацеплении при количестве сателлитов больше трех;
6. введение в расчет упругой динамической модели с распределенными параметрами;
7. использование более сложных динамических моделей, в частности, применение метода конечных элементов для моделей с распределенными параметрами, в целях обеспечения одновременной работы сателлитов.

Применение методов 1 и 2 обуславливается решением задачи обработки внутреннего зуба на эпицикле (прямого, косоого, арочного, шевронного) при высокой твердости материала эпицикла (около 60 HRCэ). Такая возможность появилась в новых конструкциях станков, обеспечивающих обработку внутреннего косозубого зацепления после цементации с закалкой. Эффективность этих методов показана ниже.

Повышение точности производства зубчатых колес (метод 3) упирается в такие проблемы, как устарелость и отсталость нормативно-технической документации, в частности, ГОСТ 1643-81 [9], игнорирование требований последних рекомендаций ISO 1328 [8] и др. Одновременно отечественное производство сталкивается с устаревшим станочным парком и низкой квалификацией рабочих. Совокупность этих проблем не позволяет надеяться на быстрое преодоление разрыва в точности изготовления отечественных и зарубежных планетарных редукторов.

Реализация методов 4–7 связана с совершенствованием расчета планетарных передач. Метод увеличения нагрузочной способности при использовании косозубого зацепления взамен прямозубого хорошо известен, однако его применение требует коренной переработки всего узла сателлита. Это связано с изменением конструкции подшипника, а, следовательно, и осей сателлитов. В зарубежных редукторах для нейтрализации осевого усилия в зацеплении используются сдвоенные сателлиты.

Обобщая сказанное, можно сделать вывод, что увеличение нагрузочной способности возможно лишь при кардинальном изменении всей конструкции планетарного редуктора.

Результаты расчетов

Исследованы два двухступенчатых планетарных редуктора: с радиусом водила 31,5 мм и крупногабаритный редуктор с радиусом водила 125 мм. Для расчетов использованы следующие исходные данные. Шестерня: материал – сталь 12ХНЗА; термохимическая обработка – цементация, закалка; финишная обработка – шлифование; твердость активных поверхностей зубьев – 58–61 HRCэ; степень точности – 6 по [9]. Сателлит: материал – сталь 12ХНЗА; термохимическая обработка – цементация, закалка; финишная обработка – шлифование; твердость активных поверхностей зубьев – 58–61 HRCэ; степень точности – 6 по [9]. Эпицикл: материал – сталь 40Х; термоулучшение; твердость активных поверхностей зубьев – 248–293 НВ; степень точности – 8 по [9].

Параметры редукторов приведены в табл. 1.

			Число зубьев	Модуль, мм	Коэффициент смещения	Ширина зубчатого венца, мм	Номинальный крутящий момент, Н·м
3МП-31,5	Быстроходная ступень	Шестерня	25	1,25	0,4	20	124
		Сателлит	26		0	14	
		Эпицикл	77		0	8	
	Тихоходная ступень	Шестерня	13	1,25	0,4	28	
		Сателлит	38		0	25	
		Эпицикл	89		0	18	
3МП-125	Быстроходная ступень	Шестерня	14	3	0,45	37	5000
		Сателлит	53		0,077	34	
		Эпицикл	121		0,077	35	
	Тихоходная ступень	Шестерня	23	5	0,1	77	
		Сателлит	28		- 0,1	75	
		Эпицикл	79		- 0,1	77	

Таблица 1. Геометрические параметры редукторов

Рассмотрим случай замены материала и способа термообработки эпицикла. Расчеты производились по методикам В.Н. Кудрявцева [1]. Все полученные в результате расчеты приведены в табл. 2, 3. Как видно из результатов расчетов, замена материала эпицикла увеличивает допускаемые контактные напряжения и напряжения изгиба, в связи с этим увеличивается запас прочности в зацеплении сателлит–эпицикл.

	Быстроходная ступень				Тихоходная ступень			
	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)
Контактные напряжения, МПа								
Сателлит-эпицикл	920	640	1092	1288	809	640	888	1288
Напряжения изгиба, МПа								
Сателлит	565	820	565	820	809	820	809	820
Эпицикл	419	498	483	820	636	498	734	820

Таблица 2. Редуктор ЗМП-31,5; зацепление сателлит–эпицикл

	Быстроходная ступень				Тихоходная ступень			
	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)	Расчетное	Допускаемое	Расчетное (замена материала эпицикла)	Допускаемое (замена материала эпицикла)
Контактные напряжения, МПа								
Сателлит-эпицикл	420	640	443	1288	988	640	1127	1288
Напряжения изгиба, МПа								
Сателлит	248	820	248	820	582	820	582	820
Эпицикл	173	498	200	820	416	490	480	820

Таблица 3. Редуктор ЗМП-125; зацепление сателлит–эпицикл

	Быстроходная ступень					Тихоходная ступень				
	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое
Контактные напряжения, МПа										
Сателлит-эпицикл	1092	1084	1013	943	1288	888	858	806	771	1288
Напряжения изгиба, МПа										
Сателлит	565	477	431	389	820	809	760	561	512	820
Эпицикл	483	465	421	382	820	734	706	524	484	820

Таблица 4. Редуктор ЗМП-31,5; зацепление сателлит–эпицикл

	Быстроходная ступень					Тихоходная ступень				
	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое	Расчетное $\beta=0^\circ$	Расчетное $\beta=6^\circ$	Расчетное $\beta=14^\circ$	Расчетное $\beta=21^\circ$	Допускаемое
Контактные напряжения, МПа										
Сателлит-эпицикл	443	408	368	348	1288	1127	1082	1062	1005	1288
Напряжения изгиба, МПа										
Сателлит	248	202	184	139	820	582	546	374	343	820
Эпицикл	200	163	149	113	820	480	450	345	315	820

Таблица 5. Редуктор ЗМП-125; зацепление сателлит–эпицикл

Результаты расчетов планетарных редукторов с косозубым зацеплением приведены в табл. 4 и 5. Изменяемым параметром выбран угол наклона зубьев  $\beta=0-21^\circ$ .

Таким образом, изменение угла наклона зубьев приводит как к уменьшению напряжений изгиба, так и контакта.

#### Заключение

Приведенные расчеты планетарных редукторов подтверждают, что изменение материала эпицикла и способа его обработки, а также применение косозубого зацепления приводят к увеличению нагрузочной способности и долговечности планетарных редукторов. Это, в свою очередь, позволяет увеличить номинальный крутящий момент на выходном валу редукторов до уровня зарубежных аналогов.

#### Литература

1. Планетарные передачи. Справочник / Под ред. В.Н. Кудрявцева, Ю.Н. Кирдяшева. – Л.: Машиностроение, 1977. – 536 с.
2. Каталог Planetary gear units. Planurex2 продукции фирмы Flender Service GmbH, 2009. – 48 с.
3. Каталог HyoSung Planetary Gear Reducer продукции фирмы HyoSung фирмы HyoSung Diamond Industrial Co., Ltd., 2009. – 12 с.
4. Каталог Transmittal Bonfiglioli. Serie 300 продукции фирмы BONFIGLIOLI RIDUTTORI S.p.A., 2008. – 188 с.
5. Каталог Alpha SP+ продукции фирмы Wittenstein (alpha), 2006. – 96 с.
6. Анфимов М.И. Редукторы. Конструкции и расчет. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1993. – 463 с.
7. Каталог продукции фирмы НТЦ «Редуктор», 2004.
8. Тимофеев Б.П., Абрамчук М.В. Анализ конкурентоспособности отечественного редукторостроения в части точности зубчатых колес и передач // Научно-технический вестник СПб ГУИТМО. – 2006. – № 31. – С. 259–266.
9. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – Введ. 01.07.1981. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 45 с.

**Берлова Елена Александровна**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, berlova\_@mail.ru

УДК 535.14

## УСЛОВНОЕ КОНТРОЛИРУЕМОЕ ФАЗОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Г.П. Мирошниченко, А.И. Трифанов

Предложена модель трехкубитовой квантовой логической операции условного контролируемого фазового преобразования. Квантовая единица информации – кубит – закодирована в состоянии поляризации квантовой резонаторной моды. Получен условный полевой оператор эволюции трех квантовых мод, показано, что при некоторых параметрах системы и временах взаимодействия он с высокой вероятностью осуществляет требуемое фазовое преобразование.

**Ключевые слова:** квантовые вычисления, логический гейт, условный оператор, фазовое преобразование, однофотонные состояния.

### Введение

Квантовые информационные технологии [1–3], опираясь на современное представление о физике микромира, позволяют передавать, хранить и обрабатывать информацию более эффективно, чем в системах, построенных на классических принципах. В отличие от классического бита, квантовая единица информации – кубит – может находиться в суперпозиции состояний «0» и «1». Благодаря этому имеется возможность осуществлять преобразование состояний большого числа кубитов одновременно (так называемый квантовый параллелизм) [4]. Еще одним важным свойством, которым обладают кубиты, является перепутывание [5]. Оно заключается в том, что в результате взаимодействия двух квантовых подсистем между ними возникают корреляции, которые сохраняются после прекращения этого взаимодействия. Все перечисленное широко используется в различных квантовых алгоритмах [6] и протоколах [7]. Преобразование состояний кубитов и их систем осуществляют квантовые логические устройства (вентили, гейты) [8]. Особый интерес вызывают те из них, которые позволяют образовывать логической базис квантовых вычислений [9]. К ним относятся двухкубитовый вентиль Фредкина (CNOT – контролируемое НЕ) и трехкубитовый вентиль Тоффоли (CCNOT – дважды контролируемое НЕ). В основе оптической реализации этих устройств лежит операция контролируемого преобразования фазы (КПФ) [10]. КПФ – это квантовая операция, в результате которой каждая компонента многокубитового состояния приобретает фазовый множитель, зависящий от состояний отдельных кубитов компоненты. Реализация этой операции – нетривиальная задача. Попытки ее решения можно найти, например, в [11, 12].

Настоящая работа посвящена оптической реализации вероятностной операции КПФ трехкубитового состояния. Каждый кубит (обозначим их  $a, b$  и  $c$ ) кодируется фокковским состоянием  $|\sigma_j\rangle$ ,  $\sigma_j \in \{0,1\}$ ,  $j \in \{a,b,c\}$  однофотонной моды резонатора. Операция КПФ действует следующим образом:

$$|\sigma_a\rangle|\sigma_b\rangle|\sigma_c\rangle \rightarrow \exp(i\pi\delta_{\sigma_a,1}\delta_{\sigma_b,1}\delta_{\sigma_c,1})|\sigma_a\rangle|\sigma_b\rangle|\sigma_c\rangle. \quad (1)$$

Реализация (1) осуществляется за счет взаимодействия резонаторных мод с атомом, пролетающим через резонатор. После взаимодействия над атомом проводится измерение, результаты которого можно использовать для получения условного оператора эволюции электромагнитных полей. В работе предложены параметры оптической системы и оценено время взаимодействия атома с модами резонатора, при которых этот оператор осуществляет преобразование (1). Вычислены вероятность и качество (fidelity) преобразования КПФ.

### Оператор Гамильтона системы

Система, в которой реализуется операция КПФ, состоит из источника атомов, находящихся в некотором состоянии  $\psi_A$ , оптического резонатора с тремя возбужденными модами квантового поля и тремя классическими полями, а также детектора атомных состояний. Число фотонов в каждой квантовой моде может быть 0 или 1. На рис. 1 изображена система уровней атома, помещенного в резонатор с действующими электромагнитными полями. Будем считать, что переходы  $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ ,  $|3\rangle \rightarrow |4\rangle$  и  $|3\rangle \rightarrow |6\rangle$  разрешены для квантовых полей с состояниями поляризации  $|1_a\rangle$ ,  $|1_b\rangle$ ,  $|1_c\rangle$  и частотами  $\omega_a$ ,  $\omega_b$  и  $\omega_c$ . На переходах  $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ ,  $|4\rangle \rightarrow |5\rangle$ ,  $|6\rangle \rightarrow |7\rangle$  действуют классические поля с частотами  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . Оператор Гамильтона рассматриваемой системы можно записать так:

$$H = H_A + H_F + V_c + V_q. \quad (2)$$

Здесь  $H_A, H_F$  – атомный и полевой гамильтонианы в отсутствии взаимодействия:

$$H_A = \sum_{k=1}^7 E_k \sigma_{kk}, \quad H_F = \sum_{m \in \{a,b,c\}} \hbar \omega_m a_m^+ a_m,$$

где  $\sigma_{kk} = |k\rangle\langle k|$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, 7\}$  – проекторы на подпространства, соответствующие собственным значениям  $H_A$ :  $H_A|k\rangle = E_k|k\rangle$ ;  $a_m^+$  и  $a_m$  – соответственно операторы рождения и уничтожения фотона в моде частоты  $\omega_m$ ,  $m \in \{a, b, c\}$ ;  $V_c$  и  $V_q$  – зависящие от времени операторы взаимодействия атома с классическими и квантовыми полями:

$$V_c = -\hbar(\Omega_1 \sigma_{23} \exp(i\omega_1 t) + \Omega_2 \sigma_{45} \exp(i\omega_2 t) + \Omega_3 \sigma_{67} \exp(i\omega_3 t) + (h.c.)),$$

$$V_q = -g_a \hbar(\sigma_{21} a_a + \sigma_{12} a_a^+) - g_b \hbar(\sigma_{43} a_b + \sigma_{34} a_b^+) - g_c \hbar(\sigma_{65} a_c + \sigma_{56} a_c^+).$$

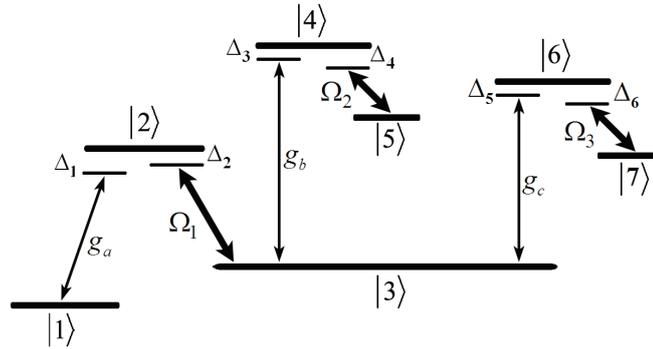


Рис. 1. Схема энергетических уровней атома с действующими квантовыми и классическими электромагнитными полями

Здесь  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$  – частоты Раби классических полей,  $g_k$  – константы связи для квантовых полей. Запишем уравнение Шредингера с гамильтонианом (2):

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = H |\psi(t)\rangle = (H_A + H_F + V) |\psi(t)\rangle, \quad (3)$$

где  $V = V_c + V_q$ . Используем резонансное приближение. Определим следующие унитарные преобразования:

$$G(t) = \exp(-iRt) = \sum_{k=1}^7 \exp(-i\hbar\alpha_k t) \sigma_{kk}, \quad (4)$$

$$W(t) = \exp(-iQt) = \sum_{m \in \{a,b,c\}} \exp(-i\hbar\beta_m a_m^+ a_m t). \quad (5)$$

Будем искать решение (3) в виде

$$|\psi(t)\rangle = W(t)G(t)|\varphi(t)\rangle. \quad (6)$$

После подстановки (6) в уравнение (3) и дифференцирования получим:

$$\left( H_A - R + H_F - Q + W^+(t) G^+(t) V G(t) W(t) \right) |\varphi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\varphi(t)\rangle. \quad (7)$$

Здесь учтено, что операторы (4) и (5) коммутируют с  $H_0$ . Параметры  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  выберем так, чтобы операторы  $V_c$  и  $V_q$  не содержали колебаний на оптических частотах. В результате получим следующие выражения для операторов в левой части (7):

$$H_A - R = \sum_{k=1}^7 (E_k - \hbar\alpha_k) \sigma_{kk} = \sum_{k=1}^7 \Delta_k \sigma_{kk},$$

$$H_F - Q = \sum_{m \in \{a,b,c\}} \hbar(\omega_m - \beta_m) a_m^+ a_m = \sum_{m \in \{a,b,c\}} \hbar\delta_m a_m^+ a_m.$$

В силу того, что число условий на  $\alpha_k$  и  $\beta_m$  меньше, чем количество этих параметров, часть из них можно выбрать произвольно. Выберем  $\alpha_1 = E_1$  и  $\beta_m = \omega_m$ . Определим однофотонные отстройки  $\varepsilon_j$ ,

$$\varepsilon_1 = E_2 - E_1 - \hbar\omega_a, \varepsilon_3 = E_4 - E_3 - \hbar\omega_b, \varepsilon_5 = E_6 - E_3 - \hbar\omega_c, \\ \varepsilon_2 = E_2 - E_3 - \hbar\omega_1, \varepsilon_4 = E_4 - E_5 - \hbar\omega_2, \varepsilon_6 = E_6 - E_7 - \hbar\omega_3,$$

и многофотонные отстройки  $\Delta_k$ , которые выражаются через однофотонные следующим образом:

$$\Delta_1 = \varepsilon_1, \Delta_2 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \Delta_3 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \Delta_4 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4, \\ \Delta_5 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_5, \Delta_6 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_5 - \varepsilon_6.$$

В результате получим стационарный гамильтониан, который будем использовать в дальнейших вычислениях:

$$H = \hbar \sum_{k=1}^7 \Delta_k \sigma_{kk} - \hbar (g_a \sigma_{21} a_a + g_b \sigma_{43} a_b + g_c \sigma_{65} a_c + h.c.) - \\ - \hbar [\Omega_1 (\sigma_{23} + \sigma_{32}) + \Omega_2 (\sigma_{45} + \sigma_{54}) + \Omega_3 (\sigma_{67} + \sigma_{76})]. \quad (8)$$

Во всех численных расчетах использовались следующие величины параметров системы (в единицах  $g_a = g_b = g_c = 10^8$  Гц):

$$\Omega_1 = 0,1, \Omega_2 = \Omega_3 = 1, \Delta_1 = \Delta_3 = 0, \Delta_2 = 4, \Delta_4 = \Delta_5 = 10, \Delta_6 = 7, \Delta_7 = 2. \quad (9)$$

### Условные полевые состояния

Будем решать уравнение Шредингера с оператором Гамильтона (8). Для этого разложим вектор  $|\varphi(t)\rangle$  по базису атомных и полевых состояний:

$$|\varphi(t)\rangle = \sum_{k=1}^7 |k\rangle_A (c_{000}^k |0_a 0_b 0_c\rangle_F + c_{001}^k |0_a 0_b 1_c\rangle_F + \dots + c_{111}^k |1_a 1_b 1_c\rangle_F). \quad (10)$$

Выберем следующее начальное условие:

$$|\varphi(0)\rangle = |1\rangle_A |\varphi(0)\rangle_F. \quad (11)$$

Решение уравнения Шредингера будем искать с помощью унитарного оператора эволюции  $U(t)$ :

$$|\varphi(t)\rangle = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} H t\right) |\varphi(0)\rangle = U(t) |\varphi(0)\rangle = U(t) |1\rangle_A |\varphi(0)\rangle_F. \quad (12)$$

Функция  $|\varphi(t)\rangle$  содержит всю информацию о состоянии атомно-полевой системы. Однако она не факторизуется в прямое произведение атомного вектора и полевого – произошло перепутывание. Для того чтобы получить информацию, закодированную в полевом состоянии, необходимо произвести измерение над атомом. Положим, что в момент времени  $t$  в результате измерения получилось состояние  $|s\rangle_A$ . Учитывая этот результат, можно получить условное полевое состояние в момент времени  $t$ :

$$|\varphi(t)\rangle_F = \langle s | \varphi(t) \rangle = \langle s | U(t) |1\rangle_A |\varphi(0)\rangle_F = K(s,1,t) |\varphi(0)\rangle_F. \quad (13)$$

Оператор эволюции, действующий на начальное полевое состояние, носит название оператора Крауса. Этот оператор условный, так как зависит от результата измерения состояния атомной подсистемы. Он не является унитарным. Теперь решим следующую задачу: найдем такие соотношения между величинами частот Раби полей, константами взаимодействия и многофотонными отстройками, при которых матрица  $K(t)$  оператора  $K(s,1,t)$  в базисе фоковских состояний  $|0\rangle_F, |1\rangle_F$  совпадает с матрицей преобразования КПФ (1). Используем численное моделирование. Настроим детектор на измерение состояния  $|1\rangle_A$  и найдем зависимость элементов матрицы  $K(t)$  от времени. Легко проверить аналитически, что  $K(t)$  – диагональная матрица и ее элементы  $K_{11}(t) = \dots = K_{44}(t) = 1$  от времени не зависят. Временная зависимость оставшихся элементов изображена на рис. 2. Здесь представлены модули и аргументы величин  $K_{77}(t)$  и  $K_{88}(t)$ . Поведение во времени элементов  $K_{55}(t)$  и  $K_{66}(t)$  отличается от  $K_{77}(t)$  очень мало. Величины полей и однофотонных отстроек соответствуют (9). Время взаимодействия выбираем из условия, что модули всех элементов равны единице, и аргумент элемента  $K_{88}$  отличается от остальных на  $\pi$ . Это достигается в момент времени  $t_0$ . Значит, если атом покинет резонатор через время  $t_0$ , результатом измерения его состояния будет  $|1\rangle_A$ , и с высокой вероятностью, которая вычисляется ниже, можно заключить, что требуемая операция КПФ произошла.

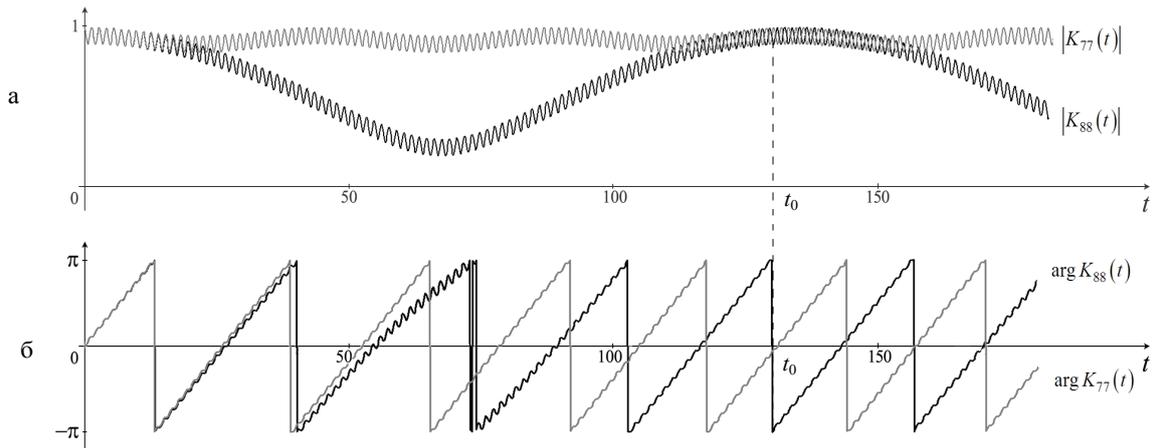


Рис. 2. Зависимость модуля (а) и аргумента (б) элементов матрицы  $K(t)$  от времени. В момент  $t_0$  матрица  $K(t_0)$  соответствует преобразованию КПФ. Значения используемых параметров соответствуют (9)

**Вероятность и качество преобразования**

Вычислим вероятность того, что при измерении атома после его взаимодействия с электромагнитным полем резонатора в течение времени  $t_0$  будет получено состояние  $|1\rangle_A : K_1(1,1,t) \equiv K_1(t)$ :

$$P(t) = Tr_F \left( K_1(t) |\varphi(0)\rangle_F \langle\varphi(0)| K_1^\dagger(t) \right). \tag{14}$$

Здесь  $Tr_F$  – операция взятия следа в подпространстве полевых состояний. Пусть далее  $|CPS\rangle_F$  – состояние поля после идеального фазового преобразования (CPS – Controlled Phase Shift – то же, что КПФ). Тогда качество преобразования определяется следующим образом:

$$F(t) = \frac{|\langle CPS | K_1(t) | \varphi(0) \rangle_F|}{\sqrt{Tr_F \{ K_1(t) | \varphi(0) \rangle_F \langle \varphi(0) | K_1^\dagger(t) \}}}. \tag{15}$$

На рис. 3 приведены графики зависимости функций  $P(t)$  и  $F(t)$  от времени. Вычислим эти значения для момента  $t_0$  :  $P(t_0) = 0,76, F(t_0) = 0,98$ .

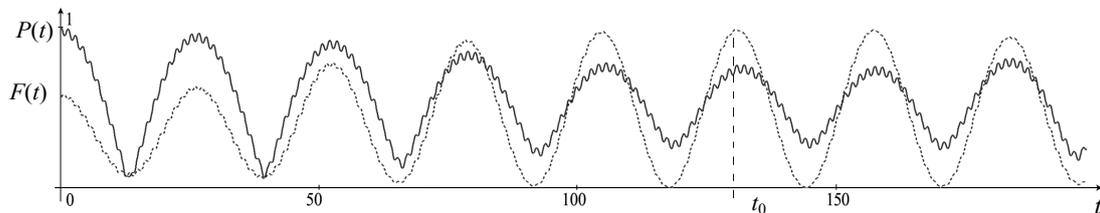


Рис. 3. Зависимость вероятности  $P(t)$  и качества  $F(t)$  фазового преобразования от времени. Параметры системы соответствуют (9)

**Заключение**

В работе предложена реализация квантовой логической операции условного контролируемого фазового преобразования. В модели использовалось квантово-механическое описание процессов эволюции атомной и полевой подсистем. Предъявлены величины параметров оптической системы, при которых реализуется требуемая операция КПФ. Следует отметить, что наряду с высоким значением качества преобразования (0,98) вероятность срабатывания устройства не очень велика (0,76). Это отчасти связано с тем, что аналитическое выражение для матрицы  $K(t)$  не найдено, и поэтому сложно отыскать оптимальные значения параметров оптической системы. Исходя из результатов численного расчета, можно лишь сделать некоторые предположения относительно поведения элементов  $K(t)$ . Для оптимизации параметров, очевидно, потребуется строить теорию возмущений по параметру  $\Omega_1$ . С другой стороны, объективно повысить вероятность можно при помощи повторения акта взаимодействия атома с полем резонатора и нового измерения. Включение в систему каналов обратной связи также может улучшить вероятность срабатывания. Дальнейшее уточнение модели связано с учетом механизмов затухания.

### Литература

1. Килин С.Я. Квантовая информация // Успехи физических наук. – 1999. – Т. 169. – № 5. – С. 507–527.
2. Стин Э. Квантовые вычисления. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 100 с.
3. Валиев К.А., Кокин А.А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. – Ижевск: РХД, 2001. – 352 с.
4. Dugic' M., C'irkovi'c M.M. Quantum parallelism in quantum information processing // J. Theor. Phys. – 2002. – V. 14. – № 9. – P. 1641–1649.
5. Horodecki R. et. al. Quantum entanglement // Rev. Mod. Phys. – 2009. – V. 81. – № 2. – P. 865–942.
6. Smith J., Moska M. Algorithms for quantum computers. 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: arXiv:1001.0767v2 [quant-ph] 2010, своб.
7. Scarani V. et.al. The security of practical quantum key distribution // Rev. Mod. Phys. – 2009. – V. 81. – № 3. – P. 1301–1350.
8. Fredkin E., Toffoli T. Conservative logic // Inter. Journ. of Theor. Phys. – 1982. – V. 21. – № 12. – P. 219–253.
9. Lloid S. Almost any Quantum Logic Gate is Universal // Phys. Rev. Lett. – 1995. – V. 75. – № 2. – P. 346–349.
10. Turchette Q.A. et. al. Measurement of Conditional Phase Shift for Quantum Logic // Phys. Rev. Lett. – 1995. – V. 75. – P. 4710–4713.
11. Ottaviani C. et. al. Polarization Qubit Phase Gate in Driven Atomic Media // Phys. Rev. Lett. – 2003. – V. 90. – P.197902.
12. Ottaviani C. et. al. Quantum phase-gate operation based on nonlinear optics: Full quantum analysis // Phys. Rev. A. – 2006. – V. 73. – P. 010301.

*Мирошниченко Георгий Петрович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, gpmirosh@gmail.com

*Трифанов Александр Игоревич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alextrifanov@gmail.com

УДК 681.51.015

## УПРАВЛЕНИЕ ПО ВЫХОДУ ЛИНЕЙНЫМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И НЕУЧТЕННОЙ ДИНАМИКИ

**А.А. Бобцов, С.В. Шаветов**

Статья является развитием исследования, опубликованного в [1]. В [1] был проведен анализ работоспособности метода последовательного компенсатора для стабилизации по выходу линейного параметрически неопределенного объекта, функционирующего в условиях неучтенной динамики. В этой работе рассматривается возможность использования метода последовательного компенсатора для компенсации возмущающего воздействия для линейного параметрически неопределенного объекта, функционирующего в условиях неучтенной динамики.

**Ключевые слова:** управление по выходу, неучтенная динамика, компенсация возмущающих воздействий, параметрическая неопределенность.

### Введение. Постановка задачи

Проблема анализа систем с неучтенной динамикой или сингулярными возмущениями является актуальной задачей современной теории автоматического управления. Например, описание объекта управления может содержать малоинерционные звенья, слабым влиянием которых на динамику основного процесса пренебрегают на этапе синтеза регулятора. Однако такого рода пренебрежение может пагубно сказаться на устойчивой работе системы управления. Данная статья является развитием результата, опубликованного в [1]. В [1] был проведен анализ работоспособности метода последовательного компенсатора (подробнее см., например, [2–4]) для стабилизации линейного объекта в условиях неучтенной асимптотически устойчивой динамики.

Были найдены условия, для которых алгоритм управления, построенный на базе метода последовательного компенсатора, переводит выходную переменную объекта в нулевое положение для любых начальных условий. Заметим, что задача анализа систем с неучтенной динамикой или сингулярными возмущениями не является новой, и ей посвящено достаточно большое число работ как российских, так и зарубежных ученых (см., например, [5 – 11]). Например, в обзоре [5] представлены основные результаты, полученные при исследованиях сингулярно возмущенных задач управления, начиная с 1982 г. В [5]

достаточно кратко были проанализированы методы оптимального и  $H_\infty$  управления, подходы управления распределенными системами, итеративные процедуры, а также интересующие нас в большей мере алгоритмы управления в условиях неопределенности и т.д. Также анализ и синтез методов адаптивного управления в условиях неучтенной динамики был проведен в монографии [6]. Однако, насколько известно авторам данной статьи, исследования методов адаптивного и робастного управления по выходу параметрически неопределенными объектами с компенсацией возмущающих воздействий и в условиях неучтенной динамики ранее не проводились.

В этой работе, в развитие [1], проводится анализ работоспособности метода последовательного компенсатора для стабилизации по выходу линейного параметрически неопределенного объекта с компенсацией ограниченных возмущений. Рассмотрим линейный объект управления вида

$$\begin{cases} \dot{\chi}_1(t) = A_\chi \chi_1(t) + b_\chi(v(t) + w(t)), \\ y(t) = c_\chi^T \chi_1(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mu \dot{\chi}_2(t) = F_\chi \chi_2(t) + qu(t), \\ v(t) = l^T \chi_2(t), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\chi_1(t) \in R^n$  – вектор переменных состояния системы (1);  $\chi_2(t) \in R^r$  – вектор переменных состояния системы (2);  $y(t) \in R$  – измеряемая выходная переменная объекта; функция  $v(t) \in R$  – не измеряется;  $u(t) \in R$  – сигнал управления;  $A_\chi, F_\chi, b_\chi, c_\chi, q$  и  $l$  – матрицы и векторы соответствующей размерности с неизвестными коэффициентами; как и в [1, 6] будем полагать, что  $-F_\chi l = q$ ; уравнение (2) представляет асимптотически устойчивую динамику (т.е. матрица  $F_\chi$  гурвицева), которая не учитывается при синтезе закона управления; число  $\mu > 0$  определяет быстродействие системы (2);  $w(t)$  – ограниченное возмущающее воздействие.

Целью данной работы является синтез управляющего воздействия с использованием метода последовательного компенсатора, парирующего влияние внешнего ограниченного возмущающего воздействия  $w(t)$ . Или иными словами, требуется найти функцию  $u(t)$ , для которой выходная переменная  $y(t)$  сойдется в некоторую малую область и останется в ней.

### Основной результат

Следуя [1], перепишем систему (1), (2) в форме вход–выход:

$$a(p)y(t) = b(p)(v(t) + w(t)), \quad (3)$$

$$d(p)v(t) = c(p)u(t), \quad (4)$$

где  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования; измеряется выходная переменная  $y = y(t)$  (но не ее производные);  $b(p) = b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0$ ,  $a(p) = p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$ ,  $d(p) = d_r p^r + d_{r-1} p^{r-1} + \dots + d_1 p + d_0$ ,  $c(p) = d(0)$  – полиномы с неизвестными параметрами;  $m \leq n-1$ ; передаточная функция  $\frac{b(p)}{a(p)}$  имеет относительную степень  $\rho = n - m$ ; полином  $b(p)$  гурвицев, коэффициент  $b_m > 0$ .

Выберем закон управления следующим образом:

$$u = -(k + \gamma)\alpha(p)\xi_1, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma \xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{\rho-1} = \sigma(-k_1 \xi_1 - k_2 \xi_2 - \dots - k_{\rho-1} \xi_{\rho-1} + k_1 y), \end{cases} \quad (6)$$

где число  $k > 0$  и полином  $\alpha(p)$  степени  $\rho-1$  выбираются так, чтобы передаточная функция

$$H(p) = \frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}$$

была строго вещественно положительной, положительный параметр  $\gamma$  служит для компенсации возмущающего воздействия  $w(t)$ , число  $\sigma > k$ , а коэффициенты  $k_i$  рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (6) при нулевом входе  $y(t)$ . В отличие от [1], в управление вида (5) добавлен дополнительный параметр  $\gamma$ .

*Замечание 1.* На практике расчет коэффициента  $k > 0$ , обеспечивающего выполнение условий строгой вещественной положительности передаточной функции  $H(p) = \frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}$ , может быть осуществлен в случае известных границ на коэффициенты полиномов  $a(p)$  и  $b(p)$ .

Как было доказано в [2], технически реализуемый алгоритм (5), (6) обеспечивает асимптотическую сходимость к нулю переменной  $y(t)$  в отсутствие возмущений и в случае  $\mu = 0$  (т.е. при отсутствии неучтенной динамики). При  $\mu > 0$  и  $w(t) = 0$  в [1] были найдены аналитические условия применимости закона управления (5), (6) для стабилизации объекта (1), (2). Однако случай компенсации возмущений для системы (1), (2) при  $\mu > 0$  рассматривается впервые. Иными словами, требуется найти ограничения на числа  $\mu$  и  $\sigma$ , при которых для системы (1) – (6) выполнено целевое условие

$$|y(t)| \leq \varepsilon \text{ при } \infty > t \geq t_1,$$

где  $\varepsilon$  – некоторое, в общем случае малое, число.

Проведем ряд преобразований. Подставляя (5) в (4), получаем:

$$v = \frac{c(p)}{d(p)}(-k + \gamma)\alpha(p)\xi_1 = -(k + \gamma)\alpha(p)\frac{c(p)}{d(p)}\xi_1 = -(k + \gamma)\alpha(p)\hat{y} = -(k + \gamma)\alpha(p)(y - \varepsilon_1), \quad (7)$$

где  $\hat{y} = \frac{c(p)}{d(p)}\xi_1$  и  $\varepsilon_1 = y - \hat{y}$ . Тогда для (3) имеем:

$$\begin{aligned} y &= \frac{b(p)}{a(p)}(v + w) = -(k + \gamma)\frac{\alpha(p)b(p)}{a(p)}(y - \varepsilon_1) + \frac{b(p)}{a(p)}w = \\ &= (k + \gamma)\frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}\varepsilon_1 + \frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}\varphi(t) - \gamma\frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}y, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\varphi(t) = \frac{1}{\alpha(p)}w(t)$ .

Теперь представим модель вход–выход (8) в виде модели вход–состояние–выход

$$\dot{x} = Ax + (k + \gamma)b\varepsilon_1 + b(\varphi - \gamma y), \quad (9)$$

$$y = c^T x, \quad (10)$$

где  $x \in R^n$  – вектор переменных состояния модели (9);  $A$ ,  $b$ ,  $g$  и  $c$  – матрицы перехода от модели вход–выход к модели вход–состояние–выход, причем в силу известной леммы Якубовича–Калмана (см., например, [6, 7]) можно указать симметрическую положительно определенную матрицу  $P$ , удовлетворяющую двум следующим матричным уравнениям:

$$A^T P + PA = -Q_1, \quad Pb = c, \quad (11)$$

где  $Q_1 = Q_1^T$  – некоторая положительно определенная матрица.

Перепишем (6) и (7) в векторно-матричной форме:

$$\dot{\xi} = \sigma(\Gamma\xi + dk_1 y), \quad \xi_1 = h^T \xi, \quad (12)$$

$$\mu \dot{z} = Fz + q\xi_1, \quad \hat{y} = l^T z, \quad (13)$$

где  $\xi \in R^{p-1}$  и  $z \in R^r$  – векторы переменных состояния моделей (12) и (13) соответственно; матрица

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 & \dots & -k_{p-1} \end{bmatrix} \text{ – гурвицева в силу расчета коэффициентов } k_i \text{ модели (6), } d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$h = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}; \quad F, q \text{ и } l \text{ – матрицы перехода от модели вход–выход к модели вход–состояние–выход, причем,}$$

как уже допускалось ранее, следуя [1, 5], будем полагать, что  $-Fl = q$ .

Введем в рассмотрение векторы отклонений

$$\eta_1 = ly - z, \tag{14}$$

$$\eta_2 = hy - \xi. \tag{15}$$

Дифференцируя уравнения (14) и (15), получаем

$$\dot{\eta}_1 = l\dot{y} - \mu^{-1}Fz - \mu^{-1}q\xi_1 = l\dot{y} - \mu^{-1}F(l y - \eta_1) - \mu^{-1}q(y - \varepsilon_2) = l\dot{y} + \mu^{-1}F\eta_1 + \mu^{-1}q\varepsilon_2, \tag{16}$$

$$\varepsilon_1 = y - \hat{y} = l^T \eta_1, \tag{17}$$

$$\dot{\eta}_2 = h\dot{y} - \sigma(\Gamma(hy - \eta_2) + dk_1 y) = h\dot{y} + \sigma\Gamma\eta_2 - \sigma(dk_1 + \Gamma h)y = h\dot{y} + \sigma\Gamma\eta_2, \tag{18}$$

$$\varepsilon_2 = y - \xi_1 = h^T \eta_2, \tag{19}$$

где  $dk_1 = -\Gamma h$  и  $-Fl = q$ .

Таким образом, имеем систему дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = Ax + (k + \gamma)b\varepsilon_1 + b(\phi - \gamma y), \quad y = c^T x, \tag{20}$$

$$\dot{\eta}_1 = l\dot{y} + \mu^{-1}F\eta_1 + \mu^{-1}q\varepsilon_2, \quad \varepsilon_1 = l^T \eta_1, \tag{21}$$

$$\dot{\eta}_2 = h\dot{y} + \sigma\Gamma\eta_2, \quad \varepsilon_2 = h^T \eta_2. \tag{22}$$

Положительно определенные матрицы  $R = R^T$  и  $N = N^T$  удовлетворяют уравнениям Ляпунова:

$$F^T R + RF = -Q_2, \tag{23}$$

$$\Gamma^T N + N\Gamma = -Q_3, \tag{24}$$

где  $Q_2 = Q_2^T$  и  $Q_3 = Q_3^T$  – положительно определенные матрицы.

Условия работоспособности закона управления (5), (6) для стабилизации системы (1), (2), (20)–(22) приведены в следующей теореме.

*Теорема.* Пусть для стабилизации системы (1), (2) используется закон управления (5), (6). Пусть число  $k$  обеспечивает строгую вещественную положительность передаточной функции  $H(p) = \frac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}$ . Пусть положительные числа  $\mu, \gamma, \beta$  и  $0 \leq \theta < 1$  удовлетворяют условиям

$$-\mu^{-1}\eta_1^T Q_2 \eta_1 + \delta^{-1}k^2(l^T \eta_1)^2 + (\eta_1^T Rq)^2 + \delta^{-1}(\eta_1^T Rl)^2 + (k + \gamma)(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + (k + \gamma)(l^T \eta_1)^2 + \delta(l^T \eta_1)^2 + \beta\mu^{-1}(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + \gamma(\eta_1^T Rlc^T b)^2 \leq -\eta_1^T Q \eta_1 < 0, \tag{25}$$

$$-x^T Q_1 x + \delta x^T Pbb^T Px + 2\delta(c^T Ax)^2 \leq -x^T Q x < 0, \quad \delta = \delta(\mu) = \mu^\theta \tag{26}$$

для всех  $x \neq 0$  и  $\eta_1 \neq 0$ .

Тогда для всех  $\sigma$ , удовлетворяющих неравенству

$$-\sigma\eta_2^T Q_3 \eta_2 + \mu^{-2}(h^T \eta_2)^2 + \delta^{-1}(\eta_2^T Nh)^2 + \gamma(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \delta^{-1}(k + \gamma)^2(\eta_2^T Nhc^T b)^2 \leq -\eta_2^T Q \eta_2 < 0, \tag{27}$$

при  $\eta_2 \neq 0$  выполнено целевое условие  $|y(t)| \leq \varepsilon$  при  $\infty > t \geq t_1$ .

Доказательство теоремы приведено в Приложении.

### Заключение

Рассмотрена задача компенсации внешнего ограниченного возмущающего воздействия с использованием закона управления (5), (6) для линейной системы (1), (2). Показано, что алгоритм управления, опубликованный в [2–4] при выполнении условий (25)–(27) может быть успешно применен для компенсации ограниченного возмущения для линейного параметрически неопределенного объекта функционирующего в условиях неучтенной динамики. Очевидно, что условия (25) и (26) трудно проверить на практике. Однако авторы полагают, что данный результат может быть использован при решении конкретной прикладной задачи, когда известны области изменения параметров. В этом случае неравенства (25)–(27) будет проверить проще. Авторы также рассматривают данный результат как вспомогательный для решения задачи управления по выходу линейным объектом с неизвестными параметрами и относительной степенью. Для иллюстрации этого предположения рассмотрим линейный объект управления вида

$$a(p)y(t) = b(p)u(t), \tag{28}$$

где относительная степень  $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$  неизвестна, но известны числа  $\rho_{\min}$  и  $\rho_{\max}$ . Целью управления является стабилизация системы (28). Выберем закон управления вида (5), (6)

$$u = -k\alpha(p)\xi_1, \tag{29}$$

где  $\gamma = 0$  и  $\xi_1$  рассчитывается в соответствии с выражением (6), а полином  $\alpha(p)$  имеет размерность  $\rho_{\min}$ . Если  $\rho > \rho_{\min}$ , то регулятор вида (29), (6) не может гарантировать устойчивость замкнутой системы (28), (29), (6). Добавим в закон управления (29) слагаемое

$$u = -k\alpha(p) \frac{(T_2 p + 1)^\vartheta}{(T_1 p + 1)^\vartheta} \xi_1, \quad (30)$$

где  $\vartheta = \rho_{\max} - \rho_{\min}$ . Тогда при  $\rho = \rho_{\min}$  обеспечивается устойчивость замкнутой системы (28), (29), (6) в силу результатов, опубликованных в [2–4]. При  $\rho = \rho_{\max}$  имеем

$$y(t) = \frac{b(p)(T_2 p + 1)^\vartheta}{a(p)} v(t), \quad (31)$$

$$v(t) = \frac{1}{(T_1 p + 1)^\vartheta} u(t), \quad (32)$$

где уравнение (32) представляет собой неучтенную динамику и управление можно выбирать в соответствии с уравнением (29).

При  $\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$  получаем

$$y(t) = \frac{b(p)(T_2 p + 1)^\vartheta}{a(p)(T_1 p + 1)^{\vartheta_1}} v(t), \quad (33)$$

$$v(t) = \frac{1}{(T_1 p + 1)^{\vartheta - \vartheta_1}} u(t), \quad (34)$$

где  $\rho = \vartheta_1 + \rho_{\min}$ , и уравнение (34) снова представляет собой неучтенную динамику.

Легко видеть, что системы (31), (32) и (33), (34) аналогичны объекту (3), (4) при  $w(t) = 0$ . Также легко видеть, что уравнение (4) можно рассматривать как некоторый аналог обобщенного апериодического звена  $r$ -го порядка, а число  $\mu$  является эквивалентом постоянной времени  $T_1$  апериодического звена. Теперь вновь обратим внимание на неравенства (25)–(27). Очевидно, что в случае, когда параметры  $\mu$  и  $\sigma$  можно варьировать, что, в свою очередь, для регулятора (30), (6) вполне реально, можно дать следующие рекомендации:

а) параметр  $\mu^{-1}$ , а, следовательно,  $T_1^{-1}$  должен быть больше коэффициента  $k$ ;

б) параметр  $\sigma$  должен быть больше  $\mu^{-1}$ , а, следовательно, и много больше  $T_1^{-1}$ .

На практике, как показано в [2–4], можно настраивать коэффициент  $k$  по линейному закону до тех пор, пока переменная  $y(t)$  не попадет в некоторую малую область, заданную разработчиком системы. Параметры  $T_1^{-1}$  и  $\sigma$  можно рассчитывать следующим образом:  $T_1^{-1} = k^2$  и  $\sigma = (T_1^{-1})^{2\vartheta}$ . Очевидно, что при таком расчете коэффициентов регулятора система может быть неустойчивой, но данная схема обеспечивает сходимость выходной переменной  $y(t)$  в некоторую малую область, заданную разработчиком системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00139).

### Приложение. Доказательство теоремы

Рассмотрим функцию Ляпунова

$$V = x^T P x + \eta_1^T R \eta_1 + \eta_2^T N \eta_2. \quad (\text{П.1})$$

Дифференцируя (П.1) по времени с учетом уравнений (20)–(22), получаем

$$\begin{aligned} \dot{V} = & x^T (A^T P + P A) x + 2(k + \gamma) x^T P b l^T \eta_1 - 2\gamma x^T P b u + 2x^T P b \varphi + \\ & + \mu^{-1} \eta_1^T (F^T R + R F) \eta_1 + 2\mu^{-1} \eta_1^T R q h^T \eta_2 + 2\eta_1^T R l c^T A x + 2(k + \gamma) \eta_1^T R l c^T b l^T \eta_1 \\ & + 2\eta_1^T R l c^T b \varphi - 2\gamma \eta_1^T R l c^T b u + \eta_2^T \sigma (\Gamma^T N + N \Gamma) \eta_2 + 2\eta_2^T N h c^T A x + 2(k + \gamma) \eta_2^T N h c^T b l^T \eta_1 + \\ & + 2\eta_2^T N h c^T b \varphi - 2\gamma \eta_2^T N h c^T b u, \end{aligned} \quad (\text{П.2})$$

где вместо составляющей  $\dot{y}$  было использовано слагаемое

$$\dot{y} = c^T (A x + (k + \gamma) b l^T \eta_1 + b(\varphi - \gamma u)).$$

Подставляя в (П.2) уравнения (11), (23) и (24), а также принимая во внимание соотношения

$$2x^T P b \varphi \leq \frac{1}{2} \gamma (x^T P b)^2 + 2\gamma^{-1} \varphi^2 \leq \frac{1}{2} \gamma (x^T P b)^2 + 2\gamma^{-1} \varphi_0^2,$$

$$2(k + \gamma) x^T P b l^T \eta_1 \leq \delta x^T P b b^T P x + \delta^{-1} (k + \gamma)^2 (l^T \eta_1)^2,$$

$$2\mu^{-1} \eta_1^T R q h^T \eta_2 \leq (\eta_1^T R q)^2 + \mu^{-2} (h^T \eta_2)^2,$$

$$2\eta_1^T R l c^T A x \leq \delta^{-1} (\eta_1^T R l)^2 + \delta (c^T A x)^2,$$

$$\begin{aligned}
 2(k + \gamma)\eta_1^T Rlc^T b l^T \eta_1 &\leq (k + \gamma)(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + (k + \gamma)(l^T \eta_1)^2, \\
 2\eta_2^T Nhc^T Ax &\leq \delta(c^T Ax)^2 + \delta^{-1}(\eta_2^T Nh)^2, \\
 2(k + \gamma)\eta_2^T Nhc^T b l^T \eta_1 &\leq \delta^{-1}(k + \gamma)^2(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \delta(l^T \eta_1)^2, \\
 2\eta_2^T Nhc^T b \varphi &\leq \gamma(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \gamma^{-1}\varphi_0^2, \\
 -2\gamma\eta_2^T Nhc^T b y &\leq 2\gamma(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \frac{1}{2}\gamma y^2, \\
 2\eta_1^T Rlc^T b \varphi &\leq \beta\mu^{-1}(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + \beta^{-1}\mu\varphi_0^2, \\
 -2\gamma\eta_1^T Rlc^T b y &\leq \gamma(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + \gamma y^2,
 \end{aligned}$$

где числа  $\beta > 0$  и  $\varphi_0 > 0$  таковы, что  $|\varphi(t)| \leq \varphi_0 < \infty$ , для производной от функции Ляпунова (П.1) получаем

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &\leq -x^T Q_1 x - \mu^{-1}\eta_1^T Q_2 \eta_1 - \sigma\eta_2^T Q_3 \eta_2 + \delta x^T P b b^T P x + \delta^{-1}k^2(l^T \eta_1)^2 + (\eta_1^T R q)^2 + \mu^{-2}(h^T \eta_2)^2 + \\
 &+ \delta^{-1}(\eta_1^T R l)^2 + \delta(c^T A x)^2 + (k + \gamma)(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + (k + \gamma)(l^T \eta_1)^2 + \delta(c^T A x)^2 + \delta^{-1}(\eta_2^T N h)^2 + \\
 &+ \delta^{-1}(k + \gamma)^2(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \delta(l^T \eta_1)^2 + \beta\mu^{-1}(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + 2\gamma(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \gamma(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \\
 &+ (3\gamma^{-1} + \beta^{-1}\mu)\varphi_0^2,
 \end{aligned} \tag{П.3}$$

где  $\delta > 0$  – некоторое число.

Пусть  $\delta = \delta(\mu) = \mu^\theta$  и  $0 \leq \theta < 1$ , тогда для некоторых малого  $\mu > 0$  и большого  $\gamma$  найдется положительно определенная матрица  $Q = Q^T$  такая, что

$$-x^T Q_1 x + \delta x^T P b b^T P x + 2\delta(c^T A x)^2 \leq -x^T Q x < 0. \tag{П.4}$$

Выберем число  $\sigma$  таким образом, чтобы было выполнено соотношение

$$\begin{aligned}
 -\sigma\eta_2^T Q_3 \eta_2 + \mu^{-2}(h^T \eta_2)^2 + \delta^{-1}(\eta_2^T N h)^2 + \gamma(\eta_2^T Nhc^T b)^2 + \\
 + \delta^{-1}(k + \gamma)^2(\eta_2^T Nhc^T b)^2 \leq -\eta_2^T Q \eta_2 < 0.
 \end{aligned} \tag{П.5}$$

Тогда для неравенства (П.3) получаем

$$\begin{aligned}
 \dot{V} &\leq -x^T Q x - \mu^{-1}\eta_1^T Q_2 \eta_1 - \eta_2^T Q \eta_2 + \delta^{-1}k^2(l^T \eta_1)^2 + (\eta_1^T R q)^2 + \delta^{-1}(\eta_1^T R l)^2 + \\
 &+ (k + \gamma)(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + (k + \gamma)(l^T \eta_1)^2 + \delta(l^T \eta_1)^2 + \\
 &+ \beta\mu^{-1}(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + \gamma(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + (3\gamma^{-1} + \beta^{-1}\mu)\varphi_0^2.
 \end{aligned} \tag{П.6}$$

Пусть числа  $\beta > 0$  и  $\mu > 0$  такие, что

$$\begin{aligned}
 -\mu^{-1}\eta_1^T Q_2 \eta_1 + \delta^{-1}k^2(l^T \eta_1)^2 + (\eta_1^T R q)^2 + \delta^{-1}(\eta_1^T R l)^2 + \\
 + (k + \gamma)(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + (k + \gamma)(l^T \eta_1)^2 + \delta(l^T \eta_1)^2 + \\
 + \beta\mu^{-1}(\eta_1^T Rlc^T b)^2 + \gamma(\eta_1^T Rlc^T b)^2 \leq -\eta_1^T Q \eta_1 < 0.
 \end{aligned} \tag{П.7}$$

Тогда неравенство (П.6) примет вид

$$\dot{V} \leq -x^T Q x - \eta_1^T Q \eta_1 - \eta_2^T Q \eta_2 + (3\gamma^{-1} + \beta^{-1}\mu)\varphi_0^2. \tag{П.8}$$

Из (П.8) следует сходимость переменных  $x(t)$ ,  $\eta_1(t)$  и  $\eta_2(t)$  в некоторую область, которая зависит от значений  $\varphi_0$ , а, следовательно, от амплитуды возмущающего воздействия  $w(t)$ , а также от коэффициента  $\gamma$  и параметра  $\mu$ . Очевидно, что чем меньше  $\mu$  и больше  $\gamma$ , тем меньше область, в которую попадут траектории  $x(t)$ ,  $\eta_1(t)$  и  $\eta_2(t)$ . Таким образом, для некоторых  $\gamma$  и  $\mu$  найдутся  $\varepsilon$  и  $t_1$  такие, что будет выполнено целевое условие  $|y(t)| \leq \varepsilon$  при  $\infty > t \geq t_1$ , что и требовалось доказать.

### Литература

1. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу линейными системами с неучтенной паразитной динамикой // *АиТ.* – 2009. – № 6. – С. 115–122.
2. Бобцов А.А. Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами // *АиТ.* – 2002 – №11. – С. 108–117.
3. Бобцов А.А. Алгоритм робастного управления неопределенным объектом без измерения производных регулируемой переменной // *АиТ.* – 2003 – № 8. – С. 82–95.
4. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // *АиТ.* – 2005. – № 1. – С. 118–129.
5. Дмитриев М.Г., Курина Г.А. Сингулярные возмущения в задачах управления // *АиТ.* – 2006 – № 1. – С. 3–51.

6. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб: Наука, 2000.
7. Воронов В.А. Введение в динамику сложных управляемых систем. – М.: Наука, 1985.
8. Фрадков А.Л. Синтез адаптивных систем управления нелинейными сингулярно возмущенными объектами // *АиТ*. – 1987 – № 6. – С. 100–110.
9. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
10. Ioannou P.A., Kokotovic P.V. Adaptive systems with reduced models. – *Lecture Notes on Control and Inf. Science*. V.47. Heidelberg: Springer-Verlag, 1983.
11. Saksena V.R., O'Reilly T., Kokotovic P.V. Singular perturbations and time-scale methods in control theory. *Survey 1976-1983 // Automatica*. – 1984. – № 3. – P. 273–294.
12. Гелиг А.Х., Леонов Г.А., Якубович В.А. Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия. – М.: Физматгиз, 1978.

**Бобцов Алексей Алексеевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru

**Шаветов Сергей Васильевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, r41f.814ck.h4wk@gmail.com

УДК 004.896;681.2.082;681.518.3

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**А.Г. Коробейников, Ю.А. Копытенко, В.С. Исмагилов**

Рассмотрены интеллектуальные информационные системы магнитных измерений, разработанные и применяемые в Санкт-Петербургском филиале учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН» (СПбФ ИЗМИРАН). Данные системы основаны на знаниях и представляют собой комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для решения конкретных задач в режиме диалога на естественном языке.

**Ключевые слова:** интеллектуальные информационные системы, прогноз землетрясений, навигация по магнитному полю Земли, поиск магнитных объектов.

### **Введение**

Как известно, современные интеллектуальные системы (ИС) подразделяются на два класса: системы общего назначения и специализированные [1]. Технология использования систем общего назначения состоит в следующем. Пользователь (эксперт) формирует знания (данные и правила), описывающие выбранную проблемную область. Далее на основании этих знаний, заданной цели, исходных данных и метапроцедур система генерирует и исполняет решение задачи. Данную технологию называют технологией систем, основанных на знаниях, или технологией инженерии знаний. Она позволяет специалисту, не обладающему профессиональными знаниями в области программирования, разрабатывать информационные прикладные приложения. В настоящее время инструментальными средствами общего назначения являются экспертные оболочки и языки обработки знаний [2, 3].

В общем случае все системы, основанные на знаниях, можно подразделить на системы, решающие задачи анализа, и на системы, решающие задачи синтеза. Основное отличие задач анализа от задач синтеза заключается в том, что если в задачах анализа множество решений может быть перечислено и включено в ИС, то в задачах синтеза множество решений потенциально не ограничено и строится из решений, наиболее удовлетворяющих техническому заданию.

Многие задачи, где используются данные магнитных измерений, относятся к плохо или слабо формализованным задачам. Для их решения в настоящее время широко применяются разновидности ИС – экспертные системы (ЭС) и интеллектуальные информационные системы (ИИС).

Задачи, решаемые при помощи ИИС, обычно классифицируют следующим образом: интерпретация, планирование, прогнозирование, мониторинг, проектирование, диагностика, обучение, контроль и управление.

ИИС магнитных измерений (МИ) в реальной практике учитывают специфику предметной области, и поэтому используют методы соответствующего класса. Обычно это интерпретация, прогнозирование, контроль и управление.

ИИС МИ для прогнозирования местоположения очага будущего сильного землетрясения

Наблюдения сверхнизкочастотных (СНЧ) и ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных волн ( $F=10-0,001$  Гц) в сейсмоактивных зонах проводятся в течение последних 15–20 лет, после появления высокочувствительных магнитометров. Результаты измерений в различных сейсмически активных районах Земли показали, что как на подготовительной стадии развития очаговых зон средних и сильных (магнитуда  $M>5$ ) землетрясений, так и в период афтершоковой активности на больших расстояниях от будущего эпицентра наблюдаются аномальные СНЧ электромагнитные излучения большой интенсивности. Как правило, эти эмиссии имеют шумовой характер, возникают задолго до главного сейсмического толчка и продолжаются в течение всего периода сейсмической активности.

Измерения параметров геомагнитных вариаций в одной точке на поверхности Земли не позволяют определить направление на источник вариаций. ИИС МИ позволяют решить эту задачу, используя дифференциальные методы измерений. В настоящее время одним из основных методов является фазово-градиентный метод для исследования геомагнитных пульсаций. Этот метод позволяет по трем трехкомпонентным магнитным станциям, расположенным на земной поверхности треугольником на небольшом (до 5 км) расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр), построить вектора градиентов и фазовых скоростей геомагнитных пульсаций вдоль земной поверхности для любой из трех компонент магнитного поля. При этом предполагается, что расстояние между станциями много меньше расстояния до источника геомагнитных вариаций и длины геомагнитной волны. В этом случае градиенты магнитного поля вариаций и фазовые скорости геомагнитных волн будут близки к истинным величинам. Вектора градиентов геомагнитных волн, как правило, направлены к локальному источнику пульсаций, а вектора фазовых скоростей – от источника. Если имеются данные МИ от двух магнитных градиентометров, разнесенных на расстояние примерно в 100 км, то ИИС МИ по пересечению направлений этих векторов позволяет определять местоположение источника (точнее, его проекцию на земную поверхность), т.е. проводить магнитную локацию [4].

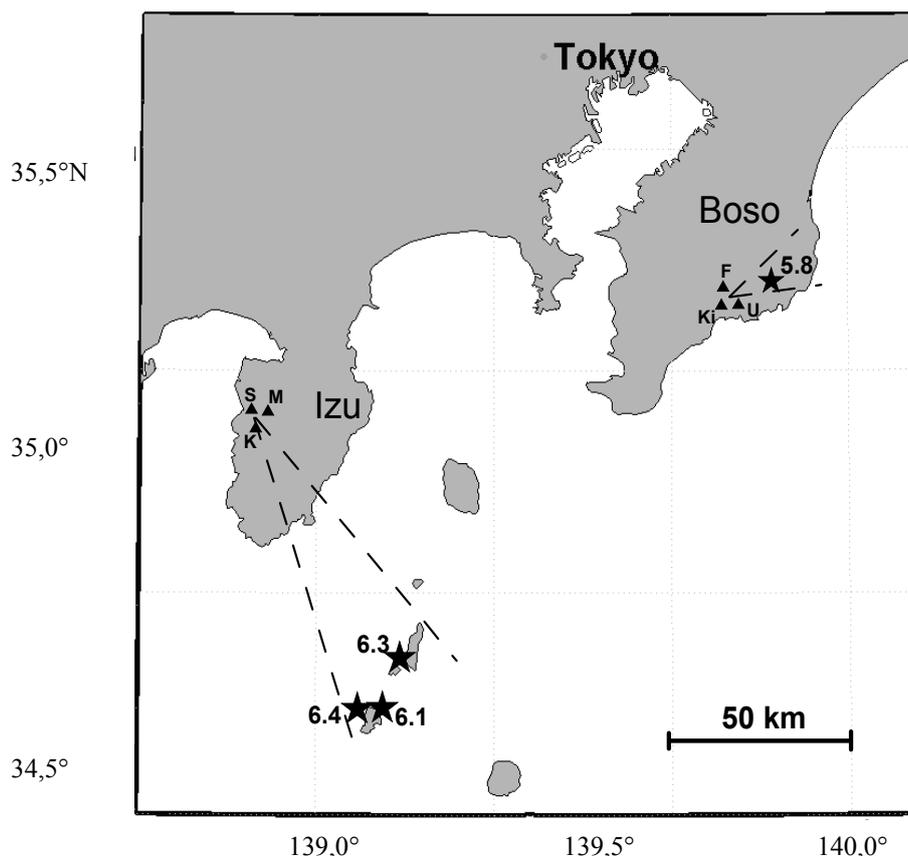


Рис. 1. Расположение магнитных станций и эпицентров сильных землетрясений в Японии. Треугольники – станции S, M, K (Сейкоши, Мочикоши, Камо) и F, Ki, U (Фудаго, Киосуи, Учиура), звездочки – эпицентры землетрясений, цифры рядом – магнитуда землетрясения

ИИС МИ в каждом конкретном случае принимает решение о нахождении градиентов и фазовых скоростей геомагнитных вариаций одним из двух способов – чисто экспериментальным путем или в рам-

ках модели плоской электромагнитной волны. В первом случае необходимо определять фазовые задержки и разности величин амплитуд вариаций между двумя любыми парами станций магнитного градиентометра, состоящего из трех разнесенных станций. Поскольку координаты магнитных станций и расстояние между ними известно, то можно определить градиенты и фазовые скорости для двух пар станций, выбранных из трех станций магнитного градиентометра, и затем построить вектор фазовой скорости и градиента пульсаций вдоль земной поверхности.

В рамках модели плоской электромагнитной волны величина фазовой скорости между двумя точками на земной поверхности определяется через амплитуды соответствующих компонент вариаций магнитного поля с учетом фазовой задержки.

Экспериментальная эксплуатация ИИС МИ для решения задач прогнозирования местоположения очагов будущих сильных землетрясений проводилась с 1998 года в Японии на полуостровах Изу и Босо, где велась регистрация вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) и теллурических токов шестью высокочувствительными цифровыми трехкомпонентными магнитными станциями MVC-3DS, разработанными в СПбФ ИЗМИРАН. На рис. 1 показано расположение магнитных станций (черные треугольники) на территории Японии. Три станции расположены на полуострове Изу (Сейкоши, Мочикоши и Камо) и три – на полуострове Босо (Фудага, Учиура и Киосуи). Дискретность регистрируемых данных составляет 50 Гц, а для синхронизации одновременной работы магнитных датчиков используется система GPS на каждой станции. В состав ИИС МИ входили две группы по три станции MVC-3DS, представляющие собой магнитный градиентометр. Станции в каждой группе располагались на расстоянии 4–7 км друг от друга. Эпицентры землетрясений показаны звездочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения, определенную по 9-балльной шкале в соответствии с классификацией Японского метеорологического агентства (JMA). Землетрясения с  $M > 6$  произошли в 2000 г., а с  $M = 5,8$  – в 2003 г.

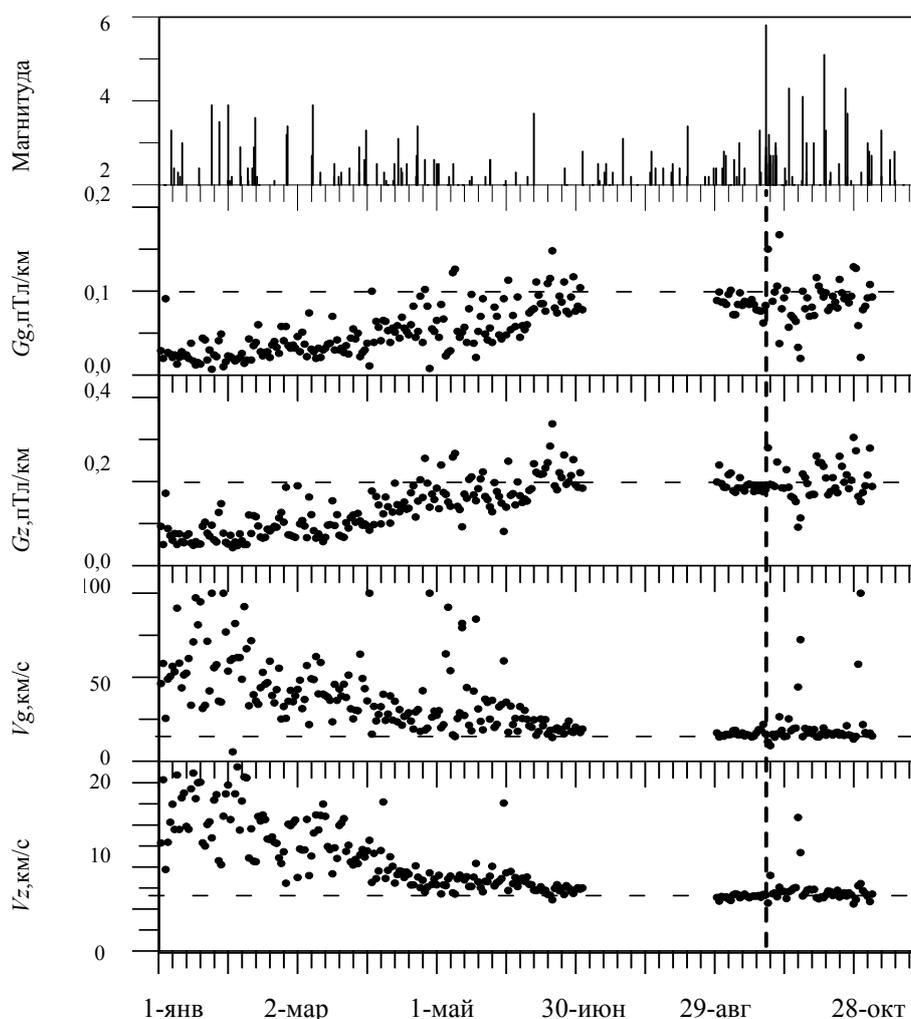


Рис. 2. Градиенты  $G_g$ ,  $G_z$  и фазовые скорости  $V_g$ ,  $V_z$  геомагнитных эмиссий ( $F=0,1-0,4$  Гц) до и после землетрясения  $M=5,8$  на полуострове Босо (Япония) в 2003 г.

Сейсмически активный период, в ходе которого произошло три землетрясения с магнитудой больше шести, начался 26.06.2000 г. и продолжался затем более трех месяцев. Самый сильный сейсмический толчок произошел 01.07.2000 г. и имел магнитуду  $M=6,4$ . Эпицентр этого землетрясения был расположен на глубине примерно 15 км под морской поверхностью на расстоянии примерно 85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещенных на полуострове Изу, и на расстоянии примерно 140 км к юго-западу от магнитных станций, расположенных на полуострове Босо (рис. 1).

Сейсмическая активность в районе полуострова Босо развивалась в течение всего 2003 года и характеризовалась большим количеством слабых и средних сейсмических толчков ( $M < 4$ ) вокруг магнитных станций, установленных здесь. Самый сильный толчок имел магнитуду 5,8 балла (по шкале JMA) и произошел 20.09.2003 г. на глубине 60 км. Эпицентр его находился примерно в 15 км к северо-востоку от станции Киосуми (рис. 1).

На рис. 2 показано полученное при помощи ИИС МИ anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей геомагнитных эмиссий в частотном диапазоне  $F=0,1-0,4$  Гц. На рисунке символы  $V_g$ ,  $V_z$ ,  $G_g$ ,  $G_z$  означают фазовые скорости и градиенты в полной горизонтальной и вертикальной компонентах МПЗ. Верхняя панель – магнитуды сейсмических толчков ( $M > 2$ ) в окрестности до 50 км от магнитных станций. Из рисунка видно, что в 2003 году на полуострове Босо примерно за полгода до момента землетрясения с магнитудой  $M=5,8$ , отмеченного на рис. 2 вертикальной пунктирной линией, градиенты в полной горизонтальной и в вертикальной компонентах МПЗ начинают возрастать и достигают своего максимума за 2–3 месяца до землетрясения. В это же время фазовые скорости уменьшаются, и минимальные значения наблюдаются перед землетрясением.

Такое же, но менее выраженное anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей наблюдается также и в более низкочастотном диапазоне СНЧ геомагнитных возмущений ( $F < 0,1$  Гц). К сожалению, данные за июль и август 2003 г. на одной из магнитных станций отсутствуют, что не позволяет построить вектора градиентов и фазовых скоростей.

Таким образом, представленные результаты показывают, что применение ИИС МИ позволяют определять местоположение источника будущего сильного землетрясения, т.е. давать краткосрочный прогноз сильного землетрясения.

### **ИИС МИ в навигационных системах беспилотных летательных аппаратов**

В настоящее время в России и за рубежом растет интерес к использованию ИИС МИ для построения систем автономной магнитной навигации (САМН) по МПЗ для различных типов летательных аппаратов (ЛА), таких как самолетов, космических аппаратов (КА) и беспилотных летательных аппаратов (БЛА) на малых высотах [5, 6].

Это обусловлено преимуществами САМН: высокой автономностью, помехозащищенностью и точностью, малым весом и потреблением электроэнергии, малыми габаритами, возможностью функционирования в любых метеоусловиях и в любое время суток. Кроме того, эта система практически не накладывает ограничений на угловые эволюции БЛА в процессе полета. Помимо этого, использование САМН, особенно на борту БЛА, предназначенных для полета на малых высотах, позволяет увеличивать точность навигационного обеспечения БЛА при проведении измерений МПЗ с уменьшением высоты его полета в соответствии с известным свойством МПЗ, и особенно anomального МПЗ (АМПЗ) – повышением его информативности в связи с уменьшением расстояния до ферромагнитных источников при использовании больших градиентов АМПЗ.

Многие из вышеперечисленных преимуществ САМН обусловлены достоинствами существующих и разрабатываемых в настоящее время магнитометров, в частности, на основе магниторезистивных датчиков (МРД).

Для повышения эффективности обеспечения БЛА целесообразно использовать САМН в сочетании с инерциальной системой навигации (ИСН).

ИИС МИ, находящаяся на борту БЛА, производит сравнение измеренных  $X_i$  и модельных значений  $X_p$  параметров АМПЗ, определяемых на основе бортовой магнитной карты (МК) заданного района. После этого ИИС МИ определяет вектор поправок состояния параметров движения БЛА –  $\Delta X$ . С помощью этого вектора производится коррекция расчетного вектора состояния  $X_p$ , определяемого ИСН или скоростной системой счисления пути. Кроме этого, ИИС МИ, на основе данных от ИСН, обеспечивает навигацию БЛА и выполнение его основных задач в аварийных ситуациях – например, при отказе МРД, переходя в режим «памяти», а также используя его при больших естественных и искусственных возмущениях МПЗ, особенно при движении по маршрутам, проходящим по мерным участкам, где АМПЗ малоинформативно, т.е. его градиенты характеризуются малыми величинами.

ИИС МИ при решении задачи определения параметров движения БЛА, помимо использования измерений АМПЗ, также привлекает дополнительную информацию в виде измерений магнитных полей ферромагнитных объектов, находящихся на маршрутах полетов БЛА, например, железнодорожных мос-

тов, рельсовых путей, трубопроводов, линий электропередачи и т.д. При этом магнитные поля этих объектов должны быть занесены в МК заданного района.

Известные в настоящее время ИИС МИ, использующие абсолютные измерения и градиентный принцип формирования приращений измерений АМПЗ, в полной мере не учитывают длиннопериодные составляющие ошибок основных возмущающих факторов – вариаций МПЗ, магнитных бурь, собственных магнитных полей БЛА, ошибок построения МК (моделей МПЗ), ошибок МРД. Эти неточности учета возмущений, особенно вариаций МПЗ в период магнитных бурь, могут приводить к значительным, а в ряде случаев и к недопустимо большим ошибкам. В результате анализа основных возмущающих факторов выявлено, что длиннопериодные составляющие ошибки магнитометрических измерений имеют в большинстве случаев большую амплитуду по сравнению с высокочастотными составляющими.

Эта закономерность, т.е. существенно большее отрицательное влияние длиннопериодных возмущений на точностные характеристики САМН, относится не только к вариациям МПЗ, но и к помехам, создаваемым собственными магнитными полями БЛА, ошибкам построения магнитных карт, а также погрешностям магнитометрической аппаратуры, магниторезистивных датчиков.

Для уменьшения отрицательного влияния возмущающих факторов, как долгопериодических, так и высокочастотных составляющих, на точностные параметры САМН необходимо использовать в ИИС МИ адаптивные статистические методы линейного и нелинейного оценивания вектора состояния.

Адаптивные методы оценивания разработаны в СПбФ ИЗМИРАН на основе способа формирования взвешенных приращений параметров АМПЗ и усовершенствованных статистических методов линейного и нелинейного оценивания вектора состояния, которые, в частности, осуществляют осреднение высокочастотных составляющих ошибок измерений.

### **ИИС МИ для поиска стационарных магнитных объектов, находящихся под водой**

Для поисковых работ по обнаружению стационарных магнитных объектов, находящихся под водой, или магнитной съемки акватории моря для построения карт распределения пространственных вариаций градиентов магнитного поля также применяются ИИС МИ.

Основной особенностью ИИС МИ, разработанной в СПбФ ИЗМИРАН, является нахождение магнитных чувствительных элементов (магнитометров) на борту носителя (судна). В состав такой ИИС МИ входят мобильные автоматизированные градиентометрические установки (АГУ), состоящие из двух пространственно разнесенных высокочувствительных цифровых трехкомпонентных магнитовариационных станций GI-MTS-1, изготовленные в СПбФ ИЗМИРАН. Высокая чувствительность магнитометров комплекса GI-MTS-1 позволяет проводить высокоточный мониторинг вариаций УНЧ электромагнитных и сейсмических полей с целью изучения динамики источников УНЧ возмущений ионосферного, литосферного и техногенного происхождения.

Измеренные вариации магнитного поля включают в себя естественные вариации ионосферного происхождения, поле локальной магнитной аномалии (если оно существует), помехи, возникающие вследствие вибраций и индуктирования токов в электропроводящих элементах носителя, и вариации, возникающие при качке вследствие изменения ориентации магнитных датчиков. Естественные вариации ионосферного происхождения в районе работ в дневные часы в диапазоне частот  $F=0,5-0,1$  Гц обычно имеют малую амплитуду ( $<0,2$  нТл) и могут быть проигнорированы. Помехи, возникающие вследствие вибраций при движении носителя, имеют частоты выше 1 Гц и частично подавляются виброгасящими основаниями под датчиками, а частично – цифровой фильтрацией.

Наибольший вклад в помеху измерений вариаций МПЗ вносит изменение ориентации магнитных датчиков вследствие изменения курса, бортовой и килевой качки. Например, величина вертикальной компоненты МПЗ на широте Санкт-Петербурга составляет примерно 50000 нТл. Отклонение от вертикальной оси на  $1^\circ$  при качке приводит к появлению в горизонтальных компонентах квазисинусоидального сигнала с частотой качки и амплитудой  $\sim 1000$  нТл ( $\sin 1^\circ \times 50000 \approx 1000$ ). Проблема для этого типа помехи решается с помощью дифференциальных измерений на малой базе разнеса датчиков (2–6 м). Оба блока разнесенных магнитных датчиков жестко связаны с носителем. Поэтому изменения ориентации носовых и кормовых магнитных датчиков происходят одинаковым образом и синхронно, вследствие чего помеха от качки при вычислении разности соответствующих компонент магнитного поля (дифференцировании) исчезает. Угловыми перекосами, возникающими вследствие скручивания носителя вокруг продольной оси, при малой базе разнеса также можно пренебречь. Сигнал же от источника магнитной аномалии остается, так как кормовые датчики регистрируют поле источника с задержкой относительно носового. Градиент вариаций магнитного поля находится путем деления разности сигналов двух разнесенных датчиков на расстояние между ними.

Для проверки методики измерений и работоспособности градиентных установок на глубине 10 м была затоплена мишень (верхняя часть бакена весом около 200 кг). АГУ были установлены внутри малого гидрографического катера (МГК) с разнесом магнитных датчиков 4 м вдоль диаметральной плоскости

катера. МГК в течение 2 дней выполнил 50 галсов в районе расположения мишени. После обработки зарегистрированных вариаций МПЗ построена карта двумерного распределения дифференциальных величин вариаций компонент МПЗ.

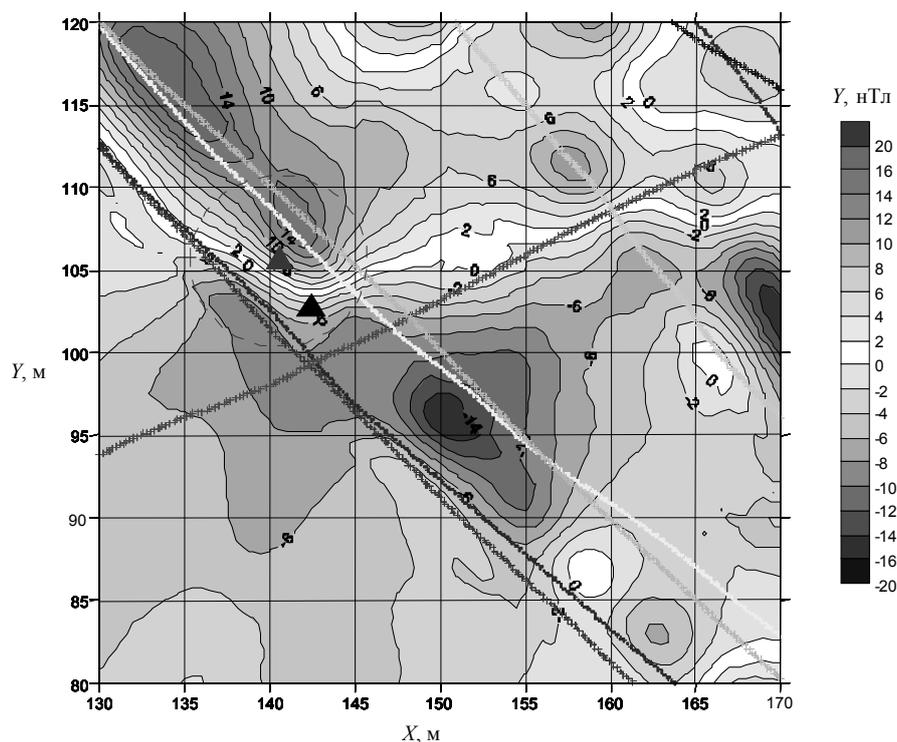


Рис. 3. Пространственное распределение Y компоненты градиента магнитного поля в районе мишени

На рис. 3 различными оттенками серого цвета и изолиниями показано распределение дифференциальных величин вариаций Y компоненты поля на площадке  $40 \times 40 \text{ м}^2$ . Линиями на рисунке нанесены треки движения МГК. Серым треугольником на рисунке отмечено положение мишени, черным треугольником – положение мишени по распределению градиентов магнитного поля. Погрешность в определении местоположения мишени составляет 4 м. Поскольку для определения координат МГК использовался входящий в состав ИИС МИ недифференциальный приемник GPS со среднеквадратичной погрешностью 8 м, то результаты тестирования методики измерений и аппаратуры можно считать успешными.

### Заключение

Применение ИИС МИ позволяет эффективно решать различные задачи. В данной работе рассмотрены применения этих систем для решения трех задач. Дальнейшее развитие ИИС МИ предполагается проводить в нескольких направлениях: модификация и разработка математического, лингвистического, программного и технического обеспечения. Например, в задаче поиска стационарных магнитных объектов, находящихся под водой, дополнительное введение в состав ИИС МИ системы косвенной стабилизации позволит повысить на порядок способность системы к обнаружению намагниченных объектов.

### Литература

1. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб: Питер, 2000. – 384 с.
2. Попов Э.В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
3. Корнеев В.В., Гараев А.Ф., Васютин С.В., Райх В.В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации. – М.: Нолидж, 2001. – 352 с.
4. Копытенко Ю.А., Исмагилов В.С., Копытенко Е.А., Воронов П.М., Зайцев Д.Б. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений // ДАН. Серия «Геофизика». – 2000. – Т. 371. – № 5. – С. 685–687.

5. Табачук И., Ташкев Л. Угроза с предельно малых высот // Воздушно-космическая оборона. – 2007. – № 1 (32). – С. 50–57.
6. Лебедев Д.В., Ткаченко А.И. Магнитометрическая система определения параметров движения космического аппарата // Проблемы управления и информатики. – 1997. – № 4. – С. 139–154.

- Коробейников Анатолий Григорьевич** – Санкт-Петербургский филиал учреждения РАН «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова», доктор технических наук, профессор, директор по науке, Kogobeynikov\_A\_G@mail.ru
- Копытенко Юрий Анатольевич** – Санкт-Петербургский филиал учреждения РАН «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова», доктор физ.-мат. наук, профессор, директор, office@izmiran.spb.ru
- Исмаилов Валерий Сарварович** – Санкт-Петербургский филиал учреждения РАН «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова», кандидат физ.-мат. наук, вед. научн. сотр., IVS@izmiran.spb.ru

УДК 517.938

## МНОГОЧАСТИЧНЫЕ СОСТОЯНИЯ В ИСКРИВЛЕННЫХ СЛОИСТЫХ НАНОСТРУКТУРАХ

**М.И. Гаврилов, И.Ю. Попов, С.И. Попов**

Рассмотрена многочастичная задача в искривленном квантовом волноводе (слое). Описан метод оценки сдвига двухчастичного уровня в искривлении по отношению к одночастичному.

**Ключевые слова:** слой, наноструктура, волновод, водород, частица, собственная функция.

### Введение

Известно, что искривленные квантовые слои способны удерживать частицы. Это связано с тем, что соответствующий гамильтониан имеет непустой дискретный спектр. При этом увеличение кривизны ведет к увеличению мощности множества точек дискретного спектра. Вопрос о количестве частиц, которые могут быть удержаны в искривлении волновода (слоя) или его границы, важен для многих физических приложений. В частности, для реализации двухкубитовой операции в квантовом компьютере на связанных волноводах необходимо удержание в некоторой области двух электронов в течение времени выполнения операции. Другое возможное применение связано с проблемой хранения водорода в нанослоистых структурах. Факт наличия связанных состояний в искривленных наноструктурах может быть использован для увеличения количества водорода, хранящегося в межслоевом пространстве. При этом количество связанных состояний зависит от кривизны. Заметим, что гамильтониан плоского бесконечного слоя не имеет связанных состояний.

### Оценка числа связанных состояний

Будем действовать аналогично [1]. Чтобы оценить количество нейтральных частиц (фермионов), которые могут находиться в связанном состоянии в окрестности искривленной части слоя, достаточно найти размерность подпространства дискретного спектра для одночастичного гамильтониана и воспользоваться принципом Паули. Если слой переходит в себя при сдвиге вдоль одной из осей, то задача сводится к двумерной (задача об искривленной полосе). Рассмотрим именно этот случай. Пусть  $\Sigma$  – полоса в  $\mathbb{R}^2$  постоянной ширины  $d = 2a$ . Пусть  $\Gamma$  – ось  $\Sigma$ . С точностью до евклидова преобразования полоса однозначно задается полушириной  $a$  и кривизной  $s \rightarrow \gamma(s)$ , заданной на  $\Gamma$ , где  $s$  – длина кривой. Будем предполагать, что выполнены следующие условия регулярности а)  $\Sigma$  несамопересекающаяся; б)  $a\|\gamma\|_\infty < 1$ , в)  $\gamma$  финитна и  $\gamma \in C^2$ ,  $\gamma', \gamma''$  – ограничены.

Пусть  $\hbar = 2m = 1$ . Используя естественные ортогональные координаты  $(s, u)$  в  $\Sigma$ , сводим одночастичный гамильтониан к оператору

$$H = -\partial_s (1 + u\gamma)^{-2} \partial_s - \partial_u^2 + V(s, u)$$

на  $L^2(\mathbb{R} \times (-a, a))$  с потенциалом

$$V(s, u) = -\frac{\gamma(s)^2}{4(1 + u\gamma(s))^2} + \frac{u\gamma''(s)}{2(1 + u\gamma(s))^3} - \frac{5u\gamma''(s)^2}{4(1 + u\gamma(s))^4},$$

который определен и существенно самосопряжен на  $D(H) = \{ f : f \in C^\infty, f(s, \pm a) = 0, Hf \in L^2 \}$ . Представляя оператор в виде разложения по модам, сводим задачу к одномерной [2–4]. Здесь используем оценки Бирмана–Швингера. Мажорируем потенциал  $V$ :

$$W = \frac{\gamma(s)^2}{4\delta_-^2} + c \frac{a|\gamma''(s)|}{2\delta_-^3} + \frac{5a^2\gamma''(s)^2}{4\delta_-^4}, \quad \delta_\pm = 1 \pm a\|\gamma_\infty\|.$$

Пусть для  $j = 2, 3, \dots$

$$W_j(s) = \begin{cases} 0, & \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2(j^2 - 1) > \|W\|_\infty, \\ W(s), & \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2(j^2 - 1) \leq \|W\|_\infty. \end{cases}$$

Тогда количество  $N$  нейтральных частиц с полужелыми спинами  $S$ , которые могут быть удержаны в связанном состоянии в окрестности искривления слоя, оценивается [1] следующим образом:

$$N \leq (2S+1) \left( 1 + \delta_+^2 \frac{\int_{\mathbb{R}^2} W(s)|s-t|W(t)dsdt}{\int_{\mathbb{R}} W(s)ds} + \sum_{j=2}^{\infty} \delta_+^2 \int_{\mathbb{R}} W_j(s)ds \right).$$

Здесь границы слоя предполагались непроницаемыми (граничное условие Дирихле). В рамках такого же подхода можно анализировать и другие условия. В частности, полупрозрачную границу можно рассматривать как дельта-потенциал, сосредоточенный на кривой (см., например, [5]).

В случае заряженных частиц (протонов) необходимо учитывать их взаимодействие друг с другом (отталкивание). При этом возможна ситуация, когда дискретный спектр оказывается пуст. А именно,  $N$ -частичный гамильтониан данной системы имеет пустой дискретный спектр, если

$$T_\beta(N) + \frac{e^2 N(N-1)}{2\beta\sqrt{7}} \geq \|W\|_\infty N + \left(\frac{\pi}{2a}\right)^2 N + \frac{e^2}{18\beta\sqrt{2}}$$

для некоторого  $\beta \geq \max\{2b, 596e^{-2}\}$ , где  $2b$  – диаметр носителя функции  $\gamma$ ;  $e$  – заряд частицы,

$$T_\beta(N) = \begin{cases} 2\sum_{m=1}^n \lambda_m, & N = 2n, \\ 2\sum_{m=1}^n \lambda_m + \lambda_n, & N = 2n+1, \end{cases}$$

$\lambda_m$  – упорядоченные собственные значения лапласиана Дирихле для области

$$\left[-\frac{3}{2}\beta\delta_+, \frac{3}{2}\beta\delta_+\right] \times [-a, a].$$

### Двухчастичная задача в волноводе с искажением границы

Задачу о двух взаимодействующих частицах в двумерном волноводе с искажением границы будем решать методом Хартри. Соответствующая одночастичная задача рассмотрена в [6] в рамках вариационного подхода. Рассматриваемая область задается следующим образом:

$$\Omega = \{(x, y) \in R^2 : 0 < y < a(1 + \lambda f(x))\}, \quad \text{supp } f = [-b, b], \quad f \in C_0^\infty(R).$$

Пробную функцию, которую можно считать приближением собственной функции, находим в виде

$$\Psi = \begin{cases} (1 + \lambda\eta f(x))\chi_1(y), & |x| \leq b, \\ e^{-\eta|x \mp b|}\chi_1(y), & \pm x > b. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь

$$z = \frac{\pi^2 \|f\|^2}{a^2 \|f'\|^2},$$

$\eta$  выбираем из условия  $\eta^2 - 2\eta z + 3z + K^2 < 0$ ,  $K = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{2n}{n^2 - 1}\right)} = \sqrt{\frac{\pi^2}{3} + \frac{1}{4}}$ , которое может быть выполнено, если  $z^2 - 3z - K^2 > 0$ , в частности, при выполнении этого условия можно взять  $\eta = z$ , что соответствует минимуму параболы

$$\chi_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{\pi n y}{a},$$

$$h = \frac{1}{2} \lambda^2 d_1 \|f\|^2, \quad d_1 = \frac{\pi^2}{a^2 z} (z^2 - 3z - K^2).$$

Оценка расстояния связанного состояния от границы непрерывного спектра дается неравенствами

$$-\lambda^4 d_0^2 \|f\|^4 + O(\lambda^5) \leq E - \frac{\pi^2}{a^2} \leq -\frac{1}{4} \lambda^4 d_1^2 \|f\|^4 + O(\lambda^5),$$

$$d_0 = \left( \frac{4\pi b}{a^2} \right)^2 - 3 \frac{\pi^2}{a^2}.$$

Решение соответствующей двухчастичной задачи ищем методом самосогласованного поля в виде

$$\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \Psi_1(\mathbf{r}_1) \Psi_2(\mathbf{r}_2), \quad (2)$$

где  $\Psi_1$  – одночастичная функция,  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  – радиус-векторы частиц. Предполагается, что в невозмущенном состоянии (без взаимодействия) обе частицы находятся в одинаковом состоянии, приближение для которого описано выше. Для определения функции  $\Psi_1$  метод Хартри приводит к уравнению

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi_1(\mathbf{r}_1) + U(\mathbf{r}_1) \Psi_1(\mathbf{r}_1) = E_1 \Psi_1(\mathbf{r}_1), \quad (3)$$

$$U(\mathbf{r}_1) = \int_{\Omega} |\Psi_1(\mathbf{r}_2)|^2 \frac{e^2}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} dV_2. \quad (4)$$

Алгоритм решения таков. В качестве нулевого приближения выбираем построенное приближение для одночастичной собственной функции, подставляем его в (4) и решаем задачу (3) с полученным потенциалом. Найденное решение подставляем в (3) и повторяем процедуру. Выполнение алгоритма продолжаем до тех пор, пока с выбранной точностью значения  $E_1$  на последовательных шагах не начнут повторяться.

### Заключение

Предложен способ оценки количества частиц, которые могут удерживаться искривлением границы волновода. В частности, для волновода с локальным искажением границы предложена методика оценки сдвига двухчастичного по отношению к одночастичному. Отталкивание частиц приводит к повышению уровня. Если же двухчастичный уровень будет выше границы непрерывного спектра, то это означает, что две частицы не могут быть удержаны данным искривлением. Параметры сдвига уровня зависят от характеристик искривления границы.

### Литература

1. Exner P., Vugalter S.A. On the number of particles that a curved quantum waveguide can bind // J. Math. Phys. – 1999. – V. 40. – P. 4630–4638.
2. Seto N. Bargmann's inequalities in spaces of arbitrary dimension // Publ. RIMS. – 1974. – V. 9. – P. 429–461.
3. Klaus M. On the bound state of Schrodinger operators in one dimension // Ann. Phys (Leipzig). – 1977. – V. 108. – P. 288–300.
4. Newton R.G. Bounds for the number of bound states for Schrodinger equation in one and two dimensions // J. Operator Theory. – 1983. – V. 10. – P. 119–125.
5. Лобанов И.С., Лоторейчик В.Ю., Попов И.Ю. Оценка снизу спектра двумерного оператора Шредингера с  $\delta$ -потенциалом на кривой // ТМФ. – 2010. – Т. 162 (3). – С. 397–407.
6. Exner P., Vugalter S.A. Bound states in a locally deformed waveguide: critical case // Lett. Math. Phys. – 1997. – V. 39. – P. 59–68.

**Гаврилов Максим Иванович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, maxim.gavrilov@gmail.com

**Попов Игорь Юрьевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, popov@mail.ifmo.ru

**Попов Сергей Игоревич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Serezha.popov@gmail.com

УДК 65.011.56:621.9

## ПОРТФЕЛЬ ЗАКАЗОВ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

С.А. Гнездилова

Правильно сбалансированный портфель заказов ведет к успешному развитию предприятия и способствует выполнению поставленных заказчиком сроков. Для формирования портфеля заказов виртуального предприятия инструментального производства предлагается использование экспертной системы. Главным критерием для формирования портфеля заказов выступает временной коэффициент выполнения заказов.

**Ключевые слова:** инструментальное производство, экспертная система, портфель заказов, время выполнения заказа, себестоимость пресс-формы.

## Введение

В современной бизнес-среде существует множество виртуальных предприятий. Новый взгляд на виртуальные предприятия – виртуальное предприятие инструментального производства. Это производство внутри производства. Данная структура предприятия, как и любое другое предприятие, имеет свой портфель заказов. По портфелю заказов можно судить о производственных мощностях предприятия, его интеллектуальных и физических ресурсах, экономическом положении на рынке. Подбор сторонних заказов, наряду с собственными, осуществляется для полной загрузки производственных мощностей инструментального производства. Правильно сбалансированный портфель заказов ведет к успешному развитию предприятия.

## Описание существующих методик

Сейчас на предприятиях подбор заказов осуществляют специальные службы. С помощью различных методик они должны просчитать возможность или невозможность выполнения нового заказа. Специалисты должны владеть полной информацией о состоянии выполняемых на текущий момент заказов, состоянии складов с материалом, работе оборудования и т.п. Коллективу специалистов сложно охватить результаты работы всех подразделений предприятия и просчитать все варианты, которые могут возникнуть при выполнении нового заказа. Необходимо также учесть, что, к сожалению, в российской промышленности часто отсутствует понятие слаженной работы в коллективе. Каждое подразделение стремится доказать свою значимость, выделиться на фоне остальных, и зачастую отсутствует желание помочь другим подразделениям в достижении общей цели предприятия. В итоге, даже при создании общего для пользования ресурса, каждое подразделение будет стараться преградить доступ к нему остальных. Часто возникают конфликты между, например, отделом продаж и финансовой службой за первенство в принятии решения в компании. Пользуясь возможностью оперативного доступа к информации и о продажах, и об оплате (и о состоянии склада), два конкурирующих руководителя стремятся доказать свой приоритет в принятии решений. Также существует проблема различной интерпретации данных либо в разных подразделениях предприятия, либо разными системами. Кроме чисто технической проблемы согласования, здесь есть проблема привычки и удобства использования специфической терминологии и классификации данных в различных подразделениях, которая кажется несущественной только на первый взгляд. Реально же персоналу нужны дополнительные усилия, чтобы освоить непривычную и нередко неудобную в практической деятельности терминологию. Например, часто один и тот же материал именуется по-разному в закупках, финансах, на складе и производстве. И это не прихоть соответствующих подразделений, а объективная ситуация, вызываемая особенностями бизнес-процессов предприятия и порядком взаимодействия с контрагентами. Еще хуже, когда, кроме наименования, у материала используются различные единицы измерения, пересчет между которыми затруднен [1]. В связи с этим, чтобы убрать нежелательный человеческий фактор, лучше все доверить программной системе. В качестве такого программного обеспечения автор статьи предлагает использование экспертной системы (ЭС).

## Описание новой методики

При формировании портфеля заказов ЭС необходимо решить следующие задачи:

- технико-экономический анализ заказа (анализ интеллектуальных и физических ресурсов предприятия);
- установление очередности выполнения заказов;
- включение незапланированных работ;
- сокращение потерь при выполнении заказа.

Главным критерием при формировании портфеля заказов выступает временной коэффициент выполнения заказа, включающий в себя время на проектирование и изготовление оснастки. Поступающие на предприятие заказы хранятся в базе данных. ЭС должна на основе экспертных оценок изготовления заказов сформировать зависимости и поправочные коэффициенты, позволяющие достаточно точно определить время выполнения новых заказов. После определения времени, требуемого на выполнение, система должна произвести анализ базы с заказами и включить заказы в график уже существующих, с учетом наличия материала для изготовления на складе, или произвести корректировку времени с учетом закупки необходимого материала.

ЭС при рассмотрении нового заказа должна определить операционную прибыль предприятия от выполнения нового заказа. Расчет операционной прибыли от нового заказа очень важен для успешного развития предприятия. Может возникнуть ситуация, когда для выполнения нового заказа необходимо произвести закупку нового оборудования и обучить персонал для работы на нем. Но все это может быть оправданными затратами, если на предприятие поступает заказ на очень большую партию изделий. Иначе говоря, ЭС должна производить периодический пересмотр состава портфеля заказов в плане анализа потребителей, анализа продукции и цен конкурентов, анализ собственных производственных возможностей и т.п. При этом одним из важнейших действий является анализ эффективности уже существующих в портфеле предприятия заказов. От того, насколько тщательно, оперативно проводится анализ заказов в портфеле, насколько достоверны используемые в анализе данные, зависит будущий финансовый результат работы всего предприятия. Целью портфельного анализа является распределение финансовых ресурсов между подразделениями предприятия [2].

Математическое описание формулы времени выполнения заказа, по которой ЭС будет определять возможность выполнения нового заказа, выглядит следующим образом:

$$T_3 = T_{\Pi} + T_c + T_{\text{и}} + T_{\text{к}},$$

где  $T_{\Pi}$  – время, затраченное на проектирование оснастки;  $T_c$  – время, затраченное на поиск необходимого для изготовления оснастки материала;  $T_{\text{и}}$  – время, необходимое для изготовления оснастки;  $T_{\text{к}}$  – время, отведенное на испытание и контроль оснастки. Реальная величина времени заказа рассчитывается как

$$T_{\text{зр}} = \frac{T_3}{0,8} = 1,2 \cdot T_3,$$

где 0,8 – коэффициент, отводимый на брак или 20% – технологически неизбежные потери деталей и узлов. Производственные цеха самостоятельно учитывают технологические потери при планировании трудовых и материальных затрат в цехе. Технологические потери сверх установленных норм должны квалифицироваться как несоответствующая продукция. Например, на операции, выполняемые на станках с ЧПУ, отводится 5%, на особо сложные операции на станках с ЧПУ – 10%, операции литья – 10%, особо сложные и ответственные случаи – 20%. Нормы потерь должны устанавливаться по каждому цеху и в целом по предприятию на основании проверки соблюдения технологических процессов на нескольких партиях изделий в производстве.

При поступлении заказа на предприятие ЭС необходимо произвести расчет себестоимости, заказываемых штампов и пресс-форм. К основным составляющим себестоимости штампов и пресс-форм относятся:

- сырье и материалы –  $C_{\text{м}}$ ;
- услуги кооперированных предприятий (покупка блоков, плит и т.п.) –  $C_{\text{к}}$ ;
- топливо и энергия на технологические цели –  $C_{\text{э}}$ ;
- основная и дополнительная зарплата производственных рабочих; отчисления на социальное страхование от зарплат производственных рабочих –  $C_{\text{з/п}}$ ;
- износ оснастки второго порядка –  $C_{\text{и}}$ ;
- расходы по содержанию и эксплуатации оборудования –  $C_{\text{об}}$ ;
- цеховые расходы –  $C_{\text{рц}}$ ;
- общезаводские расходы –  $C_{\text{рз}}$ ;
- потери от брака, прочие производственные и внепроизводственные расходы –  $C_{\text{б}}$ .

В состав затрат на сырье и материалы включается стоимость основных материалов, включая в том числе все расходы на их приобретение и доставку до складов предприятия-потребителя сторонним транспортом, а также организацию его хранения. Если доставка производится собственными силами предприятия-потребителя, то затраты на нее относят к соответствующей статье затрат на производство. То же касается и энергии: если она поступает со стороны и за нее производится оплата, затраты на энергию включаются в статью «топливо и энергия на технологические цели». Если же энергия производится силами и средствами предприятия-потребителя, то соответствующие затраты относятся к затратам на производство.

В итоге формула себестоимости пресс-формы есть функция от основных коэффициентов, составляющих себестоимость:

$$C = \eta(C_M + C_K + C_3 + C_{3/п} + C_И + C_{об} + C_{рц} + C_{рз} + C_6).$$

На любом предприятии, в частном случае – на виртуальном предприятии инструментального производства, необходимо проводить анализ имеющегося на складе материала и стандартных изделий для пресс-форм. Заложенная в систему информация о складах позволяет сократить сроки на приобретение необходимого материала и время на изготовление деталей пресс-формы. Также нельзя забывать об эффективности эксплуатации различных моделей оборудования одинакового назначения. Экспертная система должна отслеживать загруженность оборудования и равномерно распределять выполнение работ во избежание простоя и быстрого выполнения заказа.

### **Заключение**

Использование ЭС при формировании портфеля заказов позволяет избежать риска невыполнения поставленных заказчиком сроков и увеличить прибыль предприятия. Анализ всех заказов виртуального предприятия инструментального производства позволяет выявить стратегические «окна» в хозяйственном портфеле и дать стратегические рекомендации для деятельности инструментального производства.

### **Литература**

1. Колесников С. Тонкости интеграции // Открытые системы. – № 10. – 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2009/10/11180438>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 31.03.2010).
2. Силаков А.В., Иващенко Н.С. Выбор структуры товарного портфеля предприятия на основе анализа его сбалансированности // Маркетинг в России и за рубежом. – № 6. – 2004 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dis.ru/static/magaz/market/index.html>, свободный, яз. рус. (дата обращения 31.03.2010).

*Гнездилова Светлана* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [gnsvetlana@yandex.ru](mailto:gnsvetlana@yandex.ru)

**УДК 67.02: 65.011.56**

## **СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СБОРОЧНОЙ ЛИНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ DELMIA**

**Е.Е. Алёшина, А.А. Саломатина, Е.И. Яблочников**

Рассматривается построение имитационной модели сборочной линии. Показана важность разработки функциональной модели и дальнейшего ее использования для создания имитационной модели. Приведены основные преимущества системы Delmia. Описывается дальнейшее использование имитационной модели для постановки компьютерных экспериментов по имитации работы реальной линии сборки.

**Ключевые слова:** имитационная модель, имитационное моделирование, функциональная модель, Delmia.

### **Введение**

Современные производственные системы отличаются сложной структурой потоков (множество последовательно-параллельных технологических этапов, наличие разнообразного оборудования, многообразие видов продукции и т.д.). Любой производственный процесс характеризуется наличием множества случайных составляющих – время обработки единицы продукции, длительность безотказной работы агрегатов и механизмов, время простоев и восстановительных работ и т.д. В связи с этим при моделировании сложных производств возникает необходимость рассматривать статистические модели систем разных классов. Для повышения эффективности управления предприятиями, работающими в условиях воздействия случайных факторов, необходимо применять соответствующие математические и инструментальные методы [1].

### **Построение модели производственной системы**

При построении моделей процессов, происходящих в сложных производственных системах, при описании их структуры, оценке эффективности и оптимизации этих систем используются различные аналитические и имитационные схемы математического моделирования. Построение аналитической мо-

дели функционирования производства является очень трудоемким процессом. Выходом в данной ситуации является метод имитационного моделирования, основанный на моделирующих алгоритмах, которые строятся с использованием различных стандартов и включают в себя обобщенные методы исследования систем. Суть имитационного моделирования заключается в воспроизведении поведения исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами, т.е. в разработке симулятора исследуемой предметной области для проведения различных экспериментов – другими словами, в представлении реальной системы цифровой моделью и моделировании на ней процесса функционирования реальной системы [2].

В качестве реальной системы для построения имитационной модели выступает автоматизированная линия сборки микрообъектива, состав и структура которой описаны в [3]. В отличие от предложенной централизованной схемы управления линией в данной работе рассматривается децентрализованная система управления, входящей информацией для которой являются показания RFID-датчиков. Имитационная модель строилась для анализа функционирования одной зоны – зоны измерений и сборки узлов.

### Функциональная модель

Построение имитационной модели начинается с создания функциональной модели (модели процесса), которая позволяет описать технологический процесс и подробно рассмотреть конкретные операции [4]. Разработка функциональной модели технологического процесса сборки микрообъектива (рисунков) выполнялась для операции измерения и комплектации и велась с учетом применения системы радиочастотной идентификации. Технологический процесс начинается с измерения оптических и механических деталей (линз, оправ). В процессе измерения происходит идентификация и регистрация (расстановка меток) деталей, формируется база данных, заполняются и регистрируются паллеты. После операции измерения паллеты с линзами и оправками поступают на станцию комплектации.

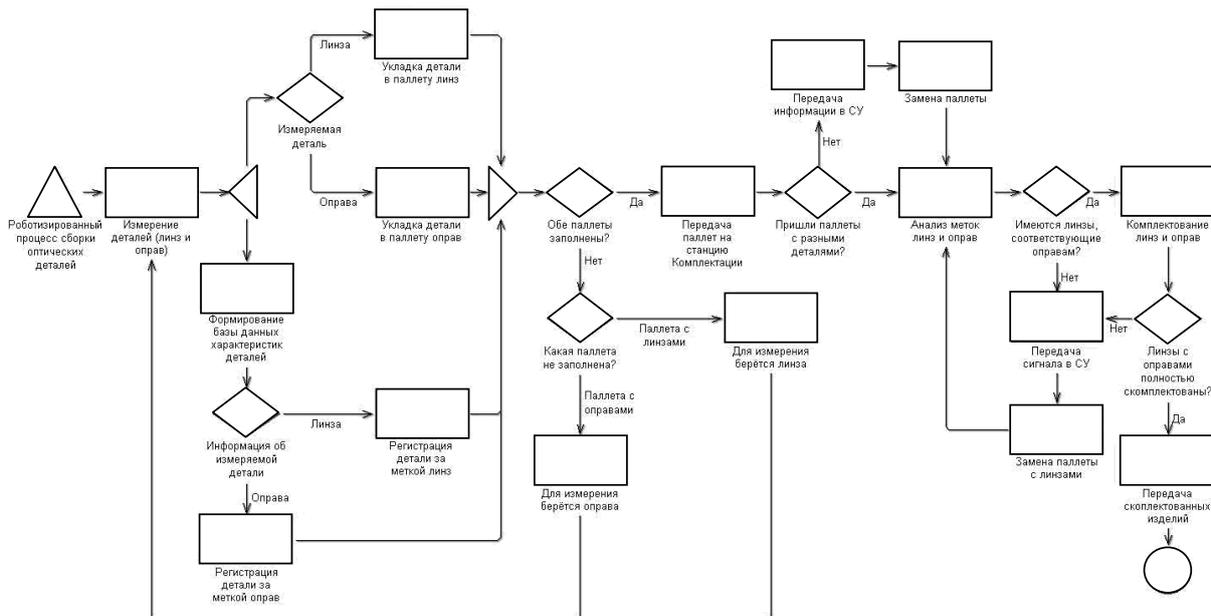


Рисунок. Функциональная модель технологического процесса сборки микрообъектива

Функциональная модель позволяет рассмотреть возможные условия выполнения технологического процесса. Для представленного примера были определены ситуации, которые могут возникнуть в процессе. На первом этапе проводилась проверка наполненности паллет: если паллеты заполнены, то они отправляются на станцию комплектации. В случае, если на станцию комплектации пришли паллеты с одинаковыми деталями, например, с оправками, происходит считывание меток с паллет, далее в систему управления линией поступает сигнал о том, что пришли паллеты с одинаковыми деталями, и принимается решение о замене. После смены паллеты происходит анализ меток деталей (линз и оправ) и проверяется их соответствие. Если линзы соответствуют оправкам, то осуществляется операция комплектации, в противном случае в систему управления поступает сигнал о том, что для выполнения операции необходимо провести замену одной из паллет (с линзами или оправками).

В функциональной модели учитывались возможные ситуации и случайные факторы, которые могут возникнуть в ходе выполнения технологического процесса и вызвать изменения в его протекании. На

представленном примере рассмотрены лишь некоторые из них. Модель процесса может быть изменена в ходе проведения компьютерных экспериментов с имитационной моделью.

Таким образом, создание функциональной модели позволяет определить:

- возможные случайные факторы, которые могут возникнуть и повлиять на выполнение технологического процесса;
- используемые ресурсы;
- пути выполнения технологического процесса с учетом влияния случайных факторов;
- оптимальный путь прохождения процесса, который будет использоваться для построения имитационной модели.

Функциональная и имитационная модели взаимосвязаны и являются дополнением друг друга. Имитационная модель дает больше информации для анализа. В свою очередь, результаты такого анализа могут стать причиной модификации модели процессов. В связи с этим целесообразно сначала построить функциональную модель, а затем на ее основе построить имитационную модель [4].

### **Имитационная модель**

Имитационная модель строится в системе Delmia. Delmia реализует моделирование на основе виртуальной реальности – Virtual Reality (VR). VR-моделирование основано на концепции e-Manufacturing и связано с проблемами исследования и анализа производственных процессов. Суть концепции e-Manufacturing определяется непрерывным использованием цифровых моделей в процессе проектирования и эксплуатации производственных систем. При этом в виде цифровых моделей представляются не только сами изделия, но и все средства производства, производственные и логистические процессы.

Для поддержки данной концепции Delmia обладает банком данных, в котором представлены три базовые структуры производственного назначения: Продукт/Процесс/Ресурс (PPR). Модель PPR является ядром системы и предоставляет средства интеграции, соединяя различные хранилища и приложения расширенного производства, обеспечивает непрерывное, динамичное моделирование характеристик изделия и управляет результатами изменения по изделию, его процессами и ресурсами. Delmia имеет специальный симулятор – Quest, который поддерживает имитационное моделирование исследуемых систем и процессов, обеспечивает возможность визуального представления основных объектов и процессов функционирования исследуемых систем и результатов моделирования, погружая исследователя в среду виртуальной реальности [5].

Имитационная модель в Delmia состоит из физической и логической моделей. Физическая модель представляет собой планировку производственной системы, трехмерные модели оборудования и изделий, а логическая модель описывает материальный поток и правила его прохождения через определенную производственную систему. При построении физической модели используется встроенная библиотека геометрических образов типовых элементов логистической системы (например, контроллеры для роботов). Построение логической модели сводится к настройке базовой логики и определению конкретных значений параметров, а также заданию связей между элементами логистической системы (продуктом, процессом и используемым оборудованием). В логической модели учитывается вероятность сбоев производственного оборудования, график работы оборудования и персонала. Одна и та же физическая модель может быть использована и при моделировании нескольких материальных потоков, описываемых различными логическими моделями [6].

Созданную имитационную модель технологического процесса сборки можно «проиграть» во времени и получить статистику выполнения процесса так, как это было бы в реальности. Воспроизведение динамики производственного процесса основывается на моделировании работы всех задействованных в нем ресурсов в течение заданного интервала времени. Кроме того, имитационная модель процесса позволяет воспроизводить случайные факторы, обуславливающие вероятностный характер его выполнения, в том числе:

- случайные потери оборудования вследствие аварийности его работы или простоя;
- случайные потери ресурса рабочей силы, определяемые невыходами на работу;
- случайные колебания длительности вспомогательных и обслуживающих процессов, и т.д.

### **Заключение**

Полученная имитационная модель сборочной линии используется для постановки экспериментов по имитации работы реальной линии сборки. Компьютерные эксперименты с имитационной моделью процесса:

- дают возможность исследовать особенности функционирования системы в любых условиях;
- существенно сокращают продолжительность испытаний по сравнению с натурным экспериментом;

- позволяют одновременно рассматривать и оценивать несколько альтернативных вариантов проектных решений для выбора одного оптимального;
- позволяют выяснить, может ли быть осуществлен проектируемый процесс, оценить возможные режимы и нагрузки во времени, проверить возможность улучшения качества.

Полученные в ходе выполнения экспериментов формальные результаты моделирования можно переносить на реальную линию сборки. Если результаты работы реальной линии не отвечают требованиям, то имитационная модель адаптируется, и процесс симуляции работы повторяется. В конечном итоге можно получить необходимые рекомендации по структуре и параметрам работы реальной линии.

### Литература

1. Имитационное моделирование производственных систем / Под общ. ред. чл. кор. АН СССР А.А. Вавилова. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1983. – 416 с.
2. Лоу А., Кельтон Д. Имитационное моделирование / Пер. с англ. – 3-е изд. – СПб: BHV, 2004. – 848 с.
3. Концепция линии автоматизированной сборки микрообъективов на основе адаптивной селекции их компонентов / С.М. Латыев, А.П. Смирнов, А.А. Воронин, Б.С. Падун, Е.И. Яблочников, Д.Н. Фролов, А.Г. Табачков, Р. Тезка, П. Цохер // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 7. – С. 79–83.
4. Маклаков С. Имитационное моделирование с Arena: электронный журнал КомпьютерПресс № 7, 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://compress.ru>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.04.2010).
5. Coze Y., Kawski N., Kulka T., Sire P., Philippe S., Bloem J. Virtual Concept Real Profit with Digital Manufacturing and Simulation / Dassault Systèmes, November, 2009. – 168 с.
6. The PLM Magazine: корпоративный журнал Contact Mag. – May, 2009. – № 11. – С. 24–25.

- Алёшина Екатерина Евгеньевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [aleshina.ekaterina@gmail.com](mailto:aleshina.ekaterina@gmail.com)
- Саломатина Анна Алексеевна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [Salomatina.Anna@gmail.com](mailto:Salomatina.Anna@gmail.com)
- Яблочников Евгений Иванович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, зав. кафедрой, кандидат технических наук, доцент, [eugeny@bee-pitron.spb.su](mailto:eugeny@bee-pitron.spb.su)

УДК 004.272:004.032.26

РЕАЛИЗАЦИЯ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
НА МАССИВНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЕ ГРАФИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССОРА

Н.О. Матвеева

Предлагается распараллеливание в технологии программно-аппаратной архитектуры (CUDA) алгоритма обучения радиально-базисной нейронной сети (RBFNN), основанного на идее последовательной настройки центров, ширины и весов сети, а также идее коррекции весов по алгоритму минимизации квадратичного функционала методом сопряженных градиентов. Приводятся результаты сравнения времени обучения RBFNN на различных центральных и графических процессорах, доказывающие эффективность распараллеливания.

**Ключевые слова:** графический процессор, параллельность, CUDA, массивно-параллельная архитектура, RBFNN, дифференциальное уравнение.

## Введение

Для решения краевых задач математической физики, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, наибольшее распространение получили методы конечных разностей и конечных элементов, но эти методы требуют построения сеток и позволяют получить решение только в узлах сетки. Этого существенного недостатка лишены бессеточные методы [1]. Бессеточные методы эффективно реализуются на RBFNN [2]. Главное достоинство RBFNN состоит в использовании принципов обучения для формирования оптимальных параметров радиально-базисных функций (RBF). Такие методы могут быть эффективно реализованы на параллельных системах.

Для распараллеливания RBFNN наиболее подходит модель вычислений SIMD (Single Instruction – Multiple Data), так как нейроны одного слоя сети выполняют одинаковые действия над различными данными. На основе такой модели вычислений построены современные графические процессоры (GPU). GPU выигрывают у кластерных систем по критерию цена/производительность.

Целью работы является разработка параллельной реализации алгоритма обучения RBFNN для решения краевых задач математической физики на графическом процессоре с использованием технологии CUDA и исследование эффективности распараллеливания путем сравнения времени решения краевой задачи на GPU и на центральном процессоре (CPU).

## Структура RBFNN

RBFNN (рис. 1) представляет собой сеть с двумя слоями. Первый слой осуществляет преобразование входного вектора  $\mathbf{x}$  с использованием RBF. Практически используются различные RBF.

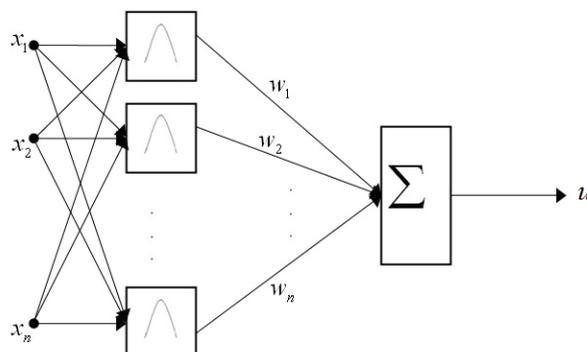


Рис. 1. Радиально-базисная нейронная сеть

В дальнейшем будем использовать наиболее часто употребляемую функцию – гауссиан, имеющий для  $k$ -го нейрона вид

$$\varphi_k(\mathbf{x}) = \exp(-r_k^2 / a_k^2), \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – входной вектор;  $r_k = \|\mathbf{x} - \mathbf{c}_k\|$  – радиус  $k$ -го нейрона;  $a_k$  – ширина  $k$ -го нейрона;  $\mathbf{c}_k$  – центр  $k$ -го нейрона. Выход сети описывается выражением

$$u = \sum_{k=1}^m w_k \varphi_k(\mathbf{x}), \quad (2)$$

где  $w_k$  – вес связи выходного нейрона с  $k$ -ым нейроном первого слоя;  $m$  – число нейронов первого слоя.

### Алгоритм обучения RBFNN

Рассмотрим градиентный алгоритм обучения RBFNN на примере решения двумерного уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y), \quad (x, y) \in \Omega, \quad (3)$$

$$u = p(x, y), \quad (x, y) \in \partial\Omega, \quad (4)$$

где  $\partial\Omega$  – граница области;  $f$  и  $p$  – известные функции  $(x, y)$ . Выбирая в качестве RBF гауссиан (1), определяемый как  $\varphi_k(x, y) = \exp\left(-\frac{r_k^2}{a_k^2}\right)$ , рассмотрим RBF-сеть как аппроксиматор функции решения

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^m w_k \varphi_k(r_k), \quad (5)$$

где  $m$  – число RBF (скрытых нейронов);  $r_k = \sqrt{(x - c_{xk})^2 + (y - c_{yk})^2}$ ;  $(c_{xk}, c_{yk})$  – координаты центра нейрона  $k$ ;  $a_k$  – ширина нейрона  $k$ .

Обучение сети сводится к настройке весов, расположения центров и ширины нейронов, минимизирующий функционал качества (функционал ошибки), представляющий собой сумму квадратов невязок в контрольных точках

$$I(\mathbf{w}, \mathbf{c}, \mathbf{a}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial^2 u(x_i, y_i)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x_i, y_i)}{\partial y^2} - f(x_i, y_i) \right]^2 + \frac{\lambda}{2} \sum_{j=1}^K [u(x_j, y_j) - p_j]^2, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – штрафной множитель;  $p_j$  – значение граничных условий первого рода в точке  $j$ -границы;  $N$  и  $K$  – количество внутренних и граничных контрольных точек.

В [2] предложен алгоритм последовательной настройки центров, ширины и весов с использованием метода градиентного спуска с подбором коэффициентов скорости обучения. Подбор коэффициентов скорости обучения является основным недостатком данного метода.

В [3] для настройки весов предложен другой алгоритм, который сформулирован как задача минимизации методом сопряженных градиентов квадратичного функционала. Данный метод не содержит подбираемых коэффициентов, и настройка весов происходит быстрее, чем методом градиентного спуска.

Очень важно соблюдать при обучении соотношение между оптимальным количеством нейронов  $m$  и количеством контрольных точек [4]

$$m \sim \sqrt[3]{N + K},$$

где  $\sim$  – знак пропорциональности. Данное соотношение требует большого числа контрольных точек, что ведет к увеличению времени решения задачи. В [3] обосновано, что многократная случайная генерация относительно небольшого числа контрольных точек внутри и на границе области решения компенсирует нарушение пропорции.

Таким образом, обучение радиально-базисной сети состоит из следующих основных шагов.

1. Генерация начальных значений параметров сети.
2. Генерация случайных контрольных точек для одного или нескольких циклов обучения.
3. Несколько циклов настройки центров и ширины при зафиксированных весах. В данном случае центры и ширина настраивались методом градиентного спуска:

$$c_k^{(n)} = c_k^{(n-1)} - \beta^{(n-1)} \frac{\partial I(c_k^{(n-1)}, a_k^{(n-1)}, w_k^{(n)})}{\partial c_k^{(n-1)}},$$

$$a_k^{(n)} = a_k^{(n-1)} - \alpha^{(n-1)} \frac{\partial I(c_k^{(n-1)}, a_k^{(n-1)}, w_k^{(n)})}{\partial a_k^{(n-1)}}.$$

4. Несколько циклов настройки весов при зафиксированных значениях центров и ширины по алгоритму минимизации методом сопряженных градиентов квадратичного функционала, полученного в [3]:

$$I = (\mathbf{A}\mathbf{w}, \mathbf{w}) - 2(\mathbf{s}, \mathbf{w}) + 0,5(\mathbf{f}, \mathbf{f}) + 0,5\lambda(\mathbf{p}, \mathbf{p}),$$

где  $\mathbf{A} = \frac{1}{2}(\mathbf{M}^T\mathbf{M} + \lambda\mathbf{N}^T\mathbf{N})$  – симметричная положительно определенная матрица;

$\mathbf{s} = \frac{1}{2}(\mathbf{M}^T\mathbf{f} + \lambda\mathbf{N}^T\mathbf{p})$ ;  $\mathbf{M}$  – матрица  $N \times m$  с элементами  $m_{ik} = 4 \exp\left(-\frac{r_{ik}^2}{a_k^2}\right) \frac{r_{ik}^2 - a_k^2}{a_k^4}$ ;  $\mathbf{N}$  – матрица

$K \times m$  с элементами  $n_{ik} = \exp\left(-\frac{r_{ik}^2}{a_k^2}\right)$ ;  $\mathbf{f}$  – вектор значений функции правой части во внутренних точках;  $\mathbf{p}$  – вектор граничных условий в граничных контрольных точках.

5. Проверка, достигнута ли требуемая погрешность. Для этого целесообразно использовать одну из норм вектора невязки (вектор невязки вычисляется во внутренних и граничных контрольных точках). Если требуемая погрешность не достигнута, то переход на шаг 2.

Используется пакетный режим обучения, т.е. вычисляется усредненная ошибка по всем контрольным точкам.

### Алгоритмы распараллеливания вычислений на графическом процессоре в технологии CUDA

Как было описано выше, для минимизации весов сети использовался алгоритм минимизации квадратичного функционала методом сопряженных градиентов. Непосредственно данный алгоритм состоит из матрично-векторных операций, распараллеливание которых описано в [5]. Но, кроме коррекции весов, большая доля времени приходится на вычисление матриц  $\mathbf{M}$  и  $\mathbf{N}$ , расстояний  $r_{ik}$ , коррекцию векторов центров и ширины. При этом элементы данных матриц и векторов находятся не с помощью матрично-векторных операций, а в циклах, что делает невозможным использование стандартной библиотеки CUDA CUBLAS. Например, вычисление матрицы  $\mathbf{M}$  и вектора  $\mathbf{r}_1$  осуществляется в двух вложенных циклах (рис. 2). Реализация данной функции на графическом процессоре позволяет избавиться от обоих циклов и параллельно вычислить каждый из элементов матрицы  $\mathbf{M}$ .

**Функция** (входные данные: вектора –  $\mathbf{w}, \mathbf{a}, \mathbf{f}$ ; матрица –  $\mathbf{R}$ ; числа –  $m, nv$ )

$\mathbf{r}_1$  = нулевой вектор  $1 \times nv$ ;

$\mathbf{M}$  = нулевая матрица  $nv \times m$

**Цикл 1:**  $i$  от 1 до  $nv$

**Цикл 2:**  $k$  от 1 до  $m$

$$m_{ik} = 4e^{-\frac{r_{ik}^2}{a_k^2}} \frac{r_{ik}^2 - a_k^2}{a_k^4}$$

$$r_{1i} = r_{1i} + m_{ik} w_k$$

**Конец цикла 2**

$$r_{1i} = r_{1i} + f_i$$

**Конец цикла 1**

**Возвращаемые значения:**  $\mathbf{M}, \mathbf{r}_1$

Рис. 2. Алгоритм последовательного вычисления матрицы  $\mathbf{M}$  и вектора  $\mathbf{r}_1$

Для вычисления одного элемента матрицы  $\mathbf{M}$  требуется прочитать из памяти  $r_{ik}$  и  $a_k$  и выполнить все операции по формуле  $m_{ik} = 4 \exp\left(-\frac{r_{ik}^2}{a_k^2}\right) \frac{r_{ik}^2 - a_k^2}{a_k^4}$ , т.е. необходимо небольшое количество чтений из памяти и большое количество вычислений. Такие задачи прекрасно реализуются на архитектуре графического процессора, так как слабое место GPU – относительно медленное чтение из памяти – компенсируется за счет большого количества параллельно выполняемых вычислений.

Как видно из рис. 3, вычисления на графическом процессоре происходят в  $nv$  блоках, каждый из которых содержит  $m$  потоков. Один поток вычисляет один элемент матрицы  $\mathbf{M}$ , в результате все эле-

менты матрицы вычисляются параллельно. Вычисление вектора  $r_i = \sum_{k=1}^m m_{ik} w_k - f_i$  реализуется в этом том же ядре, что и матрицы  $\mathbf{M}$ , для уменьшения чтений из памяти, так как найденные элементы матрицы  $\mathbf{M}$  сразу используются для вычисления вектора  $r_i$  через разделяемую память блока размером  $1 \times m$ .



Рис. 3. Алгоритм параллельного вычисления матрицы  $\mathbf{M}$  и вектора  $r_i$  на GPU

Другие вычисления алгоритма обучения RBFNN, такие как вычисление матрицы  $\mathbf{N}$ , коррекция центров и ширины методом градиентного спуска, метод сопряженных градиентов для настройки весов, распараллеливаются на графическом процессоре подобным образом.

### Анализ результатов экспериментов

Алгоритм обучения RBFNN реализовывался с помощью технологии CUDA на графическом процессоре nVidia GeForce 8800 GTX, на центральных процессорах Intel Pentium 4 3 GHz (CPU1) и Intel® Core™ 2 Quad CPU Q8200 2,33GHz (CPU2) на Microsoft Visual Studio 2008. Экспериментальное исследование проводилось на примере модельной задачи (3)–(4) для  $f(x, y) = \sin(\pi x)\sin(\pi y)$ ,  $p(x, y) = 0$ . Анализ результатов экспериментов показал, что часть алгоритма, не включающая обучение весов сети, распараллеливается очень эффективно, значительно уменьшая время вычислений. Метод сопряженных градиентов для обучения весов становится более эффективным при увеличении числа нейронов. Для решаемой задачи увеличивать количество нейронов не имело смысла, поэтому ускорения были получены в основном за счет распараллеливания шага 1, вычисления матриц  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$  и др., что можно видеть из таблицы. При решении более сложного уравнения эффективность распараллеливания на графическом процессоре будет значительней, но и для решаемой задачи было получено существенное ускорение. Общее

ускорение вычислялось по формуле  $S = \frac{\text{Время вычислений CPU}}{\text{Время вычислений GPU}}$ . В сравнении с CPU Intel Pentium 4

3 GHz при числе контрольных точек 224 оно составило 38,58, при числе контрольных точек 524 – 83,42, в сравнении с Intel® Core™ 2 Quad CPU Q8200 2,33GHz – 17,31 и 34,5 соответственно.

В таблице приведены результаты экспериментов, из которых видно, что уже при небольшом числе нейронов и контрольных точек реализация алгоритма обучения на графическом процессоре дает существенный выигрыш во времени.

Параметры сети	Шаг алгоритма обучения сети	GPU, мс	CPU 1, мс	CPU 2, мс	Уск. 1	Уск. 2
Число контр. точек = <u>224</u>	Шаг 3	0,56	64,1	27,8	114,5	49,6
Число контр. точек = <u>524</u>	Шаг 3	0,58	173,2	71,7	298,6	123,6
Число нейронов = <u>64</u>	Шаг 4	1,12	1,9	1,2	1,7	1,07

Таблица. Результаты экспериментов

### Заключение

В результате распараллеливания алгоритма обучения RBFNN, основанного на идее последовательной настройки центров, ширины и весов и идее использования для настройки весов алгоритма минимизации квадратичного функционала методом сопряженных градиентов, было достигнуто существенное уменьшение времени вычислений. При решении уравнения Пуассона, с использованием сети с 64-мя нейронами и 524 контрольными точками, достигнуто ускорение в 34,5 раза в сравнении с CPU Intel® Core™ 2 Quad.

Работа выполнена по тематическому плану научно-исследовательских работ Пензенского государственного педагогического университета, проводимых по заданию Федерального агентства по образованию.

### Литература

1. Liu G.R. An Introduction to Meshfree Methods and Their Programming / G.R. Liu, Y.T. Gu. – Springer, 2005. – 479 p.
2. Jianyu L. Numerical solution of elliptic partial differential equation using radial basis function neural networks / L. Jianyu, L. Siwei, Q. Yingjiana, H. Yapinga // Neural Networks. – 2003. – 16(5/6). – P. 729–734.
3. Горбаченко В.И. Радиально-базисные нейронные сети для решения краевых задач бессеточными методами / В.И. Горбаченко, Е.В. Артюхина, В.В. Артюхин // Нейроинформатика-2010: Сборник научных трудов XII Всероссийской научно-технической конференции. В 2-х частях. Часть 2. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 237–247.
4. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс / С. Хайкин. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
5. Горбаченко В.И. Реализация итерационных алгоритмов решения систем линейных алгебраических уравнений на графических процессорах в технологии CUDA / В.И. Горбаченко, Н.О. Матвеева // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. – 2008. – Вып. 6. – С. 65–75.

*Матвеева Наталья* – Пензенский государственный педагогический университет им. В. Г. Белинского, аспирант, fire\_tiger\_705@mail.ru

УДК 004.912

## МЕТОД НАВИГАЦИИ ПО ТЕКСТУ ДОКУМЕНТА С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЕГО СОДЕРЖИМОГО

А.И. Табарча

Описывается подход, который может быть использован в качестве альтернативы автоматическому реферированию текста. Суть подхода заключается в формировании представлений исходного текста и возможности перемещаться по его содержанию с помощью этих представлений – от общего представления к более конкретному представлению и обратно. Представления формируются на основании методов автоматической обработки текста – статистических методов и поверхностного лингвистического анализа. В работе дано формализованное описание подхода, а также рассмотрена реализация на основе реляционной базы данных.

**Ключевые слова:** автоматическое реферирование, автоматический анализ текста, автоматическое извлечение терминов, статистические методы.

### Введение

Постоянный рост объемов информации снижает эффективность ее обработки традиционными методами. Единственным инструментом, который потенциально может обеспечить охват информационных ресурсов, являются различные программы автоматической обработки текста, реализующие индексирование, аннотирование, реферирование, фрагментирование и другие формы информационного анализа и синтеза [1].

Среди задач автоматической обработки текста можно выделить задачу автоматического реферирования текстов, потребность в решении которой стабильно возрастает. Предполагается, что на основании реферата, составляющего, как правило, 5–30% исходного текста, можно составить обоснованное заключение о первичном документе, затратив значительно меньше усилий на ознакомление с ним [1].

Решения задачи автоматического реферирования четко разбиваются на два направления – квазиреферирование и краткое изложение содержания первичных документов. Квазиреферирование основано на выделении из текста наиболее информативных предложений и формировании из них квазирефератов. Краткое изложение исходного материала основывается на выделении из текста, на основании искусственного интеллекта и с помощью специальных искусственных языков, наиболее существенной информации и порождении нового текста, содержательно обобщающего первичный текст [2].

Проанализировав вышеописанные подходы к решению проблемы стремительного роста производства информации, можно отметить, что более трудоемкий в реализации и поддержке метод краткого изложения содержания дает лучшие результаты, чем более простой в реализации и более универсальный метод квазиреферирования [3].

На практике люди редко приходят к единому мнению относительно наличия необходимой информации в автоматически созданном реферате, вне зависимости от подхода, который был применен. Отсюда можно заключить, что разным людям для формирования представления об исходном документе требуется различная информация из исходного текста. В связи с этим предлагается подход к формированию представлений документа в виде списков сгруппированных терминов, фрагментов предложений, целых предложений, а также фрагментов исходного текста. Подход основывается на методах квазиреферирования, но отличается от обоих вышеописанных методов. Отличительной особенностью метода является то, что пользователю вместо готового реферата предоставляется возможность на основании компактных представлений документа перемещаться по исходному тексту документа от общего представления, отражающего большую часть исходного текста, к подробному представлению меньшей части исходного текста. Таким образом, предполагается обеспечить необходимую гибкость в предоставлении информации, наиболее соответствующей интересам пользователя.

Целью данной работы является разработка системы навигации по тексту документа, которую можно было бы использовать наряду с системами автоматического реферирования. Для достижения цели работы должны быть выполнены следующие задачи:

- детальное описание метода, лежащего в основе работы системы;
- рассмотрение основных вопросов реализации системы.

### **Описание предлагаемого подхода**

Предлагается построение иерархической структуры представлений исходного текста. Каждое представление отражает минимально необходимую информацию для принятия решения об углублении, либо возврате на верхний уровень. Процесс начинается с построения представления верхнего уровня. Далее, в зависимости от выбранного элемента, строятся представления более низких уровней.

Процесс чтения текста можно представить как последовательное распознавание слов, словосочетаний и взаимосвязей между ними. Среди слов текста можно выделить общеупотребительные слова и слова, относящиеся к определенной области знания (термины) [4]. Термином может быть как слово, так и словосочетание. Общеупотребительные слова играют связующую роль. Слова предметной области обозначают объекты. Под объектом понимается любая сущность, понятие или явление. Таким образом, текст можно рассматривать как описание свойств объектов и взаимосвязей между ними. С точки зрения психологии понимание чего-либо основывается на выстраивании связей между объектами. Как следствие, чтобы понять текст, из него нужно выделить описываемые объекты и взаимосвязи между ними.

Если рассматривать текст как описание объектов и взаимосвязей между ними, то для формирования представления верхнего уровня достаточно выделения списка объектов (терминов) из текста. Так как в тексте содержится множество терминов и не все они одинаково явно выражают тематику текста, следует выбрать наиболее значимые термины.

В длинных текстах даже значимых терминов достаточно много, что неудобно для восприятия, поэтому предлагается ввести в описываемую иерархию более высокий уровень представления – совокупность групп терминов. Термины могут быть сгруппированы в соответствии с локальностью их употребления в тексте. Для этого текст может быть разбит на пять-семь частей, в каждой из которых могут быть выделены три-четыре наиболее значимых термина для обозначения самой группы.

Чтобы учесть различную длину исходного текста, процедуру выбора группы можно повторить в зависимости от минимально выбранной значимости терминов, используемых для обозначения групп. При формировании подгруппы для выбранной группы термины, обозначающие группу, исключаются из возможных кандидатов в названия подгрупп, что позволяет получить представление о контексте, в котором используются основные термины. Назначение *представления групп терминов* заключается в отражении локальности использования определенных групп терминов в соответствующих частях текста. Здесь и далее по тексту курсивом выделены названия представлений, предложенные автором.

При выборе группы, не имеющей подгрупп, отображается *представление терминов*. *Представление терминов* представляет совокупность терминов либо отсортированных, либо выделенных изменением размера в зависимости от значения. Назначение представления терминов заключается в отражении наиболее значимых терминов из выбранной части текста. Для дополнительной выразительности наиболее значимые термины выделены по сравнению с остальными.

При выборе элемента *представления терминов* должно отображаться *представление ассоциированных терминов и фрагментов предложений*. *Представление ассоциированных терминов и фрагментов предложений* состоит из двух частей. Первая часть – это *представление терминов ассоциированных объектов*, а вторая – список фрагментов ассоциированных предложений.

Ассоциированным термином считается термин, находящийся в одном и том же предложении с термином *представления терминов* и не отделенный каким-либо знаком препинания, обозначающим конец предложения. Под ассоциированным предложением рассматривается предложение, содержащее

термин. Фрагмент ассоциированного предложения – это часть предложения, в которую входит термин, вместе с несколькими словами, находящимися с обеих сторон от него.

Назначение *представления ассоциированных терминов и фрагментов предложений* заключается в отражении наиболее значимых терминов из ассоциированных выбранному. Это показывает наличие некой взаимосвязи между объектами, которую можно уточнить, обратившись к представлению более низкого уровня. Предложение не приводится сразу полностью по нескольким причинам. Во-первых, нужно сконцентрировать внимание на наиболее важной части, а таковой считается часть вокруг выбранного объекта. Во-вторых, этой части может быть достаточно для того, чтобы не читать все предложение.

Выбор ассоциированного термина вызывает *представление фрагментов ассоциированных предложений*. В данном случае под ассоциированными предложениями понимаются предложения, содержащие оба термина, как термин верхнего уровня, так и ассоциированный термин. Отображаемый фрагмент предложения включает в себя оба термина вместе со словами, находящимися между ними.

Выбор предложения вызывает *представление контекста*. *Представление контекста* – это отображение предложений, окружающих выбранное предложение. *Представление контекста* по аналогии с *представлением групп терминов* может быть многоуровневым, т.е. при выборе контекста он расширяется вверх, вниз или и вверх, и вниз в зависимости от выбора пользователя и в соответствии с границами исходного текста. Так как представления последующих уровней контекста включают в себя представления предыдущих уровней контекста, то ранее прочитанные части текста выделяются цветом. Объем каждого последующего *представления контекста* равен удвоенному значению объема предыдущего представления с поправкой на симметричность при расширении контекста и вверх и вниз, и т.д. вплоть до достижения границ исходного текста. Общая схема представлений изображена на рисунке.

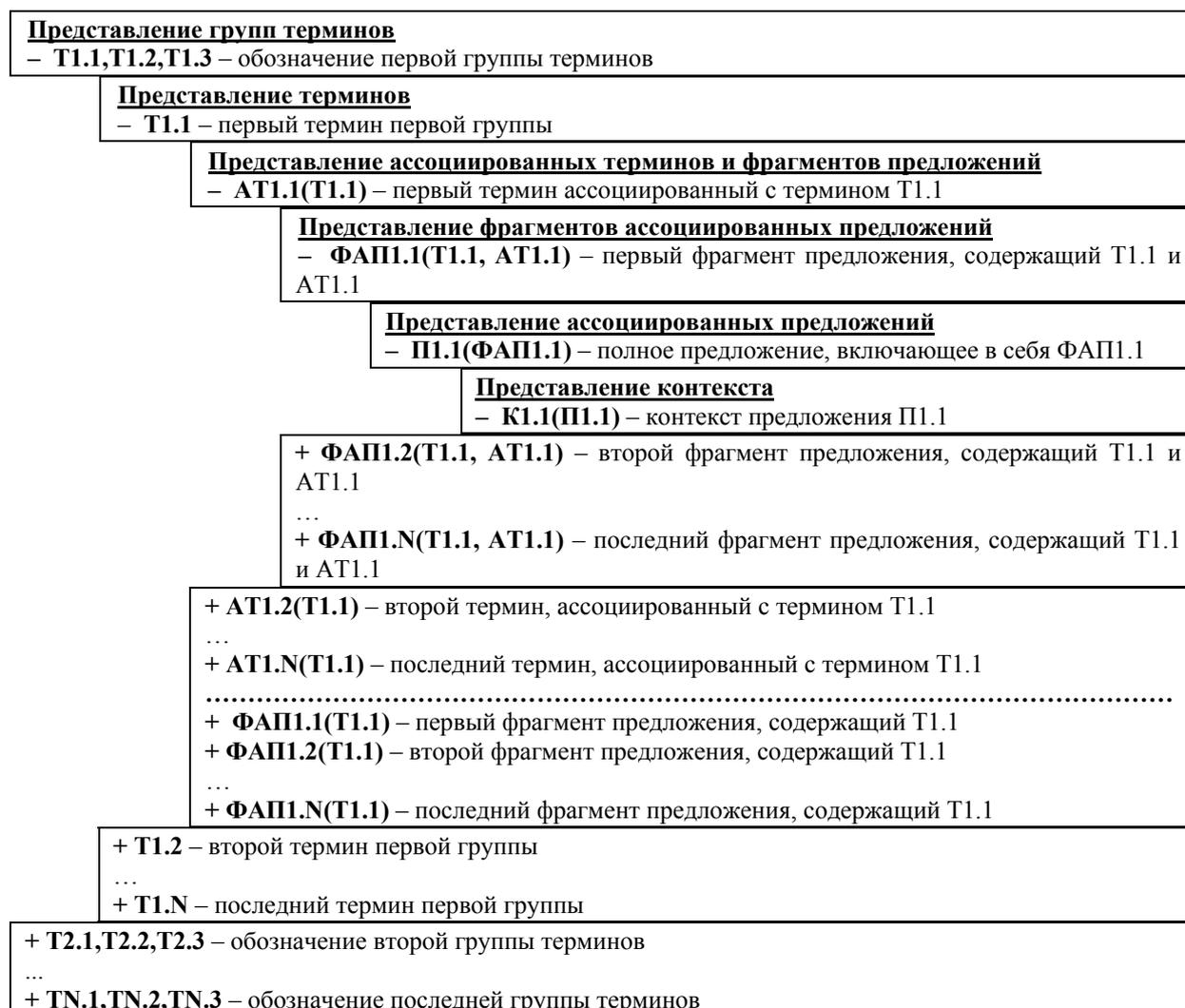


Рисунок. Общая схема представлений

В дополнение следует добавить, что с любого представления есть возможность вернуться обратно, на представление более высокого уровня или же на начальное представление.

### **Рассмотрение некоторых вопросов реализации на основе реляционной базы данных**

На подготовительном этапе происходит определение основных элементов текста, выделение их из текста и сохранение в удобном для произвольного доступа виде, чтобы обеспечить формирование различных выборок.

В данной системе выделяются следующие элементы текста:

- предложения;
- разделители предложений;
- разделители слов;
- слова – любая цифробуквенная последовательность и знак дефиса без разделителей;
- именованные последовательности – инициалы и аббревиатуры.

Морфологический анализ – важный этап предварительной обработки текста, так как для последующего анализа необходима морфологическая информация слов, выделенных из текста.

В качестве хранилища для сохранения результатов анализа выбрана реляционная база данных, так как впоследствии она сможет обеспечить простой и удобный доступ к элементам текста в произвольном виде. База данных состоит из 4 таблиц:

1. для хранения информации о тексте;
2. для хранения предложений текста и дополнительной информации о них;
3. для хранения элементов предложений;
4. для хранения лексем и их морфологических признаков.

Когда исходный текст разобран и сохранен в соответствующих таблицах реляционной базы данных, все необходимые представления могут быть сформированы выполнением запросов к базе данных.

Важным вопросом для первых трех уровней представлений является выделение терминов. На этапе анализа использовались возможности автоматического морфологического анализа, и каждой лексеме были сопоставлены ее грамматические характеристики. На основании этих данных можно выделить все лексемы, которые являются существительными, как термины. В процессе анализа исходного текста, кроме словоформ, выделялись также другие именованные последовательности символов, как, например, инициалы и аббревиатуры. Последние также могут быть использованы как термины. Таким образом, чтобы выбрать из текста объекты, нужно выбрать все существительные, а также инициалы и аббревиатуры.

Также следует заметить, что некоторые термины выражаются в предложении более чем одним словом. Так как большинство словосочетаний ограничивается двумя словами [5], то в данной работе производится поиск лишь двухсловных словосочетаний. Для поиска словосочетаний используются следующие шаблоны:

- прилагательное + существительное – для описания устойчиво сочетающихся с существительным прилагательных и причастий;
- существительное + существительное – для сочетаний двух существительных;
- глагол + существительное – для устойчивых сочетаний глагола и управляемого им существительного.

Для того чтобы выделить именно устоявшиеся словосочетания, а не случайное совместное употребление слов, при выборе учитывается частота встречаемости словосочетания в тексте.

Следующий немаловажный вопрос в выделении терминов из текста – это определение их значимости. В данной работе под значимостью термина понимается совокупность частоты употребления и длины слова/словосочетания, отображающего объект в тексте.

Рассмотрим этапы формирования одного из запросов (выборка списка наиболее значимых терминов из заданного участка текста).

1. Выборка предложений для заданного текста.
2. Ограничение выборки определенной частью последовательно располагающихся предложений (например, с 40-го по 140-е предложение).
3. Выборка элементов предложений только для заданного набора предложений.
4. Объединение выборки элементов предложений с данными таблицы, содержащей необходимую грамматическую информацию.
5. Применение фильтров различных видов словосочетаний для полученной выборки.
6. Выборка словосочетаний с соответствующей им значимостью; значимость определяется как частота встречаемости, умноженная на сумму средних длин словоформ для лексем выбранного словосочетания.

В тексте, кроме словосочетаний, могут встречаться и однословные термины. Для этого выполняется отдельный запрос, после чего данные обоих запросов объединяются и сортируются в соответствии со значимостью. Для выборки однословных терминов достаточно выполнить этапы 1–4 формирования запроса выборки списка наиболее значимых терминов. После этого следует выбрать все существительные,

инициалы и аббревиатуры с соответствующей им значимостью. Значимость инициалов и аббревиатур, ввиду их менее частого употребления, но большей важности по сравнению с обычными словами, должна считаться особым образом.

### Сравнительная оценка с уже существующими подходами

Описанный подход призван решать задачу автоматического реферирования текстов. Решение задачи автоматического реферирования текстов разбивается на два направления – квазиреферирование и краткое изложение содержания первичных документов. Краткое изложение содержания первичных документов, ввиду ресурсоемкости и совершенного другого уровня анализа, некорректно сравнивать с описываемым подходом, хотя результаты предлагаемого подхода могут оказаться интересными, ввиду интерактивности подхода.

Сравним предлагаемый подход с методом квазиреферирования. Квазиреферирование основано на выделении наиболее информативных предложений и формировании из них квазирефератов. На практике люди редко приходят к единому мнению относительно наличия необходимой информации в автоматически созданном реферате. Увеличение размера квазиреферата не всегда решает эту задачу, к тому же это увеличивает время на ознакомление с материалом. Преимущество описываемого метода – в том, что пользователю вместо готового реферата предоставлена возможность на основании компактных представлений перемещаться по исходному тексту документа. Таким образом, обеспечивается необходимая гибкость в предоставлении информации наиболее соответствующей интересам пользователя. Реализация системы на практике подтвердила, что преимущество предлагаемого метода по сравнению с квазиреферированием – это гибкость и интерактивность. В качестве недостатка можно рассмотреть случай, когда квазиреферат сразу содержит информацию, интересующую пользователя, а в предлагаемой системе ее нужно найти, переходя между представлениями текста.

### Заключение

Описанный подход основывается на методах квазиреферирования – статистические методы и поверхностный лингвистический анализ. Как следствие, подход обладает все плюсами и минусами методов. Но за счет возможности интерактивного взаимодействия с системой неточности автоматического анализа текста, присущие универсальным методам обработки без глубокого лингвистического анализа, сглаживаются.

Отличительная особенность предлагаемой системы – это возможность формировать из исходного текста представления наиболее соответствующие информационным потребностям пользователя. Система позволяет сформировать общее представление об исходном тексте, но обладает также возможностью формирования представлений, позволяющих перейти от общего представления непосредственно к тексту и обратно, поэтому систему можно также рассматривать как средство для поиска необходимой информации в тексте.

Система особенно полезна для сложных текстов, так как способствует выделению значимых объектов и взаимосвязей между ними, фокусировке внимания именно на важных частях текста.

Систему можно улучшить, разрабатывая новые алгоритмы для выделения терминов и ассоциированных терминов, ее несложно модифицировать для формирования представлений коллекции текстов.

### Литература

1. Ландэ Д.В. Поиск знаний в Internet. Профессиональная работа. – М.: Вильямс, 2005. – 272 с.
2. Соловьев В.Д., Добров Б.В., Иванов В.В., Лукашевич Н.В. Онтологии и тезаурусы. Модели, инструменты, приложения: Учебное пособие. – М.: Бином.ЛЗ, 2009. – 173 с.
3. Стернин И.А. Методологические проблемы когнитивной лингвистики: Научное издание. – Воронеж: ВорГУ, 2001. – С. 36–46.
4. Кузнецов И.П., Мацкевич А.Г. Лингвистические и алгоритмические аспекты выделения объектов и связей из предметно-ориентированных текстов // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: Труды Междунар. конф. Диалог'2007. – Бекасово, 2007. – С. 333–342.
5. Браславский П., Соколов Е. Сравнение четырех методов автоматического извлечения двухсловных терминов из текста // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: Труды Междунар. конф. Диалог'2006. – М.: Изд-во РГГУ, 2006. – С. 88–94.

*Табарча Александр Иванович*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, a.tabarcha@gmail.com

УДК 681.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ КЛАСТЕРА С ОГРАНИЧЕННОЙ ДОСТУПНОСТЬЮ КЛАСТЕРНЫХ ГРУПП

В.А. Богатырев, С.В. Богатырев, А.В. Богатырев

Определены состав и число (кратность резервирования) кластерных групп различной функциональной комплектации, обеспечивающие минимальную стоимость реализации системы при заданных требованиях по ее надежности.

**Ключевые слова:** кластер, оптимизация, надежность, сервер.

### Введение

В настоящее время для достижения высокой надежности и отказоустойчивости серверных систем широко используются кластерные архитектуры. При значительном числе серверов их объединение в кластеры может проводиться через многоуровневую коммуникационную подсистему древовидной топологии [1], содержащую коммутаторы верхнего и нижнего уровней (КВУ и КНУ). Серверные узлы разделены на отдельные кластерные группы (сегменты кластера) (рис. 1).

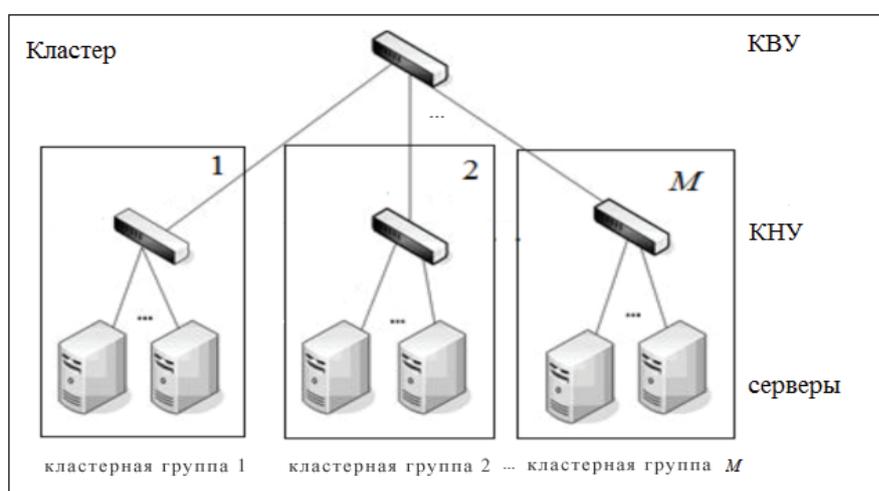


Рис. 1. Вычислительная система кластерной архитектуры с выделением групп серверов

При функциональной и/или параметрической неоднородности серверов надежность и эффективность кластерных систем зависит не только от кратности резервирования серверных и коммуникационных узлов, но и от вариантов объединения функционально неоднородных серверов в кластерные группы [2–10]. Исследованию эффективности вариантов объединения функционально неоднородных серверов в кластерные группы посвящена предлагаемая работа, в которой основное внимание уделено вариантам формирования кластерных групп, характеризуемых неполным функциональным набором серверов в каждой группе (сегменте), в результате чего возникает неполнодоступность групп для различных функциональных запросов.

### Формирование кластерных групп функционально неоднородных серверов

При наличии  $n$  типов серверов по функциональному назначению возможны варианты формирования кластерных групп с объединением:

- однотипных по функциональному назначению серверов [3];
- разнотипных по функциональному назначению серверов всех  $n$  типов (полнофункциональные кластерные группы серверов);
- разнотипных по функциональности серверов при их неполном функциональном наборе в каждой кластерной группе, с функциональной непересекаемостью различных кластерных групп [4];
- разнотипных по функциональности серверов при их неполном функциональном наборе в каждой кластерной группе, с функциональной пересекаемостью различных кластерных групп [4].

В последнем случае кластерные группы (сегменты) имеют ограниченную (неполную) доступность для различных функциональных запросов.

Выбор рациональных вариантов объединения серверов по кластерным группам должен проводиться с учетом минимизации времени обслуживания запросов различных функциональных типов, макси-

зации надежности и сглаживания деградационного влияния отказов серверного и коммуникационного оборудования на снижение функциональности, надежности и производительности системы.

Для решения задачи оптимального (рационального) построения серверной системы кластерной архитектуры требуется оценка ее надежности при различных вариантах объединения разнородных по функциональности серверов в кластерные группы. В работе анализируются кластерные системы с объединением в кластерные группы разнотипных по функциональному назначению серверов при допустимости неполного набора функциональных типов серверов в группах.

### Надежность систем с функциональной неоднородностью кластерных групп

Выбор рациональных вариантов компьютерных систем кластерной архитектуры требует оценки надежности с учетом вариантов комплектования кластерных групп функционально неоднородными серверами.

В соответствии с [8] каждую кластерную группу (рис. 1), включающую коммутационный узел нижнего уровня и подключенные к нему разнотипные по функциональному назначению серверы, будем рассматривать как многофункциональный модуль, для которого  $(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \Omega]$ , где  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  – ресурсы модуля, задействованные при выполнении функций  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , а  $\Omega$  – базовое оборудование общее при выполнении всех функций [4–7]. Отказ базового оборудования  $\Omega$  приводит к отказу всего многофункционального модуля. Для исследуемого объекта к оборудованию  $\Omega$  отнесем КНУ, а к оборудованию  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  – серверы разной функциональности (назначения).

В соответствии с [7] будем считать заданными возможные варианты комплектования кластерных групп по функциональному назначению серверов, характеризуемые матрицей  $\|a_{ij}\|_{n \times M}$ , элемент которой  $a_{ij} = 1$ , если группа  $j$ -го типа комплектации содержит сервер, реализующий  $i$ -ю функцию, иначе  $a_{ij} = 0$ ,  $j=1, 2, \dots, M$ . Матрица  $\|\varphi_{ij}\|_{n \times m}$ , характеризующая функциональные возможности серверных групп системы, формируется из матрицы  $\|a_{ij}\|$  с учетом числа (кратности резервирования) групп каждого варианта функциональной комплектации  $m_1, m_2, \dots, m_M$ .

В работе [7] предложена оценка надежности (вероятности безотказной работы) систем из многофункциональных модулей, а адаптация этой оценки к кластерным системам, в которых в качестве многофункциональных модулей рассматриваются кластерные группы, включающие коммутаторы и разнотипные по функциональности серверы, проведена в работе [8]:

$$P(m_1, m_2, \dots, m_M) = P_{s0} \sum_{k_1=0}^{m_1} \sum_{k_2=0}^{m_2} \dots \sum_{k_M=0}^{m_M} C_{m_1}^{k_1} C_{m_2}^{k_2} \dots C_{m_M}^{k_M} P_{s1}^{\sum_{j=1}^M k_j} (1 - P_{s1})^{\sum_{j=1}^M m_j - \sum_{j=1}^M k_j} \times \prod_{i=1}^n (1 - (1 - p_i)^{k_1 a_{i1} + k_2 a_{i2} + \dots + k_M a_{iM}}), \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, \dots, k_M$  – число кластерных групп различной функциональной комплектации при исправности входящих в их состав КНУ (возможно, резервированных);  $p_i$  – вероятность работоспособности сервера функционального назначения  $i$ -го типа;  $P_{s0} = 1 - (1 - p_{s0})^{l_0}$ ,  $P_{s1} = 1 - (1 - p_{s1})^{l_1}$  – вероятности исправности групп коммутационных узлов верхнего и нижнего уровня при кратности их резервирования  $l_0$  и  $l_1$  и вероятности работоспособности одного КВУ и КНУ, равной  $p_{s0}$  и  $p_{s1}$ .

### Выбор функциональной комплектации кластерных групп

Рассмотрим системы, компонуемые из серверных групп, функциональная комплектация которых представлена матрицами  $\|a_{ij}\|$  вида  $A_1, A_2, A_3, A_4$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Если кратности серверных групп, представляемых столбцами матрицы  $A_1$  равны  $m_1 = 8, m_2 = 8$ , матриц  $A_2, A_3$  равны  $m_1 = 8, m_2 = m_3 = 4$ , а матрицы  $A_4$  –  $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 4$ , то матрицы  $\|\varphi_{ij}\|_{n \times m}$  имеют соответственно вид  $S_1, S_2, S_3, S_4$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Во всех приведенных случаях общее число кластерных групп равно 16, а серверов – 32, т.е. затраты на реализацию систем одинаковы. Результаты расчета надежности (вероятности работоспособности) рассматриваемых кластерных систем при  $p_{s0} = p_{s1} = p$ ,  $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p^2$  представлены на рис. 2. На рис. 2 кривая 1 соответствует надежности систем, комплектация серверных групп которых представлена матрицами  $S_1, S_4$ , а кривые 2, 3 – матрицами  $S_2, S_3$ ; кривая 4 отражает разницу  $DP(p)$  вероятностей работоспособности систем, представленных матрицами  $S_1, S_4$ .

Расчеты подтверждают, что надежность исследуемых систем зависит не только от надежности и кратности резервирования серверов, но и от вариантов их объединения в серверные группы. Расчеты показывают предпочтительность комплектации кластерных групп серверами разного функционального назначения, для которой разница построчных сумм матриц  $\|\phi_{ij}\|$  минимальна. При выполнении этой рекомендации предпочтительней является распределение серверов по группам, при котором число комбинаций расположения единиц в строках минимально.

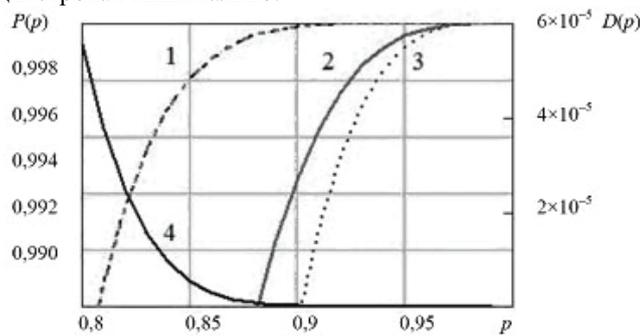


Рис. 2. 1 – вероятность безотказной работы систем  $P(p)$  с матрицами  $S_1, S_4$ ; 2, 3 – то же для матриц  $S_2, S_3$ ; 4 – разница  $DP(p)$  вероятностей безотказной работы систем с матрицами  $S_1, S_4$

### Оптимизация кратности резервирования серверных групп

В работе [7] поставлена и решена задача оптимизации, для которой при заданном наборе типов многофункциональных модулей (отличающихся функциональной комплектацией), представленном матрицей  $\|a_{ij}\|$ , требуется определить состав и число  $m_1, m_2, \dots, m_M$  модулей каждого типа комплектации, обеспечивающих максимум надежности системы при ограничении на стоимость ее реализации  $C_0$ :

$$P(m_1, m_2, m_3, m_4) \rightarrow \max, C(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) \leq C_0.$$

В работе [8] представленные модели [7] уточнены при рассмотрении в качестве многофункционального модуля группы функционально разнотипных серверов, объединяемых через коммутатор.

В отличие от постановки задачи оптимизации по [7], определим состав и число  $m_1, m_2, \dots, m_M$  кластерных групп различной функциональной комплектации, обеспечивающих минимум стоимость реализации системы при выполнении заданных требований по надежности  $P_0$ :

$$C(m_1, m_2, m_3, \dots, m_M) \rightarrow \min \text{ и } P(m_1, m_2, m_3, m_4) \geq P_0.$$

Для структур по рис. 1 стоимость реализации системы вычисляется как

$$C(m_1, m_2, \dots, m_M) = c_0(1 + \sum_{j=1}^M m_j) + \sum_{i=1}^n c_i (\sum_{j=1}^M a_{ij} m_j),$$

где  $c_0$  – стоимость коммутатора,  $c_i$  – стоимость  $i$ -го типа сервера,  $M$  – число типов комплектации кластерных групп. Надежность системы определяется по формуле (1).

Поиск минимума  $C(m_1, m_2, \dots, m_M)$  проводится на основе перебора возможных значений  $(m_1, m_2, \dots, m_M)$ . При этом задаем начальное значение стоимости системы максимально возможным  $C_{\max}$  (например,  $a=1000$ ), а затем при переборе  $(m_1, m_2, \dots, m_M)$ , если текущее значение стоимости меньше значения переменной  $a$  и удовлетворяет ограничению по надежности  $P_0$ , присваиваем переменной  $a$  текущее значение стоимости, иначе остается старое значение. Реализация такого поиска с использованием средств системы Mathcad-14 приведена ниже:

$$g2(P_0) := \begin{cases} a \leftarrow 1000 \\ \text{for } m1 \in 1..5 \\ \text{for } m2 \in 1..5 \\ \text{for } m3 \in 1..5 \\ \text{for } m4 \in 1..5 \\ a \leftarrow \text{if}(C(m1, m2, m3, m4, P_0) \leq a, C(m1, m2, m3, m4, P_0), a) \end{cases}$$

При этом

$$C(m_1, m_2, \dots, m_M, P_0) = \begin{cases} c_0(1 + \sum_{j=1}^M m_j) + \sum_{i=1}^n c_i (\sum_{j=1}^M a_{ij} m_j), & \text{if } P(m_1, m_2, \dots, m_M) \geq P_0, \\ C_{\max}, & \text{if } P(m_1, m_2, \dots, m_M) < P_0. \end{cases}$$

В результате оптимизации структуры кластера при выбранной функциональной комплектации кластерных групп можно определить минимум средств и кратность резервирования различных кластерных групп, обеспечивающих заданную надежность кластера.

Приведем пример оптимизации при стоимости узлов  $c_2 = 6, c_3 = 2, c_4 = 2, c_0 = 1$  (условных единиц, у.е.) и вероятности их исправности  $p_{s0} = p_{s1} = 0,9; p_1 = p_3 = 0,7; p_2 = p_4 = 0,9$ . При заданной предельной надежности системы  $P_0 = 0,9995$  и комплектации кластерных групп в соответствии с матрицей  $A_1$  требуется 8 и 10 групп, представленных соответственно первым и вторым столбцами, при этом затраты на построение системы равны 154 у.е.

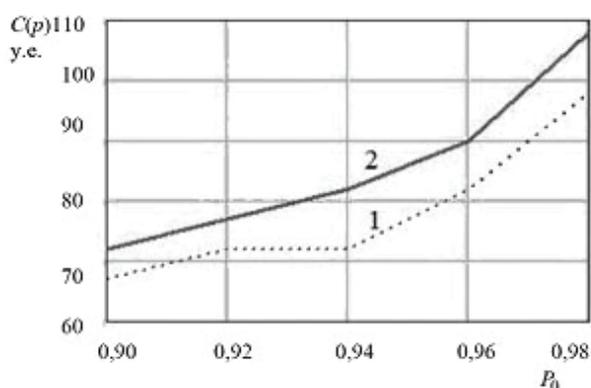


Рис. 3. Зависимость минимальной стоимости реализации системы от требований ее надежности  $P_0$  :

1 – при комплектации системы, представленной матрицей  $A_1$ , 2 – то же для матрицы  $A_4$ .

Зависимость минимальной стоимости реализации системы от требований по ее надежности  $P_0$  при комплектации групп серверов, представляемых матрицами  $A_1, A_4$  отображена кривыми 1 и 2 на рис. 3. Расчеты (рис. 3) показывают, что требуемый уровень надежности в зависимости от исходной функциональной комплектации кластерных групп может быть достигнут при различных затратах на ее построение.

### Заключение

Таким образом, на основе адаптации модели надежности вычислительных систем из многофункциональных модулей [7] проведена оценка надежности и оптимизация структуры компьютерных систем кластерной архитектуры при объединении серверов различного функционального назначения в кластерные группы. Полученные результаты могут использоваться при разработке компьютерных систем кластерной архитектуры, в частности, при определении оптимальных вариантов объединения серверов различного функционального назначения в кластерные группы, при минимизации стоимости реализации системы, при обеспечении требуемого уровня ее надежности.

### Литература

1. Ретана Ф. Принципы проектирования корпоративных IP-сетей. – М.: Вильямс, 2002. – 368 с.
2. Богатырев В.А. Оптимизация отказоустойчивых кластеров с неполнодоступностью узлов и неоднородностью потока запросов // Информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 30–36.
3. Богатырев В.А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 12. – С. 30–36.
4. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 41–47.
5. Богатырев В.А. Надежность вариантов размещения функциональных ресурсов в однородных вычислительных сетях // Электронное моделирование. – 1997. – № 3. – С. 21–29.
6. Богатырев В.А. Отказоустойчивость распределенных вычислительных систем динамического распределения запросов и размещение функциональных ресурсов // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2006. – № 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/56860.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 1.02.2010).
7. Богатырев В.А. Метод оценки надежности вычислительных систем при функциональной неоднородности компьютерных узлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2006. – № 12. – С. 20–22.
8. Богатырев В.А. Оценка надежности и оптимизация комплектации вычислительных систем при резервировании функционально неоднородных компьютерных узлов // Информационные технологии. – 2007. – № 5. – С. 41–47.
9. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Надежность компьютерных систем при объединении серверов в кластерные группы // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 4. – С. 548–552.
10. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоустойчивых отказоустойчивых компьютерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 92–97.

- Богатырев Владимир Анатольевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Богатырев Станислав Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, realloc@gmail.com
- Богатырев Анатолий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ganglion@gmail.com

УДК 621.3.085.42

## ПСЕВДОРЕГУЛЯРНЫЕ КОДОВЫЕ ШКАЛЫ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛА

А.А. Ожиганов, П.А. Прибыткин

Предложен новый тип кодовых шкал для цифровых преобразователей угла (ЦПУ) – псевдoreгулярные кодовые шкалы. Рассмотрен метод их построения, основанный на использовании композиции нелинейных рекуррентных последовательностей и регулярных двоичных кодовых шкал. Приведен пример построения псевдoreгулярной кодовой шкалы.

**Ключевые слова:** преобразователь угол–код, цифровой преобразователь угла, кодовая шкала, считывающие элементы, рекуррентная последовательность, псевдoreгулярная кодовая шкала, последовательность де Брейна, нелинейная кодовая шкала.

### Введение

ЦПУ являются измерительными преобразователями, служащими для ввода аналоговой информации об объекте в различные цифровые системы автоматического управления. Среди ЦПУ особое место занимают преобразователи абсолютного типа, основанные на методе считывания с пространственным кодированием [1, 2]. Основные требования к таким преобразователям – точность преобразования, быстрдействие, надежность, стойкость к внешним воздействующим факторам и др. Достаточно хорошо изучены основные способы получения высокой точности и разрешающей способности ЦПУ, если нет ограничений в габаритах преобразователей. Но в ряде применений ЦПУ актуальна задача увеличения точности и разрешающей способности при одновременном уменьшении их габаритов [3].

Достижение этих технических требований во многом зависит от применяемой в ЦПУ кодовой шкалы (КШ), которая определяет число кодовых дорожек (КД), а также число и размещение считывающих элементов (СЭ). Среди разных типов построения кодовых шкал для ЦПУ [2] наибольшее распространение получили КШ, выполненные в обыкновенном двоичном коде – регулярные КШ, в циклическом коде – обычно в коде Грея, и в специальном коде. Наиболее перспективными являются кодовые шкалы с применением теории рекуррентных последовательностей – рекурсивные кодовые шкалы (РКШ) [4], позволяющие строить одноканальные ЦПУ [5], двухканальные нереверсивные ЦПУ с двумя СЭ и реверсивные ЦПУ с подготовительными квантами [6], встречающиеся в литературе как «квазиабсолютные», а также КШ с возможностью формирования корректирующих кодов [7].

Различают КШ на основе линейных рекуррентных последовательностей (РП) и КШ на основе нелинейных РП в зависимости от свойства линейности или нелинейности (по отношению к оператору суммирования по модулю 2) рекуррентного соотношения, используемого для построения РП. Особенностью КШ на основе линейных РП является то, что они имеют информационную емкость  $2^n - 1$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  значений кода, не совместимую со многими техническими системами, в которые встраивается ЦПУ. В свою очередь, КШ на основе нелинейных РП позволяют осуществлять размещение СЭ вдоль КД шкалы единственным образом – с шагом в один квант. При конечных размерах СЭ (например, фотоприемников в фотоэлектрических ЦПУ) такое их размещение существенно ограничивает разрядность КШ.

С практической точки зрения применение РКШ для построения высокоразрядных малогабаритных ЦПУ связано с рядом ограничений конструктивного и особенно технологического характера, накладываемых минимальным размером градации кодовой шкалы, чувствительностью и размерами СЭ.

В связи с этим актуальной задачей является разработка кодовых шкал с учетом обозначенных ограничений, которые позволят создавать высокоразрядные малогабаритные ЦПУ. Такие кодовые шкалы в сравнении с классическими КШ должны иметь высокую информационную емкость при малом числе кодовых дорожек.

### **Теоретические основы построения псевдрегулярных кодовых шкал**

Известны сдвигающие регистры, или регистры сдвига с обратной связью – электронные переключаемые схемы специального вида, перерабатывающие информацию, заданную в форме соответствующим образом представленных элементов поля Галуа  $GF(2)$  [8]. В общем виде  $n$ -позиционный регистр сдвига состоит из  $n$  последовательно соединенных триггерных ячеек. В результате действия  $k + 1$  тактовых импульсов, где  $k$  – целое неотрицательное число; состояние каждой ячейки  $(a_k, a_{k+1}, \dots, a_{k+n-1}) \in \{0,1\}$  сдвигается в соседнюю ячейку. При введении обратной связи

$$f(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}) = c_0 x_0 + c_1 x_1 + \dots + c_{n-1} x_{n-1}, \quad (1)$$

где  $c_i \in GF(2)$ , сдвигающий регистр оказывается в режиме непрерывной смены состояний.

С помощью булевой функции обратной связи (1) определяется  $n$ -е состояние регистра (после  $n$  тактов работы) как  $a_n = f(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$ .

Таким образом, символы двоичной последовательности на выходе регистра сдвига удовлетворяют рекуррентному соотношению [9]

$$a_{n+j} = h_{n-1} a_{n-1+j} + h_{n-2} a_{n-2+j} + \dots + h_1 a_{j+1} + a_j, \quad (2)$$

где  $h_i \in GF(2)$ ,  $j = 0, 1, \dots$

Для работы регистра необходимо задать начальное состояние триггерных ячеек  $(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$ , причем нулевая комбинация является запрещенной, так как порождает последовательность из одних нулей. Функцию обратной связи (1) можно представить также в форме полинома порядка  $n$  с коэффициентами из поля Галуа  $GF(2)$ , называемого характеристическим полиномом,

$$h(x) = h_n x^n + h_{n-1} x^{n-1} + \dots + h_1 x + h_0, \quad (3)$$

где  $h_0 = h_n = 1$ ,  $h_i \in GF(2)$ .

Рекуррентная последовательность с линейной функцией обратной связи вида (1) может иметь максимальный период  $2^n - 1$ , т.е.  $2^n$  возможных состояний регистра, за исключением нулевой комбинации. Такую последовательность называют псевдслучайной последовательностью максимальной длины над полем  $GF(2)$  (ПСПМД), или  $M$ -последовательностью. Для ее построения необходимо и достаточно, чтобы характеристический полином являлся примитивным полиномом [8] над полем  $GF(2)$ , а начальное состояние – отличным от нулевого. Кодовые шкалы на основе ПСПМД имеют информационную емкость  $2^n - 1$  и носят название псевдслучайные кодовые шкалы (ПСКШ).

$M$ -последовательности относятся к классу циклических кодов и могут задаваться с помощью порождающего полинома [8]

$$g(x) = \frac{x^{2^n-1} + 1}{h(x)},$$

где  $h(x)$  – характеристический полином, задаваемый (3).

Для каждой ПСПМД длиной  $M = 2^n - 1$  существует ровно  $2^n - 1$  различных циклических сдвигов, которые могут быть получены путем умножения порождающего полинома  $g(x)$  на  $x^I$ , где  $I = 0, 1, \dots, M - 1$ . Порядок размещения на ПСКШ  $n$  считывающих элементов определяется через запись циклических сдвигов, т.е. СЭ с номером  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, n$ ) ставит в соответствие с  $I_m$  циклический сдвиг  $x^{I_m} g(x)$   $M$ -последовательности. Тогда полином, определяющий порядок размещения на шкале  $n$  СЭ, имеет вид [4]

$$r(x) = x^{I_1} + x^{I_2} + \dots + x^{I_n}, \quad I_m \in 0, 1, \dots, M - 1. \quad (4)$$

Между тем псевдослучайные последовательности с нулевой комбинацией получаются с помощью регистра сдвига с нелинейной функцией обратной связи

$$\tilde{f}(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}) = c_0 x_0 + c_1 x_1 + \dots + c_{n-1} x_{n-1} + \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots \bar{x}_{n-1}, \quad (5)$$

где  $\bar{x}$  является дополнением  $x$ ;  $c_i \in GF(2)$ . Такие последовательности имеют период  $2^n$  и являются частным случаем последовательностей де Брейна.

Символы нелинейной последовательности удовлетворяют рекуррентному соотношению

$$b_{n+j} = h_{n-1} b_{n-1+j} + h_{n-2} b_{n-2+j} + \dots + h_1 b_{j+1} + b_j + \bar{b}_{n-1+j} \bar{b}_{n-2+j} \dots \bar{b}_{j+1}, \quad (6)$$

где  $j = 0, 1, \dots$ . Начальные символы последовательности  $b_0 b_1 \dots b_{n-1}$  выбираются произвольно. Рекуррентное соотношение (6) отличается от соотношения для линейных псевдослучайных последовательностей (2) только наличием последнего слагаемого – произведения значений  $n-1$  символов.

Кодовые шкалы на основе нелинейных рекуррентных последовательностей имеют разрешающую способность  $q = 360^\circ/2^n$  и носят название нелинейные кодовые шкалы (НКШ). Для их построения характеристический полином вида (3), как и в случае ПСКШ, должен быть примитивным над полем  $GF(2)$ .

Размещение СЭ на НКШ, в отличие от ПСКШ, в силу нелинейных свойств применяемых последовательностей может осуществляться только единственным образом, причем с шагом, равным одному кванту, т.е. в соответствии с полиномом размещения

$$\tilde{r}(x) = 1 + x + x^2 + \dots + x^{n-1}. \quad (7)$$

Единственность такого размещения отражает существенный недостаток НКШ, ограничивающий их применение для построения малогабаритных высокоразрядных ЦПУ.

### Принцип композиции рекурсивных кодовых шкал

Преобразователи считывания представляют собой систему из  $l$  параллельно работающих  $N_l$ -разрядных преобразователей угла. Такой подход позволяет комбинировать КД, основанные на разных базовых методах пространственного кодирования, на каждой из которых происходит преобразование перемещения в соответствующую группу разрядов выходного кода [3, 10].

Пусть ЦПУ имеет  $p$  КД в порядке от старшей дорожки, с которой считывается старший по весу разряд, до младшей дорожки, с которой считывается младший по весу разряд. Период функции преобразования каждой КД –  $\Psi_l$ , где  $l = \overline{1, p}$ . В случае однооборотного ЦПУ с диапазоном изменения угла от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  для первой КД  $\Psi_1 = 360^\circ$ , а для каждой последующей –

$$\Psi_{l+1} = \frac{1}{N_l} \Psi_l,$$

где  $N_l$  – число уровней квантования  $l$ -й кодовой дорожки.

В общем случае информационная емкость преобразователя равна

$$N = \prod_{l=1}^p N_l,$$

а период функции преобразования каждой дорожки составляет

$$\Psi_{l+1} = \frac{360^\circ}{\prod_{i=1}^l N_i}.$$

Пусть старшая КД строится в соответствии с символами РП длиной  $D_1$ . Пусть следующая за старшей КД также строится в соответствии с символами РП длиной  $D_2$ , причем в угловом секторе, соответствующем одному символу последовательности старшей КД, укладывается один период последовательности младшей КД, т.е. последовательность длиной  $D_2$  на младшей дорожке имеет  $D_1$  периодов  $\Psi_2 = \Psi_1/N_1 = 360^\circ/D_1$ . Такое построение аналогично структуре регулярных двоичных КШ, в которых одному символу из  $\{0,1\}$  старшей дорожки соответствует последовательность 01 младшей дорожки.

Кодовую шкалу, представляющую собой композицию РКШ и регулярных КШ, в которой одному символу старшей КД ставится в соответствие один период РП на следующей КД, будем называть псевдoreгулярной кодовой шкалой (ПРКШ).

### Метод построения ПРКШ на основе нелинейных последовательностей

Основные этапы метода заключаются в следующем.

1. Для построения старшей КД выбирается характеристический полином вида (3), который должен являться примитивным над полем  $GF(2)$ . Информационная емкость старшей КД  $N_1$  будет определяться порядком полинома  $n_1$ .
2. Строится один период последовательности длиной  $D_1 = 2^{n_1}$ . Для этого произвольным образом выбираются начальные значения  $n_1$  символов последовательности. Остальные  $2^{n_1} - n_1$  символов генерируются в соответствии с рекуррентным соотношением (6) при  $j = 0, 1, \dots, 2^{n_1} - n_1 - 1$ .
3. Градации старшей КД выполняются в соответствии с символами полученной последовательности.
4. Производится размещение на КД  $n_1$  считывающих элементов в соответствии с полиномом размещения (7), т.е. с шагом в один квант  $q_1 = \Psi_2$ .
5. Для построения младшей КД выбирается характеристический полином вида (3), который также должен являться примитивным над полем  $GF(2)$ . Информационная емкость младшей КД  $N_2$  будет определяться порядком полинома  $n_2$ .
6. Строятся  $D_1$  периодов последовательности длиной  $D_2 = 2^{n_2}$ . Для этого произвольно выбираются начальные значения  $n_2$  символов последовательности. Остальные  $D_1 \cdot 2^{n_2} - n_2$  символов генерируются в соответствии с рекуррентным соотношением (6) при  $j = 0, 1, \dots, D_1 \cdot 2^{n_2} - n_2 - 1$ .
7. Градации младшей КД выполняются в соответствии с символами полученной последовательности. Квант младшей дорожки  $q_2 = \Psi_3 = 360^\circ/N_1N_2$ .
8. Производится размещение на КД  $n_2$  считывающих элементов в соответствии с полиномом размещения (7). В отличие от старшей КД размещение каждого СЭ может осуществляться не единственным образом, а в соответствии с соотношением  $\alpha\Psi_2 + \Psi_3$ ,  $\alpha \in \{0, 1, \dots, 2^{n_1} - 1\}$ . Коэффициент  $\alpha$  выбирается при проектировании ЦПУ из конструктивных соображений и позволяет наиболее рационально и технологично осуществить компоновку СЭ вдоль кодовой шкалы преобразователя.

Информационная емкость ЦПУ с такой ПРКШ, состоящей из двух дорожек, составит  $N = N_1N_2$ . Заметим, что число КД в общем случае не ограничено двумя.

### Пример построения ПРКШ

Рассмотрим нелинейную РП длиной  $2^3(n_1 = 3)$ , для построения которой будем использовать примитивный полином  $h(x) = x^3 + x + 1$ , начальные значения  $b_0b_1b_2$  зададим как 000. Рекуррентное соотношение последовательности, согласно (6), примет вид

$$b_{3+j} = b_j + b_{1+j} + \bar{b}_{1+j}\bar{b}_{2+j}.$$

Сгенерированную таким образом последовательность 00010111 используем для построения кодовой дорожки ЦПУ. При размещении трех считывающих элементов вдоль этой дорожки с шагом в один

квант получим  $2^3 = 8$  значений кода. Эту трехразрядную дорожку возьмем в качестве старшей дорожки  $T_1$  ЦПУ, тогда период второй дорожки будет  $\Psi_2 = 360^\circ/8 = 45^\circ$ . Это же значение  $\Psi_2$  является дискретностью преобразования (квантом) первой дорожки.

Вторую дорожку большего диаметра также выполним в соответствии с символами приведенной выше последовательности. Дорожка  $T_2$  будет содержать 8 периодов последовательности 00010111, т.е. примет вид

000101110001011100010111000101110001011100010111000101110001011100010111.

При этом каждый период геометрически будет заполнять дугу окружности диаметра второй дорожки с центральным углом  $\Psi_2$ , который соответствует одному символу старшей дорожки  $T_1$ . Тогда шаг размещения считывающих элементов вдоль второй дорожки, благодаря тому, что она содержит 8 периодов последовательности, составит  $\alpha \cdot 360^\circ/8 + 360^\circ/64$ , где  $\alpha \in \{0, 1, \dots, 2^3 - 1\}$ . Коэффициент  $\alpha$  выбирается при проектировании ЦПУ.

Линейная развертка рассматриваемой в примере КШ приведена на рис. 1. ЦПУ с такой кодовой шкалой, состоящей из двух дорожек, обладает разрешающей способностью  $q_2 = 360^\circ/2^6$ , т.е. имеет 64 значения кода угла. На рис. 2 показана круговая КШ с одним из вариантов размещения считывающих элементов.

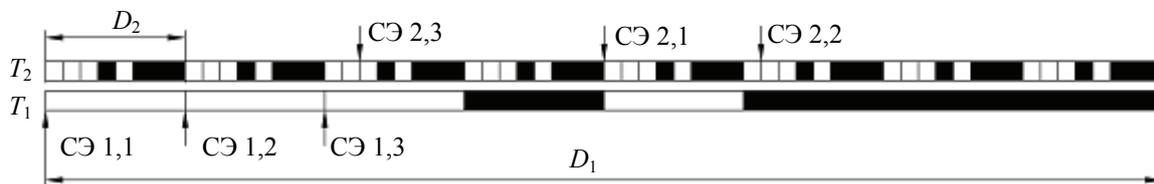


Рис. 1. Линейная развертка шестиразрядной ПРКШ

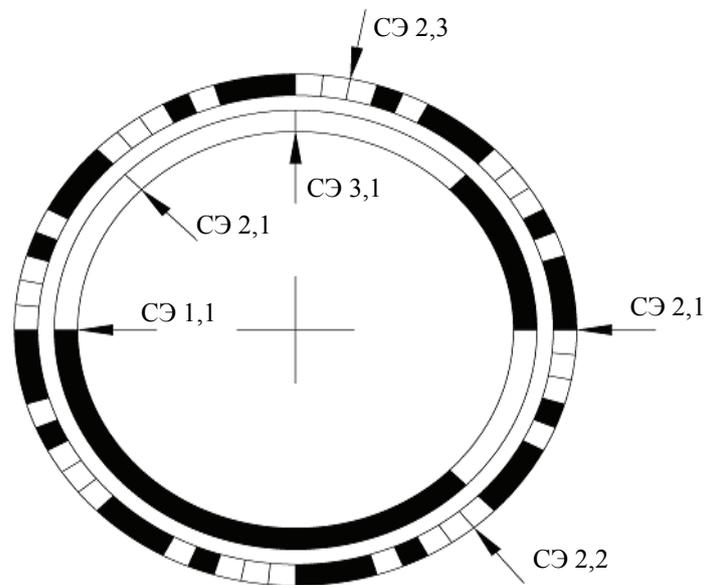


Рис. 2. Шестиразрядная ПРКШ

### Заключение

Предлагаемый принцип построения ПРКШ позволяет строить высокоразрядные цифровые преобразователи угла в уменьшенных габаритах с учетом технологических и конструктивных ограничений, таких как минимальная ширина градации и шаг размещения считывающих элементов. Преодоление этих ограничений особенно актуально при построении фотоэлектрических цифровых преобразователей угла, которым присущи высокая точность, технологичность, бесконтактность и ряд других преимуществ. Так, построенные по разработанному методу кодовые шкалы позволили создать в ОАО «Авангард» 18- и 20-разрядные фотоэлектрические ЦПУ с диаметрами всего 80 мм и 120 мм соответственно.

## Литература

1. Преснухин Л.Н. Фотоэлектрические преобразователи информации / Л.Н. Преснухин, В.Ф. Шаньгин, С.А. Майоров, С.А. Меськин. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
2. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла: принципы построения, теория точности, методы контроля. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
3. Асиновский Э.Н. и др. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Под ред. А.А. Ахметжанова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
4. Азов А.К., Ожиганов А.А., Тарасюк М.В. Рекурсивные кодовые шкалы // Информационные технологии. – 1998. – № 6. – С. 39–43.
5. Ожиганов А.А., Прибыткин П.А. Кодовые шкалы на основе нелинейных последовательностей для преобразователей угловых перемещений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – Вып. 4. – С. 81–84.
6. Ожиганов А.А., Прибыткин П.А. Использование нелинейных последовательностей при построении двухдорожечных кодовых шкал для преобразователей угловых перемещений // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 7. – С. 39–44.
7. Ожиганов А.А., Прибыткин П.А. Анализ возможностей применения корректирующих кодов в рекурсивных кодовых шкалах // Сб. научных трудов аспирантов, соискателей и студентов магистерской подготовки ОАО «Авангард». – 2010. – Вып. 2. – С. 70–77.
8. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля. В 2-х т. Т. 2. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 822 с.
9. Macwilliams J., Sloane N. Pseudo-random sequences and arrays // Proceedings of the IEEE. – 1976. – V. 64. – № 12.
10. Габидулин М.А. Фотоэлектрические цифровые преобразователи перемещений пространственного кодирования // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 272–281.

*Ожиганов Александр Аркадьевич* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ojiganov@mail.ifmo.ru  
*Прибыткин Павел Александрович* – ОАО «Авангард», начальник научно-исследовательского сектора, pavel.pribitkin@gmail.com

УДК 004.043

## РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ШУМОПОДАВЛЕНИЯ В РЕЧЕВОМ ТРАКТЕ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА БАЗЕ СБИС

С.О. Чураев, А.Д. Адамова, Т.Т. Палташев

Приведен анализ вопросов аппаратной реализации комплексных алгоритмов цифровой фильтрации для речевого канала систем сотовой связи и последующей их коммерциализации на основе полузаказных СБИС и ПЛИС. Использован алгоритм адаптивного шумоподавления с применением прямого/обратного преобразования Фурье и фильтрации речевого сигнала по методу Винера.

**Ключевые слова:** фильтр Винера, временные домены, частотные домены, тактовые частоты, двухпортовая память, конечный автомат.

## Введение

В данной работе отражены актуальные вопросы аппаратной реализации комплексных алгоритмов цифровой фильтрации в заказных сверхбольших интегральных схемах (СБИС) и программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [1–5]. Рассматривается переход от алгоритмов, реализованных программно на языке С и адаптированных под микропроцессорную платформу, к проектированию СБИС на языке Verilog [6–8]. Применен алгоритм адаптивного подавления внешнего акустического шума, проникающего в канал связи вместе с речью человека через микрофон и не несущего полезной информации [1–5]. Для решения этой задачи использовано прямое/обратное преобразование Фурье и винеровская фильтрация речевого сигнала. Конечной целью является создание законченного RTL кода на языке Verilog для последующего изготовления специализированного ядра заказной СБИС шумоподавления и установки в телефоны компаний-производителей систем мобильной связи. Проектирование СБИС обусловлено требованиями увеличения скорости обработки данных и снижения энергопотребления подобных устройств. Необходимость выполнения данного проекта также продиктована требованием заказчиков снижения цены ключевых компонентов продукта в 5–10 раз. Далее рассмотрены важнейшие моменты аппаратной реализации [7].

### Системное аппаратное решение

Для комплексного тестирования системы разработано устройство, структурная схема которого приведена на рис. 1. В его состав входят: аудиокодек для аналогово-цифрового и цифро-аналогового преобразования сигнала и формирования цифрового потока для ПЛИС (audio codec); специальный конфигурационно-тестовый порт RS-232 для связи с компьютером (RS-232); ПЛИС для формирования кадров, выполнения прямого/обратного преобразования Фурье и проверки винеровского алгоритма фильтрации (FPGA Virtex-4); персональный компьютер для обеспечения подачи тестового входного сигнала с шумом и записи выходного очищенного сигнала (PC) [6, 7].

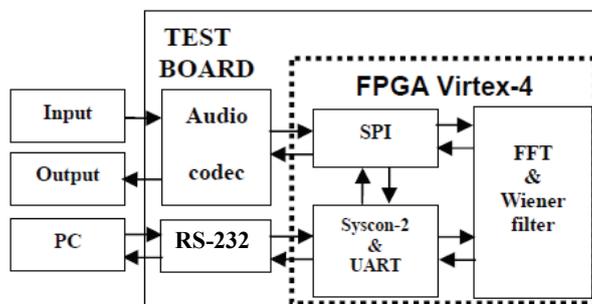


Рис. 1. Структурная схема аппаратного решения устройства фильтрации

### Реализация алгоритма в ПЛИС

Входной речевой сигнал, оцифрованный с частотой дискретизации 8 кГц, разделяется на два кадра по 32 16-битных отсчета в каждом, которые формируются во входной двухпортовой памяти размером 64×16 бит. После того, как формируется первый кадр из 32 значений, начинается формирование второго кадра с адреса 33, и далее до 64. Одновременно через второй порт, но на значительно более высокой скорости, происходит считывание данных и их преобразование модулями Фурье и винеровской фильтрации. По окончании работы эти модули записывают информацию в выходную двухпортовую память, где обработанные данные будут в дальнейшем прочитаны низкоскоростным устройством связи с помощью аудиокодека. Таким образом, к моменту формирования второго кадра вся необходимая работа по фильтрации сигнала первого кадра будет завершена. Соответственно, по сигналу готовности заполнения данных второго кадра (с 33 по 64) будет проведена аналогичная работа, по мере того как заполняется первая половина памяти с 1 по 32 адрес, и т.д.

### Особенности передачи данных при переходе через временные домены внутри ПЛИС

Попытка реализовать схему, используя классические методы цифрового преобразования, натолкнулась на противоречия между расчетом тактовой частоты ядра, его размером, скоростью работы и энергопотреблением системы [6, 7]. При реализации алгоритма в одном временном домене выяснилось, что скорость работы ядра недостаточна для выполнения всех шагов. По этой причине схема была разделена на несколько временных доменов, что позволило увеличить производительность каждого модуля по отдельности, а также снизить энергопотребление за счет снижения тактовой частоты модулей.

Говоря об особенностях реализации алгоритма, следует отметить ситуацию, при которой модули, работая синхронно, должны обеспечить передачу данных между соседними модулями, работающими в разных временных доменах [8]. Для синхронизации передачи данных реализовано три уровня контроля и подтверждения передачи данных:

1. асинхронный;
2. синхронный протокол обмена 2-х модулей типа «handshake»;
3. системный контроллер кадров.

Асинхронный контроль подразумевает предотвращение метастабильных состояний путем введения цепочек триггеров в цепях передачи данных между модулями при выполнении переходов через границы тактовых доменов. Синхронный протокол обеспечивает контроль состояний двух соседних модулей и обрабатывает протоколирование сигналов готовности, приема, передачи, запроса, а также сигнализации о переходе в запрещенные состояния.

Третий уровень контроля предоставляет широкие возможности контроля и управления объектом: отслеживание номера кадра и номера процесса (шага), подсчет контрольной суммы проходящих данных, обеспечение режима паузы, сброса и пошагового выполнения, обеспечение различных режимов передачи данных в обход некоторых модулей (режим BYPASS).

**Двухпортовая память для реализации высокоскоростного алгоритма фильтрации**

Как уже отмечалось, ключевым элементом схемы служит двухпортовая межмодульная память (рис. 2). Применение двухпортовой памяти оправдано удобством независимой адресации чтения или записи данных разных ее областей. Таким образом, появляется возможность последовательно передавать обрабатываемые данные с высокой скоростью через все модули ПЛИС/СБИС. Процесс передачи данных от одного модуля к другому через двухпортовую память накладывает некоторые ограничения на ее работу. Предусматривается защита от чтения данных, которые еще не записались в память (конфликт RAW). Аналогично, не проводится запись в область памяти, которая читается другим модулем (конфликт WAR). Таким образом, при обмене данными разработан и реализован синхронный протокол обмена двух модулей типа «handshake» [6].

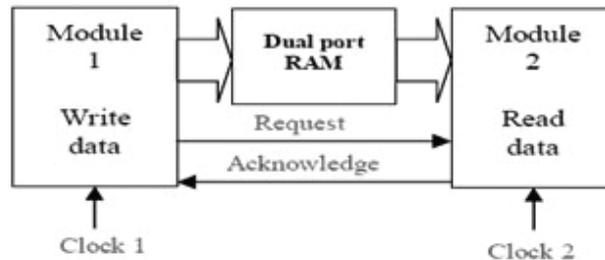


Рис. 2. Схема передачи данных через двухпортовую память

**Протокол гарантированной передачи данных между временными доменами**

Разработан протокол обмена данными с использованием двухпортовой памяти для межмодульного интерфейса в различных временных (частотных) доменах. В системе реализуется конечный автомат состояний для проверки этапов выполнения передачи данных [8]. На рис. 3 представлены временные диаграммы передачи данных между временными доменами.

Первый модуль (ведущий) работает на тактовой частоте Clock 1 и формирует сигнал запроса на чтение (Request). Второй модуль (ведомый), работающий на частоте Clock 2, формирует сигнал ответа (Acknowledge) и ожидает снятия сигнала от первого модуля (Request). При ответе первого модуля и установке в ноль сигнала Request второй модуль выполняет чтение и обработку данных из двухпортовой памяти, а затем переводит сигнал Acknowledge в начальное состояние. В итоге два модуля переходят в исходное состояние. Таким образом, можно выделить пять основных состояний:

1. запрос на передачу данных ведущего модуля;
2. подтверждение запроса от ведомого модуля;
3. снятие запроса;
4. чтение данных ведомым модулем из второго порта двухпортовой RAM;
5. снятие подтверждения и переход обоих модулей в исходное состояние.

Таким образом, асинхронные данные могут быть гарантированно переданы от одного модуля к другому.

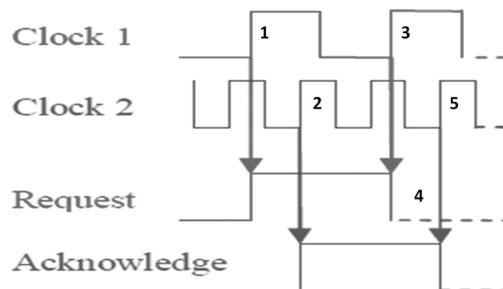


Рис. 3. Временные диаграммы передачи данных между временными доменами

**Оптимизация скорости работы и размера конвейера**

Под конвейером будем понимать последовательность элементов памяти, разделенных логическими устройствами (рис. 4). По мере того, как решается проблема недостаточной производительности СБИС, возникает проблема оптимизации конвейера [8]. Максимально возможная тактовая частота в одном временном домене будет определяться наибольшей возможной тактовой частотой самого медленного из модулей. Тактовая частота, на которой может работать модуль, определяется временем прохожде-

ния сигнала от элементов памяти через логические элементы к последующим элементам памяти. Если тактовые частоты сильно различны, то будут происходить существенные потери производительности всего конвейера. С целью выравнивания скоростей работы отдельных частей конвейера предложено перераспределять часть логических элементов между его различными участками. Таким образом, общая задержка обработки данных в одном временном домене будет иметь тенденцию к снижению.

Одновременно выполнены не только оптимизация и перенос логических элементов внутри одного домена, но также и перенос функциональности между различными временными доменами. Это обусловлено требованиями уменьшения потерь скорости при передаче данных между различными временными доменами через двухпортовую память и связано с особенностями структуры ПЛИС при синтезе и размещении элементов при выборе оптимального соотношения количества логических элементов и блочной памяти в ПЛИС.

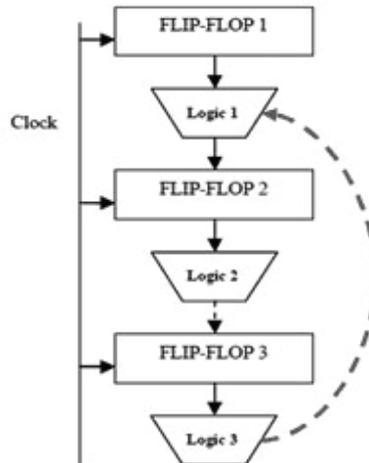


Рис. 4. Конвейер

#### Синхронизация асинхронных событий. Решение проблемы метастабильности в ПЛИС

Многие системы, предназначенные для совместной работы, имеют асинхронные входные сигналы, которые должны быть синхронизированы в различных временных доменах [8]. В общем случае изменение сигналов может происходить в любое время. Обычный триггер, получая асинхронный сигнал на вход, может перейти в метастабильное состояние, если есть нарушения во времени предустановки или удержания данных по отношению к тактовому сигналу (setup&hold). В предложенном проекте это состояние предотвращается посредством использования последовательного соединения двух и более триггеров (рис. 5).

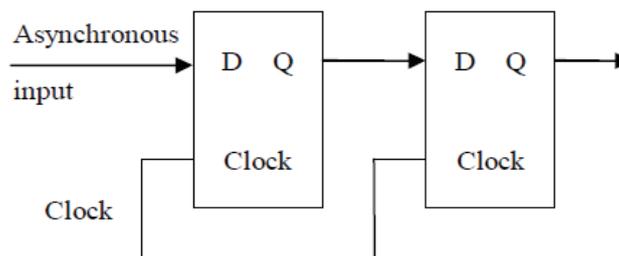


Рис. 5. Синхронизация передачи асинхронных данных с помощью двух триггеров

#### Рекомендации по аппаратной реализации комплексных алгоритмов фильтрации

В процессе синтеза и размещения элементов особое внимание уделено обнаружению и удалению избыточной логики, обнаружению комбинационных петель обратной связи, поиску состояний холостого хода или простоя, определения неиспользуемых (пустых) состояний конечных автоматов, определения и слияния эквивалентных состояний конечных автоматов [6]. Предложены правила проектирования архитектуры ПЛИС для реализации алгоритмов фильтрации:

- не использовать задержки в RTL коде (только на поведенческом верхнем уровне окружения);
- разрабатывать полностью синхронный дизайн в границах одного тактового домена;
- выполнять рекомендации по переходу между временными доменами; контролировать все возможные этапы передачи данных; избегать метастабильности в схемах;

- использовать различные схемы самотестирования (BIST) для контроля качества, тестирования и работоспособности устройства;
- для быстрого обнаружения ошибок при отладке RTL кода применять высокореалистичную модель тестовой среды; использовать случайные и детерминированные задержки, вводить дрожание тактовых сигналов и сигналов данных; не рекомендуется использование триггеров, работающих по уровню (LATCH);
- спроектировать высокодетализированный командный файл синтеза с указанием всех уникальных имен регистров и связей из RTL кода.

### Заключение

Предложенные в работе архитектурные решения реализованы в коммерческом проекте по разработке модуля СБИС для подавления шума в речевом тракте систем сотовой связи компаний-производителей мобильного оборудования Юго-Восточной Азии.

Обоснована необходимость использования двухпортовой памяти с целью увеличения производительности системы, определен базовый протокол обмена данными между двумя соседними модулями, работающими в разных временных доменах. Решены вопросы увеличения производительности ядра путем оптимизации структуры конвейера, а также переноса функциональности между разными временными доменами. Разработаны базовые рекомендации проектирования для сходных проектов и задач [6].

Выполнен синтез RTL кода и сравнительный анализ количества компонентов системы до и после оптимизации (таблица). Правильно выполненная реализация алгоритма на языке Verilog и последующая оптимизация схемы при синтезе позволяют экономить площадь кристалла, увеличивать быстродействие, уменьшать энергопотребление устройства, что актуально для работы мобильных устройств.

ДО ОПТИМИЗАЦИИ	ПОСЛЕ ОПТИМИЗАЦИИ
Selected Device : 4vlx25sf363-10	Selected Device : 4vlx25sf363-10
Number of Slices : 31429 out of 10752 292%	Number of Slices : 8053 out of 10752 74%
Number of Slice Flip Flops: 23509 out of 21504 109%	Number of Slice Flip Flops : 7071 out of 21504 32%
Number of 4 input LUTs : 55301 out of 21504 257%	Number of 4 input LUTs : 16474 out of 21504 76%
Number used as logic : 55250	Number used as logic : 16312
Number used as Shift registers: 37	Number used as Shift registers : 83
Number used as RAMs : 14	Number used as RAMs : 79
Number of IOs : 16	Number of IOs : 16
Number of bonded IOBs : 16 out of 240 6%	Number of bonded IOBs : 16 out of 240 6%
Number of FIFO16/RAMB16s : 3 out of 72 4%	Number of FIFO16/RAMB16s : 3 out of 72 4%
Number used as RAMB16s : 3	Number used as RAMB16s : 3
Number of GCLKs : 8 out of 32 25%	Number of GCLKs : 8 out of 32 25%

Таблица. Распределение ресурсов до и после оптимизации

### Литература

1. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series / N. Wiener // New-York, 1949.
2. Advanced digital signal processing and noise reduction / S.V. Vaseghi // 3-rd ed. – Wiley. – 2006.
3. Обробка сигналів. Цифрова обробка дискретизованих сигналів / Е. Шрюфер. – Київ: – Либідь, 1992. – 294 с.
4. Сергиенко А.Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в Matlab [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://images.nature.web.ru/nature/2003/04/11/0001193683/06.pdf>, своб.
5. Курсы лекций: Часть 1. Цифровая обработка сигналов. Национальный технический университет Украины (Киевский политехнический институт) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aprodeus.narod.ru/teaching.htm>, своб.
6. FPGA FFT Implementation / S.O. Churayev, B.T. Matkarimov // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'09), September 18–21, 2009. – Moscow. – 2009. – P. 96–98.
7. Churayev S.O., Matkarimov B.T. FPGA implementation of noise reduction system for mobile devices, Korean Scientific & Engineering society «КАНАК». – № 3(25). – P. 45–48. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.ntokaxak.kz](http://www.ntokaxak.kz), своб.
8. Advanced Digital Design with the Verilog HDL / M.D. Ciletti // Prentice Hall. – 2004.

- Чураев Сергей Олегович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, [serg\\_vhdl@yahoo.com](mailto:serg_vhdl@yahoo.com)
- Адамова Айгуль Дюсенбиновна** – Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, кандидат технических наук, докторант, [aika\\_pavl@mail.ru](mailto:aika_pavl@mail.ru)
- Палташев Тимур Турсунович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Северо-Западный политехнический университет, Фримонт, Калифорния, доктор технических наук, профессор, [timpal@mail.npu.edu](mailto:timpal@mail.npu.edu)

УДК 004.052

## **ВНЕСЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В АВТОМАТНЫЕ ПРОГРАММЫ**

**П.В. Федотов, О.Г. Степанов**

Описан подход к внесению изменений в автоматные программы, позволяющий уменьшить число модификаций, которые могут привести к появлению ошибок. Подход основан на применении рефакторингов автоматных программ – последовательности небольших эквивалентных преобразований, сохраняющих поведение. Предложен ряд рефакторингов автоматных программ, расширяющий набор классических рефакторингов на случай автоматного программирования.

**Ключевые слова:** автоматное программирование, автоматы, внесение изменений, рефакторинг.

### **Введение**

Какой бы продуманной ни была архитектура программной системы, при изменении требований часто приходится модифицировать ее код. При произвольном изменении программы велик риск внесения ошибок. Одним из распространенных приемов, используемых при модификации кода, является рефакторинг – полное или частичное преобразование структуры программы с сохранением ее поведения [1]. Примерами рефакторингов в объектно-ориентированных программах являются переименование класса, выделение интерфейса, перемещение метода и т.д. Каждый вид рефактинга реализует определенное изменение структуры программы, состоящее из набора небольших и технически простых шагов, позволяющих сделать процесс внесения изменений контролируемым.

Автоматные программы имеют свою специфику, и применение большей части стандартных рефакторингов в этих программах невозможно. Таким образом, при изменении требований автоматная программа должна быть спроектирована «с нуля» на основе новых требований. Этот процесс является неоправданно трудоемким, особенно в случае, когда изменения требований незначительны. Альтернативой является системное внесение изменений в разработанную программу, что может привести к возникновению ошибок. Для решения описанной проблемы предлагается ряд рефакторингов автоматных программ и метод, позволяющий упростить процесс внесения изменений в автоматные программы и уменьшить число модификаций, которые могут привести к появлению ошибок.

### **Классификация изменений автоматных программ**

С появлением большого числа программ с явным выделением состояний возникает необходимость в поддержке таких программ. В существующую программу вносят изменения следующих типов:

- изменения в программе в соответствии с изменившимися требованиями к ней;
- исправление ошибок;
- изменения в программе, имеющие целью облегчить понимание ее работы и упростить модификацию, не затрагивая наблюдаемого поведения.

По аналогии с существующим понятием рефактинга [1] объектно-ориентированных программ будем называть изменения последнего типа, применяемые к программам с явным выделением состояний, рефактингом автоматных программ.

Часто изменения, вносимые в программу с явным выделением состояний, достаточно сложны, а потому порождают массу проблем, плохо поддающихся анализу. С другой стороны, существует набор базовых изменений, которые являются примитивными изменениями какой-то одной составляющей графа переходов автомата. Такие изменения достаточно хорошо поддаются описанию. Остальные, более сложные, составные изменения можно представить в виде набора базовых изменений. В отдельный класс выделяются рефактинги автоматов. Как было сказано выше, рефактинги не меняют поведение программы и применяются для улучшения ее структуры.

### **Базовые изменения автоматов**

На основе базовых изменений строятся более сложные сценарии реконфигурации автомата. Базовые изменения могут быть деструктивными и нарушать полноту и непротиворечивость графа переходов, а также семантические свойства. Конкретные проблемы, на которые стоит обратить внимание, при осуществлении базовых изменений рассмотрены в работе [2].

Базовые изменения автоматов:

- добавление состояния;
- удаление состояния;
- установка начального состояния;
- снятие начального состояния;
- добавление конечного состояния;
- удаление конечного состояния;
- добавление перехода;

- изменение события на переходе;
- изменение условия на переходе;
- удаление перехода;
- перемещение перехода:
  - изменение начального состояния;
  - изменение конечного состояния.

### Рефакторинг автоматных программ

Описывается каталог рефакторингов автоматных программ. Выбор рефакторингов для каталога основан на наборе экспериментов. В качестве основы были взяты несколько автоматов, созданных студентами кафедры «Компьютерные технологии» СПбГУ ИТМО в ходе выполнения курсовых работ по курсу «Применение автоматов в программировании». Далее производились изменения требований к автомату, основанные на анализе предметной области. В соответствии с изменениями требовалось изменить структуру автомата. При этом часто даже простые изменения спецификации требовали значительной модификации графа переходов, так как его исходная структура оказывалась не приспособленной к внедряемому изменению. Для обеспечения совместимости структуры автомата и изменения спецификации требовалось произвести рефакторинг – модифицировать структуру автомата таким образом, чтобы изменения, вызванные изменившейся спецификацией, естественно вписались в новую структуру. На основе таких изменений и был разработан нижеприведенный каталог рефакторингов автоматных программ.

#### Группировка состояний

*Описание.* Несколько простых состояний объединяются в группу состояний. При этом добавляются групповые переходы, заменяющие одинаковые переходы, исходящие из всех группируемых состояний. Состояния, объединяемые в группу, могут иметь по несколько одинаковых переходов, в этом случае добавляется несколько групповых переходов.

*Мотивация.* Часто автомат имеет несколько состояний, которые имеют одинаковые переходы в другие состояния автомата. В этом случае можно выделить группу состояний, упростив структуру автомата.

*Пример.* Рассмотрим фрагмент графа переходов автомата «Панель в кабине лифта», отвечающий за выключение ламп в кнопках. Автомат имеет следующие пять состояний:

0. кнопки погашены;
1. светится «1»;
2. светится «2»;
3. светится «3»;
4. светится «S».

При наступлении события  $e$  («Выключение лампы в кнопке») в каждом из состояний 1–4 автомат должен перейти в состояние 0. Такое поведение реализуется графом переходов (рис. 1).

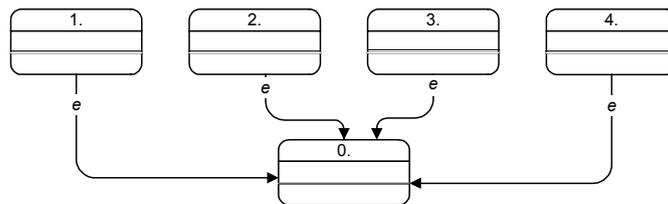


Рис. 1. Граф переходов без группировки состояний

Так как переходы из состояний 1–4 идентичны, их можно сгруппировать и соответствующим образом изменить конфигурацию автомата (рис. 2).

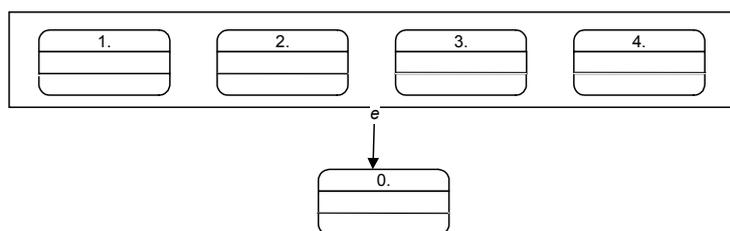


Рис. 2. Граф переходов с группировкой состояний

*Техника.* Для объединения состояний  $s_1, s_2, \dots, s_k$  в группу необходимо выполнить следующие действия.

1. Добавить группу  $g$ , объединяющую состояния  $s_1, s_2, \dots, s_k$ .
2. Выбрать один переход  $t$ , исходящий из  $s_1$ , который требуется заменить групповым.
3. Убедиться, что каждое из состояний  $s_2, \dots, s_k$  имеет переход с такими же атрибутами, что и  $t$  (под атрибутами понимаются конечное состояние, событие, условие и выходные воздействия).
4. Добавить переход, исходящий из группы  $g$  и имеющий те же атрибуты, что и  $t$ .
5. Удалить переходы, отмеченные в пунктах 2, 3.
6. Для оставшихся переходов, которые нужно заменить групповыми, повторить шаги 2–6.

**Удаление группы состояний**

*Описание.* При удалении группы состояний все исходящие из него переходы добавляются в состояния, находящиеся в группе, после чего сгруппированные состояния выносятся из группы.

*Мотивация.* Такое изменение полезно для последующей модификации автомата, если одно из состояний, входящее в удаляемую группу, изменяет логику поведения.

*Техника.* Для удаления группы  $g$ , объединяющей состояния  $s_1, s_2, \dots, s_k$ , необходимо выполнить следующие действия.

1. Выбрать переход  $t$ , исходящий из группы  $g$ .
2. Добавить переходы, исходящие из состояний  $s_1, s_2, \dots, s_k$ , с атрибутами перехода  $t$ .
3. Удалить переход  $t$ .
4. Для оставшихся переходов, исходящих из группы  $g$ , повторить шаги 1–4.
5. Удалить группу  $g$ .

**Слияние состояний**

*Описание.* Несколько состояний с одинаковыми исходящими переходами сливаются в одно состояние. При этом сохраняются переходы, соединяющие эти состояния с другими состояниями автомата.

Производить слияние состояний можно только в том случае, если одинаковы атрибуты переходов, исходящих из этих состояний, и одинаковы воздействия, вызываемые при входе в сливаемые состояния.

*Мотивация.* В процессе изменения программы может оказаться, что некоторые состояния дублируют логику поведения программы. В этом случае эти состояния могут быть заменены одним состоянием.

*Пример.* Проиллюстрируем применение рефакторинга «слияние состояний» на примере «Панель в кабине лифта», предложенном в разделе «Группировка состояний», с добавлением следующих состояний:

5. перегорела лампа в кнопке «1»;
6. перегорела лампа в кнопке «2»;
7. перегорела лампа в кнопке «3»;
8. перегорела лампа в кнопке «S»;
9. неисправность.

Измененный граф переходов представлен на рис. 3.

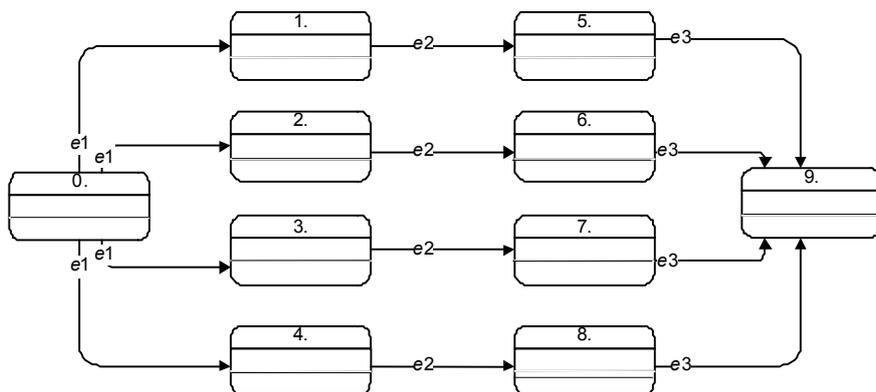


Рис. 3. Граф переходов автомата управления лифтом до слияния состояний 5–8

Граф переходов автомата после слияния состояний 5–8 в одно состояние представлен на рис. 4.

*Техника.* Для слияния состояний  $s_1, s_2, \dots, s_k$  необходимо выполнить следующие действия.

1. Убедиться, что состояния  $s_1, s_2, \dots, s_k$  имеют одинаковые воздействия, вызываемые при входе в состояние.

2. Убедиться, что состояния  $s_1, s_2, \dots, s_k$  имеют исходящие переходы с одинаковыми атрибутами и что эти переходы заканчиваются в одном и том же состоянии.
3. Изменить конечные состояния переходов, которые ведут в состояния  $s_2, \dots, s_k$ , на состояние  $s_1$ .
4. Удалить состояния  $s_2, \dots, s_k$ .

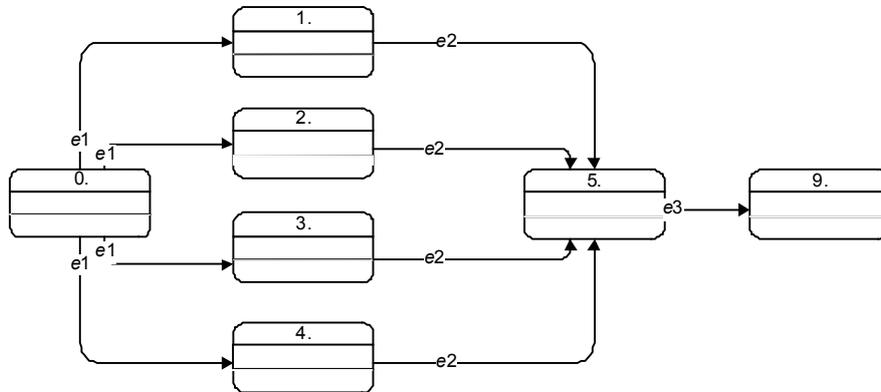


Рис. 4. Граф переходов после слияния состояний

**Выделение автомата**

Описание. Часть логики программы переносится в отдельный вызываемый автомат (рис. 5).

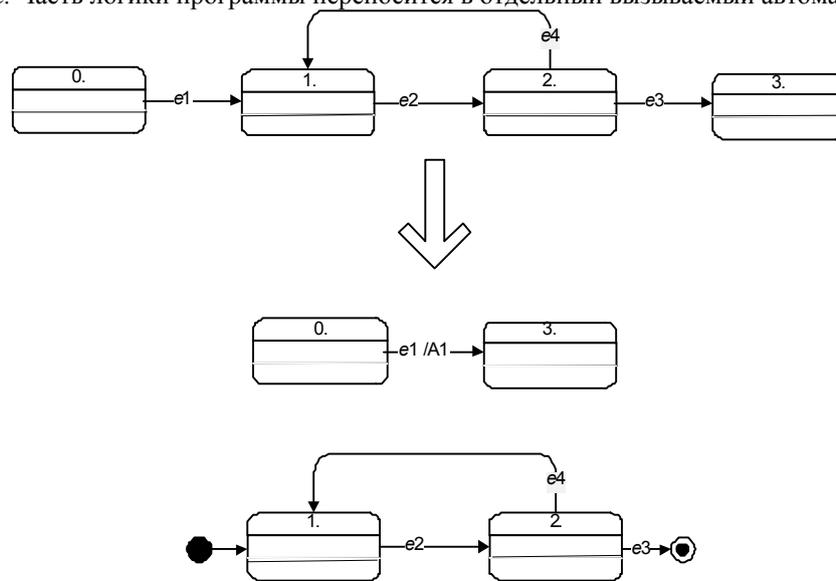


Рис. 5. Выделение автомата

*Мотивация.* Большие автоматы с множеством состояний, реализующие сразу несколько функций программы, сложны в поддержке. При внесении изменений в работу одной из функций необходимо учитывать реализацию других функций. Понимание работы такого автомата усложнено тем, что протоколы взаимодействия частей автомата, отвечающих за реализацию различных функций, не определены четко. Соответственно, поддержка сложных автоматов может привести к постоянному возникновению ошибок, обнаружить и исправить которые гораздо сложнее, чем в программах, в которых различные функции реализованы отдельными автоматами.

Для решения этой проблемы сложный автомат разделяют на несколько более простых, для каждого из которых четко определены обязанности и протоколы взаимодействия с другими автоматами и остальной программой. Такое разделение называют автоматной декомпозицией [3]. Автоматная декомпозиция обычно производится на этапе анализа требований, когда происходит построение изначального набора автоматов, которые требуется реализовать в программе. Однако часто в ходе эволюции програм-

мы один из автоматов накапливает реализацию чрезмерно большой функциональности. В этом случае требуется выполнить автоматную декомпозицию в уже существующей программе.

*Техника.* Для выделения состояний  $s_1, s_2, \dots, s_k$  и исходящих из них переходов  $t_1, t_2, \dots, t_l$  в вызываемый автомат необходимо выполнить следующие действия.

1. Убедиться, что среди состояний  $s_1, s_2, \dots, s_k$  есть ровно одно такое состояние  $s_i$ , в которое ведет хотя бы один переход из состояния, не входящего в множество  $s_1, s_2, \dots, s_k$ . Обозначим отмеченный переход как  $t'$ , а его начальное состояние –  $s'$ .
2. Убедиться, что из отмеченного состояния  $s_i$  достижимы все остальные состояния выбранного подмножества.
3. Убедиться, что переходы  $t_1, t_2, \dots, t_l$  имеют в качестве конечных состояний только состояния из множества  $s_1, s_2, \dots, s_k$  и ровно одно состояние  $s''$ , не входящее в это множество.
4. Создать новый автомат.
5. Создать в новом автомате состояния  $s'_1, s'_2, \dots, s'_k$ , соответствующие состояниям  $s_1, s_2, \dots, s_k$ , с сохранением выходных воздействий.
6. Добавить переходы между состояниями  $s'_1, s'_2, \dots, s'_k$  с такими же атрибутами, что и переходы между состояниями  $s_1, s_2, \dots, s_k$ .
7. Объявить состояние  $s'_i$  начальным в созданном автомате.
8. Выбрать среди состояний  $s_1, s_2, \dots, s_k$  такие, из которых есть переходы в  $s''$ . Пусть в созданном автомате им соответствуют состояния  $s'_{p_1}, s'_{p_2}, \dots, s'_{p_m}$ . Добавить из состояний  $s'_{p_1}, s'_{p_2}, \dots, s'_{p_m}$  переходы, ведущие в конечное состояние созданного автомата. Присвоить этим переходам такие же атрибуты, как у соответствующих переходов изначального автомата.
9. Добавить переход между состояниями  $s'$  и  $s''$  с атрибутами перехода  $t'$  и вызовом созданного автомата.
10. Удалить состояния  $s_1, s_2, \dots, s_k$ .

#### Встраивание вызываемого автомата

*Описание.* Вызываемый автомат встраивается в места своего вызова на переходах. Рефакторинг является обратным к предыдущему.

*Мотивация.* Размещением всей логики поведения программы в одном графе переходов можно добиться большей наглядности, так как такой граф можно охватить «одним взглядом».

*Техника* выполнения данного рефакторинга описана в работе [2].

#### Переименование состояния

*Описание.* Изменение имени состояния.

*Мотивация.* Описанные до сих пор рефакторинги изменяли структуру автомата, адаптировали ее для лучшей реализации текущей или изменившейся спецификации. Между тем, часто большей прозрачности и понятности структуры автомата можно добиться простой сменой имени одного или нескольких состояний. Часто при анализе автоматов и их рефакторинге требуется изменить имена состояний так, чтобы они лучше отражали их семантику. Четкое и полное выражение смысла состояния несколькими словами часто может оказаться нетривиальной задачей, которая не поддается решению с первого раза. Со временем, когда программист работает с задачей уже несколько дней или недель, в голову часто приходят более удачные метафоры.

*Техника.* Для изменения имени состояния необходимо выполнить следующие действия.

1. Убедиться, что новое имя является уникальным для графа переходов.
2. Изменить имя состояния.

#### Перемещение воздействия из состояния в переходы

*Описание.* Вызов выходного воздействия, совершаемого при входе в состояние, перемещается в переходы, входящие в рассматриваемое состояние (рис. 6).

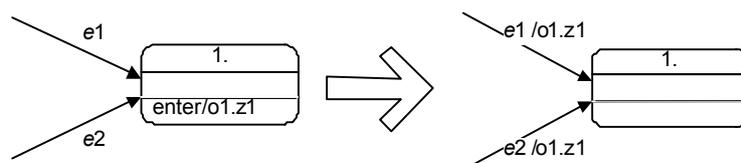


Рис. 6. Перемещение воздействия из состояния в переходы

Если при входе в состояние совершается несколько воздействий, то перемещается только первое. При необходимости рефакторинг можно повторить для остальных воздействий.

*Техника.* Для переноса воздействия из состояния в переходы необходимо выполнить следующие действия.

1. На каждом переходе, входящем в состояние, добавить вызов воздействия. Если на переходах уже были выходные воздействия, то добавляемое воздействие становится последним.
2. Вызов воздействия удалить из состояния.

### **Перемещение воздействия из переходов в состояние**

*Описание.* Вызовы одинаковых выходных воздействий, совершаемых на переходах, входящих в одно состояние, заменяются одним воздействием, выполняемым при входе в это состояние.

Описываемое изменение будет являться рефакторингом, если одинаковое выходное воздействие имеют все переходы, входящие в состояние.

*Техника* выполнения данного рефакторинга описана в работе [2].

### **Метод внесения изменений в автоматные программы**

Изменения, совершаемые исключительно в целях изменения структуры автомата без изменения его поведения, могут быть произведены совершенно безопасно, если они реализованы путем комбинирования нескольких рефакторингов. Остальные изменения призваны модифицировать логику работы автомата для исправления ошибок или адаптации автомата к изменившимся требованиям. Для проверки корректности таких изменений потребуется верифицировать получившийся автомат [4, 5] на соответствие оригинальной (в случае исправления ошибки) или новой (в случае адаптации автомата к изменившимся требованиям) спецификации. Результатом анализа такого сценария является коррекция либо автомата, либо спецификации. В данном случае предполагается, что спецификация верна, и в коррекции нуждается автомат. Точнее, в коррекции нуждается набор действий по изменению автомата, после которого он перестал (или не начал) удовлетворять спецификации.

Из рассмотрения заведомо можно исключить рефактинги: их безопасность формально доказана [6]. Таким образом, анализу должен подвергнуться набор базовых изменений, не являющихся частью рефакторингов. К сожалению, полностью автоматизировать такой анализ не удастся, и его потребуется, как минимум частично, выполнять вручную. Так как ручной анализ изменений – достаточно трудоемкий процесс, чем меньший набор изменений требуется анализировать, тем лучше.

Вышесказанное приводит к следующему методу внесения изменений в графы переходов автоматных программ. Основа метода заключается в разделении любого сложного изменения графа переходов на две фазы:

1. рефакторинг автомата;
2. набор модификаций, приводящих к изменению поведения автомата.

В ходе первой фазы автомат подготавливают к изменениям, модифицируя его структуру, не затрагивая при этом поведение (корректность этой фазы можно проверить автоматически, если спецификация исходного автомата была формализована). Целью рефакторинга является минимизация числа модификаций, выполняемых во второй фазе.

Предложенный метод позволяет избежать внесения в программу сложных изменений, с трудом поддающихся анализу. Наиболее сложные изменения доказуемо безопасны, потенциально опасные изменения просты.

Заключительным шагом должна стать верификация получившегося автомата на соответствие измененной формальной спецификации. При обнаружении несоответствия спецификации предложенный метод значительно упрощает процедуру поиска ошибок, так как набор изменений, направленный на отражение новых требований, минимален.

### **Заключение**

В работе предложен метод модификации автоматных программ, основанный на рефакторинге, уменьшающий число изменений, которые могут привести к появлению ошибок. Метод может применяться на практике благодаря разработанному каталогу рефакторингов. Предложенный метод может быть усовершенствован за счет автоматизации рефакторингов автоматных программ.

### **Литература**

1. Фаулер М. Рефакторинг: улучшение существующего кода. – СПб: Символ-Плюс, 2004. – 432 с.
2. Федотов П.В. Подход к безопасному внесению изменений в графы переходов автоматных систем. Кафедра «Технологии программирования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/papers/\\_fedotov\\_bak.pdf](http://is.ifmo.ru/papers/_fedotov_bak.pdf), свободный. – Яз. рус. (дата обращения 01.11.2010).

3. Поликарпова Н.И., Шальто А.А. Автоматное программирование. – СПб: Питер, 2010. – 176 с.
4. Кузьмин Е.В., Соколов В.А. Моделирование, спецификация и верификация «автоматных» программ // Программирование. – 2008. – № 1. – С. 1–23.
5. Вельдер С.Э., Шальто А.А. О верификации простых автоматных программ на основе метода Model Checking // Информационно-управляющие системы. – 2007. – № 3. – С. 285–288.
6. Степанов О.Г. Методы реализации автоматных объектно-ориентированных программ. Кафедра «Технологии программирования» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://is.ifmo.ru/disser/stepanov\\_disser.pdf](http://is.ifmo.ru/disser/stepanov_disser.pdf), свободный. – Яз. рус. (дата обращения 01.11.2010).

*Федотов Павел Валерьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [fedotov@rain.ifmo.ru](mailto:fedotov@rain.ifmo.ru)

*Степанов Олег Георгиевич*

– ООО «ИнтеллиДжей Лабс», кандидат технических наук, руководитель проекта, доцент, [oleg.stepanov@jetbrains.com](mailto:oleg.stepanov@jetbrains.com)

УДК 004.75, 004.772, 004.62

## **ПРОБЛЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕТЕВЫХ СЕРВИСОВ**

**А.М. Дергачев**

Рассматриваются основные проблемы, которые возникают при использовании сетевых сервисов на этапах поиска, выбора и интеграции. Рассмотрены качественные характеристики, по которым можно производить сравнение и выбор сервисов, и абстрактная модель, наглядно демонстрирующая взаимодействие сетевых сервисов.

**Ключевые слова:** сетевой сервис, проблемы, модель, взаимодействие, качество сервиса.

### **Введение**

С увеличением числа организаций, вовлеченных в использование технологии сетевых сервисов, растет количество сетевых сервисов, предоставляющих родственные услуги на получение однотипной информации. Прозрачность выбора между родственными по своим функциям сервисами, а также эффективность поиска среди сервисов запрашиваемой информации или услуги может быть обеспечена методами оптимизации поиска и построением плана выполнения запроса. Автоматизация проектирования таких систем может быть обеспечена набором типовых решений, поддерживаемых интегрированной средой разработки. В свою очередь, необходима среда выполнения, реализующая соответствующие алгоритмы планирования и выполнения запроса поиска по сетевым сервисам в соответствии с выбранными на стадии проектирования типовыми решениями.

### **Постановка задачи**

Основной целью данной работы является описание аналитической модели взаимодействия сетевых сервисов и выбор математической формы ее представления, позволяющей исследовать эффективность использования сетевых сервисов программными приложениями корпоративных информационных систем и влияние на нее различных методов оптимизации поиска и алгоритмов построения плана выполнения запроса по сетевым сервисам. Результаты исследования планируется использовать для разработки типовых решений проектирования программных приложений корпоративных информационных систем, основанных на указанных выше методах, и программной среды их выполнения.

### **Описание проблем использования сетевых сервисов**

Первая проблема – это проблема поиска сетевых сервисов. На сегодняшний день существует два различных подхода: использование реестров и использование поисковых систем. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Реестры, как правило, обладают структурой и реализуют стандарт UDDI, но ограничены списком сервисов, входящих в базу данных. Поисковые системы производят поиск по всему Интернету, но результаты поиска не содержат какого-либо описания сервиса. Последние исследования [1] показывают, что поисковые системы находят большее количество Интернет-сервисов и процент рабочих сервисов от всех найденных у поисковых систем выше. Но ввиду сложности автоматизации использования результатов поисковых систем отдавать им предпочтение преждевременно.

В большинстве случаев результатом поиска будет не один сервис, а список сервисов, который может быть достаточно большим (в Интернете существуют сотни, а может быть, и тысячи сетевых сервисов, предоставляющих прогноз погоды). Появляется проблема выбора. Основная сложность с выбором единственного сервиса из множества аналогичных заключается в определении набора параметров, по которым будет производиться выбор. Целью выбора является предоставление пользователю максимального качества сервиса. Для описания качества сервиса (QoWS) [2] предлагается использовать различные

характеристики сервисов, такие как доступность, надежность, быстродействие, безопасность, соответствие стандартам и др. Сбор и хранение такой информации должны быть организованы отдельно от самих сервисов, в какой-то централизованной системе, так как поставщик сервиса может предоставить заведомо ложную информацию и тем самым обмануть пользователя. Также стоит предусмотреть возможность выбора сервиса по нескольким параметрам QoS, а значит, необходимо решить задачу многокритериальной оптимизации. Но выбор сервиса – не последняя проблема, с которой придется столкнуться при использовании сервисов.

После того как сервисы найдены и отобраны, необходимо организовать их взаимодействие. На этом этапе возникает сразу несколько проблем, такие как синтаксическая совместимость, семантическая совместимость, проблемы, связанные с глобализацией и локализацией.

Проблема синтаксической совместимости связана с тем, что сервисы могут быть реализованы на разных программных и аппаратных платформах, и необходимо организовать обмен данными между ними. Для организации взаимодействия необходимо знать список доступных операций и параметров, типы данных параметров и возвращаемых результатов. Для решения этой проблемы создан язык описания сетевых сервисов (WSDL), который позволяет автоматизировать процесс их разработки и вызова.

Проблема семантической совместимости намного сложнее, и готового решения на сегодняшний день здесь нет. Построение семантического графа [3] и использование теоретико-множественного подхода к получению логических выводов на основе баз знаний [4] позволяет наделять операции и параметры поиска физическим смыслом и использовать для их формализации языки описания онтологии, например, OWL.

Вечной проблемой интеграции различных приложений являются глобализация и локализация. При организации взаимодействия различных сетевых сервисов нужно учесть различия в представлении данных в разных странах: форматы дат и денежных сумм, различные единицы измерения массы, длины, температуры и т.д. Несмотря на то, что сетевые сервисы являются машинно-ориентированными приложениями, они могут оперировать текстовыми данными, а значит, нужно предусмотреть и возможность перевода текстов с одного языка на другой.

Очевидно, что проблем использования сетевых сервисов слишком много, и разработанные языки, протоколы и стандарты (WSDL, SOAP, OWL...) не решают их в полной мере. Возможным решением могла бы стать единая, централизованная система, способная автоматизировать поиск, выбор и взаимодействие сервисов, обеспечив тем самым наилучшее качество сервиса. Для создания такой системы необходимо исследовать возможные варианты взаимодействия сетевых сервисов. Исследование можно проводить на абстрактной модели, которая отражала бы сущность взаимодействия.

### Схематичное изображение модели сервиса в виде графа

Сервис можно изобразить в виде графа (рис. 1, а), где вершинам графа соответствуют операции, входящие в сервис (А, В и С), а ребра графа отображают зависимости между операциями: операция С является зависимой от операции В. Аналогичным образом могут быть показаны зависимости между операциями разных сетевых сервисов (рис. 1, б).

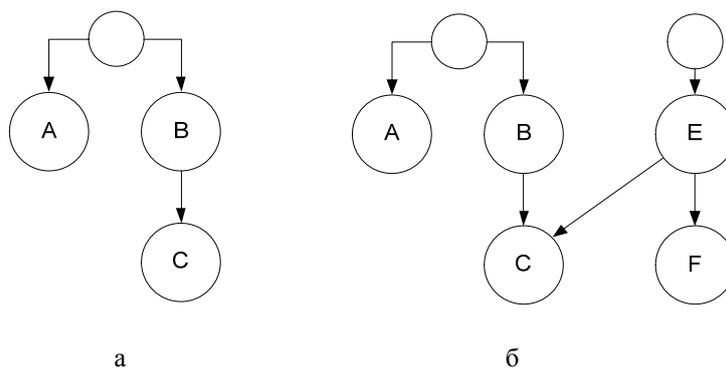


Рис. 1. Зависимости между операциями: одного сервиса (а), разных сервисов (б)

Использование графов для отображения схем сервисов позволяет не только наглядно отображать взаимозависимости сервисов, но и решать практические задачи. Рассмотрим пример с картографическим сетевым сервисом, который имеет две операции: операцию преобразования адреса в координаты (высоту и долготу) и операцию получения изображения местности, соответствующей заданным координатам (рис. 2, а). Предположим, что аналогичные сервисы предоставляют сразу три конкурирующие компании. Операции от разных провайдеров сервиса обладают различными параметрами QoS. Тогда, выполнив операцию объединения графов, отображающих схемы сервисов, и указав для каждой операции параметр качества, например, время выполнения операции, получаем граф, изображенный на рис. 2, б.

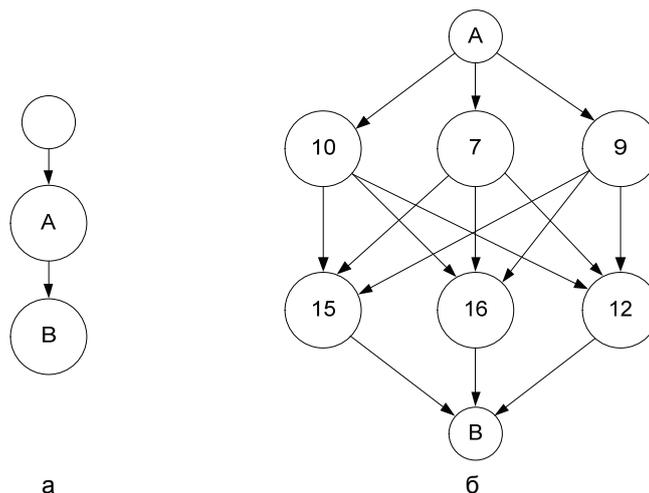


Рис. 2. Граф операций: одиночного сервиса (а), объединенного сервиса (б)

Решив задачу поиска наикратчайшего пути из точки А в точку В, можно ответить на вопрос, операциями каких сервисов нужно воспользоваться, чтобы выполнить необходимую задачу за минимальное время. Стоит заметить, что в качестве значений мог быть выбран абсолютно любой параметр – надежность, репутация или цена использования сервиса. По сути, получаем готовое решение для задачи одно-критериальной оптимизации. Более того, такой подход позволяет комбинировать отдельные операции сервисов и создавать из них новые сервисы с лучшими показателями качества обслуживания.

### Математическое описание модели сервиса

Математическое описание модели сервиса необходимо для применения методов оптимизации поиска и нахождения оптимального плана вызова сервисов. Для описания сервиса использованы такие понятия, как схема сервиса, связи сервиса, запрос сервиса, сервисный путь, граф операций и граф набора операций [5]. Схема сервиса отображает ключевые возможности всех сетевых сервисов предметной области. Она предоставляет словарь и позволяет создать язык сервисных запросов. Схема сервиса определяется записью  $S = (SG_1, SG_2, \dots, SG_n, D)$ , где  $SG_i = (V_i, E_i, \varepsilon_i), i = 1, \dots, n$ , является ориентированным ациклическим графом (сервисным графом), где:

- $V_i = \{op_{ij} \mid 1 \leq j \leq m\}$  – набор операций сетевого сервиса;
- $\varepsilon_i$  – корневой элемент графа (точка входа, через которую можно получить доступ ко всем операциям сервиса);
- $E_i = \{e_{ij} \mid 1 \leq j \leq l\}$  отражает зависимости между двумя операциями из одного графа;
- $D = \{D_{i,j} \mid 1 \leq i \leq n \wedge 1 \leq j \leq n \wedge i \neq j\}$  отражает зависимости между двумя некорневыми операциями из различных графов;
- $SG' = SG_i \circ SG_j$  является конкатенацией двух сервисных графов, полученной объединением корневых элементов  $SG_i$  и  $SG_j$ .

Зависимости между двумя внутренними операциями относятся к внутрисервисным зависимостям, и могут быть удовлетворены вызовом двух операций в определенном порядке. Зависимости между сервисами могут быть удовлетворены, когда осуществляется доступ к множеству сервисов. Предполагается отсутствие зависимости между корневыми элементами графов. Также предполагается, что все множественные зависимости к одной операции должны быть удовлетворены до выполнения этой операции. Например, есть две зависимости к операции  $op_k$ :  $op_i$  и  $op_j$ . В этом случае операции  $op_i$  и  $op_j$  должны быть вызваны до операции  $op_k$ . Также следует отметить, что в случае присутствия в схеме сервиса единственного графа, т.е.  $n = 1$ ,  $S$  становится сервисной схемой с одиночным графом.

Сервисный путь для сервисного графа  $SG = (V, E, \varepsilon)$  определяется как  $P_i = (\{op_{i1}, \dots, op_{ij}, \dots, op_{ik}\}, E', \varepsilon)$ , где  $\varepsilon$  – это корень  $SG$ ,  $E' \subseteq E$ , и  $k \geq 1$ ;  $op_{ij} \in V$  для  $1 \leq j \leq k$ , и для каждого  $op_{ij}$ ,  $0 \leq j \leq (k-1)$ ,  $\exists e_j \in E' : e_j = (op_{ij}, op_{i(j+1)})$ .

Граф операции  $G(op)$  для сервисного графа  $SG_i = (V_i, E_i, \varepsilon_i)$  – это объединение всех сервисных путей в  $SG$ , которые ведут к операции  $op$ ,  $G(op) = \bigcup P_i$ , где  $P_i = (\{op_{i1}, \dots, op_{ij}, \dots, op_{ik}\}, E', \varepsilon)$ . Граф опера-

ций  $G(op)$  является направленным подграфом сервисного графа  $SG$ . На рис. 3, б, показан граф операции  $G(d)$ , который получен из  $SG$  (рис. 3, а) путем объединения двух сервисных путей  $P_1$  и  $P_2$ , которые ведут к сервисной операции  $d$ .

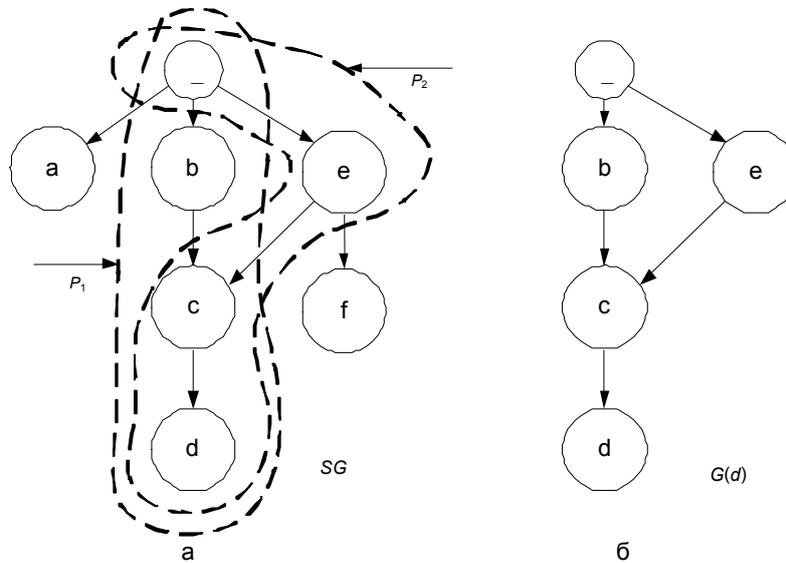


Рис. 3. Граф: сервиса  $SG$  (а), операции  $d$  (б)

Граф набора операций для сервисного графа  $SG_i = (V_i, E_i, \varepsilon_i)$  определяется как  $G(op) = \bigcup_{i=1}^k G(op_i)$ , где  $op = \{op_{ij} \mid 1 \leq i \leq k\}$ .  $G(op)$  является направленным подграфом сервисного графа  $SG$ . Например, на рис. 3 граф для набора операций  $\{a, d, f\}$  – это сам граф  $SG$ , т.е.  $G(\{a, d, f\}) = SG$ .

Модель QoWS формально определяет набор качественных параметров для сетевых сервисов, которые указаны в таблице – время реакции, надежность, доступность, цена и репутация. Время реакции – время между моментом вызова  $op$  и моментом получения результата. Надежность – это возможность вызова  $op$  с гарантированным временем ответа. Доступность – это вероятность того, что операция доступна. Цена определяет стоимость вызова  $op$ . Репутация – это мера достоверности операции. Она определяется соотношением того, что операция предоставила и тем, что было обещано. Значения параметров в QoWS модели могут быть как целочисленными, так и дробными.

Параметр	Определение	Тип	Индекс
Время реакции	Время обработки операции + время возвращения результатов	число	1
Надежность	$N_{удачных}(op)/N_{всего}(op)$ – отношение удачных вызовов к общему количеству вызовов $op$	число	2
Доступность	$UpTime(op)/TotalTime(op)$ , где $UpTime$ – время, когда $op$ была доступна; $TotalTime$ – общее время	число	3
Цена	Денежная сумма, необходимая для вызова операции	число	4
Репутация	$\sum_{u=1}^k \text{Оценка}(op)/n$ $1 \leq \text{репутация} \leq 10$ , где Оценка – оценка, поставленная пользователем; $n$ – количество оценок	число	5

Таблица. Параметры QoWS

Сервисная связь определяется как набор экземпляров сервисов  $I = (\{sid, op_1, \dots, op_n\})$ , где  $sid$  – уникальный идентификатор сервиса;  $op$  – операция сервиса, определенная как пара  $op = (opid, \lambda(op))$ , где  $opid$  является идентификатором операции,  $\lambda$  – меточной функцией, которая присваивает каждой сервисной операции набор значений параметров QoWS, обозначенный  $Q = \sum_{i=1}^k Q_i$ . Функция определяет  $i$ -й параметр  $op$ , где  $i$  – индекс параметра согласно таблице. Каждый экземпляр сервиса  $I$  в сервисной связи согласован с сервисным графом  $SG$ , т.е. операции в  $I$  определены в  $SG$  и следуют зависимостям, определенным в  $SG$ .

Сервисный запрос – это выражение сервисных вычислений в форме  $\{s | \psi(s)\}$ , где  $s$  – это переменная, представляющая запись из сервисного отношения  $SR$ , а  $\psi$  – это формула сервисных вычислений. Формулы составляются рекурсивно и имеют один из следующих форматов:

- $x\theta_q y$ , где  $\theta_q$  – оператор сравнения параметров QoWS (один из  $\{=, >, \geq, <, \leq, \neq\}$ );  $x$  и  $y$  могут быть параметрами QoWS или константами;
- $s.op == t.op$ , где  $s.op$  означает операцию из записи  $s$ , а  $t.op$  – операцию из записи  $t$ ;  $s.op == t.op$  принимает истинное значение, если  $t$  и  $s$  имеют одинаковый набор сервисных операций, и ложное в противном случае;
- $SR(s)$ , где  $SR$  – сервисное отношение;  $s$  – переменная, содержащая сервисную запись; отношение  $SR(s)$  принимает истинное значение, если  $s$  принадлежит  $SR$ , и ложное в противном случае.

### Заключение

Практическое применение представленной выше модели и ее математического описания можно продемонстрировать на примере использования сервиса-реестра недвижимости. Сервисный запрос на получение истории покупаемой недвижимости при стоимости выполнения запроса не более 200 рублей может быть составлен следующим образом:

$$Q_1 = \{s.sid, s[G(history\_report)] | RE(s) \wedge fee(s.history\_report) \leq 200\},$$

где  $G(history\_report)$  – граф операций получения  $history\_report$ ;  $fee(s.history\_report)$  указывает на стоимость вызова операции;  $RE (RealEstate)$  – сервис-реестр недвижимости.

Такая модель охватывает функциональность, поведение и качественные параметры сетевых сервисов, что позволяет осуществлять запросы с указанием критериев необходимого качества обслуживания. В дальнейшем предполагается расширение модели за счет использования математических методов оптимизации и алгоритмов создания плана вызова сервисов с учетом требований пользователя.

### Литература

1. Euyhab Al-Masri, Qusay H. Mahmoud. Investigating Web Services on the World Wide Web // WWW 2008. – P. 795–804.
2. Anbazhagan Mani, Arun Nagarajan. Understanding quality of service for Web services // Материалы компании IBM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibm.com/developerworks/library/ws-quality.html>, свободный.
3. Клименков С.В., Максимов А.Н., Харитонов А.Е. Семантический анализ проектной документации // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 46. – С. 198–202.
4. Бессмертный И.А. Теоретико-множественный подход к логическому выводу в базах знаний // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 66. – С. 43–48.
5. Qi Yu, Athman Bouguettaya. Foundations for Efficient Web Service Selection // Springer – 2009. – 160 с.

*Дергачев Андрей Михайлович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший преподаватель, [dam600@gmail.com](mailto:dam600@gmail.com)

УДК 681.786.23

## МЕТОДИКА СБОРКИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ 3D-СКАНИРОВАНИЯ

В.О. Тишкин

Множество существующих на сегодняшний день программных пакетов 3D-сканирования дает широкие возможности по обработке получаемых в процессе регистрации поверхности данных. Тем не менее, специфика данной области накладывает определенные требования, и во всех этих программах присутствует ряд схожих функций, которые, в свою очередь, определяют алгоритм первоначальной работы с результатами сканирования. В данной работе предлагается общий алгоритм, являющийся результатом практического многолетнего опыта автора по сборке «сырого» материала в единую электронную копию и последующей обработке.

**Ключевые слова:** сканирование, метод, поверхность, копия, 3D-модель.

### Введение

В настоящее время существует целый ряд методов, позволяющих создавать трехмерные образы аппаратными средствами, т.е. без привычного 3D-моделирования в специализированных программных пакетах. Одним из передовых является метод трехмерного сканирования.

3D-сканирование – это систематический процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям физических объектов, с целью последующего получения их объемных компьютерных моделей, которые могут модифицироваться с помощью специализированных CAD-систем. Устройства, с

помощью которых осуществляется сканирование объектов, называют 3D-сканерами. Эти устройства не только упрощают процесс создания 3D-моделей, но и позволяют решать эту задачу с максимальной степенью достоверности по отношению к исходному оригиналу. Одни подразумевают наличие механического устройства – «щупа», при помощи которого в компьютер передаются координаты выбранных оператором точек; другие (бесконтактные) являются значительно более сложными приборами, в которых заложены весьма изощренные алгоритмы создания пространственных каркасов. Так, во многих из них используется двойная (дополняющая основную) система ввода координат тела. Многие устройства совмещают лазерные датчики (заменяющие механический «щуп» контактных 3D-сканеров) и цифровой фотоаппарат, который используют для большей точности сканирования, что позволяет получить модели объектов с наложенными текстурами.

Помимо аппаратного уровня, в технологии объемного сканирования присутствует и программный уровень, который подразумевает работу с получаемыми от 3D-сканеров данными. На сегодняшний день существует достаточное количество пакетов как коммерческого, так и некоммерческого планов, позволяющих получать компьютерные копии совершенно с разных сторон и в разных формах. Это могут быть обычные полигональные модели, доступные для распространенных дизайнерских программ (например, 3DMax), также есть возможность получения параметрической (математической, CAD) модели, доступной для различных проектировочных программ (SolidWorks, ProEngineer и т.д.) [1–4].

Так или иначе, первым шагом после процедуры сканирования будет обработка полученных данных. Такая обработка подразумевает определенную последовательность действий, которая имеет характерную логику вследствие специфики области 3D-сканирования и работы с объемными моделями, в частности. Это означает, что в различных программных пакетах логика обработки будет реализована посредством схожих функций, которые, в свою очередь, и будут определять те или иные алгоритмы обработки.

Представленный ниже метод разрабатывался на основе опытных исследований в коммерческой фирме, поэтому его эффективность была неоднократно проверена на реальных объектах.

### Предобработка

Примерный порядок действий предлагаемого метода представлен на рис. 1.

Как видно, перед получением собственно копии должны быть уже совершены действия, направленные, в общем случае, на уменьшение объема данных, что означает освобождение оперативной памяти компьютера и уменьшение загрузки центрального процессора (ЦП). Естественно, в случае небольшого объема данных теряется смысл соблюдения такой последовательности, но данный алгоритм направлен на экономию времени, с одной стороны, и получение максимально качественного результата, с другой, при условии работы со средним или большим количеством материала. Объем данных в технологии 3D-сканирования определяется количеством и весом «сканов», полученных в процессе сканирования. Этот термин является аналогом термина «снимок» в фотографировании, но ввиду принципиальной разницы получаемых данных – двумерное фотоизображение в фотографировании и трехмерная копия определенной площади поверхности в 3D-сканировании – корректнее использовать термин «скан».

Метод был опробован на программном обеспечении RapidForm 2006, Inus Tech., Inc.

Предобработка подразумевает следующие действия (рис. 1).

- *Сканирование.* Процесс регистрации поверхности сканируемого изделия. В результате получается определенное количество сканов. В зависимости от используемого вида сканера можно получить сканы разного размера и качества. Размер определяется захватываемой площадью, а качество – точностью передачи деталей поверхности.
- *Импорт в программное обеспечение (ПО).* Зачастую компьютерная программа, используемая в процессе сканирования, непригодна для удобной и быстрой обработки полученных данных, поэтому необходимо следить за тем, чтобы сохраняемые «сырые» данные можно было импортировать в программное обеспечение (ПО), которое будет использовано для дальнейшей обработки.

При кажущейся очевидности данной рекомендации нужно помнить, что компании, разрабатывающие ПО, используют свои форматы данных, которые, чаще всего, не будут пригодны для других программных пакетов. Это приводит к необходимости сохранения в популярных форматах, например, .STL или .DXF (если говорить о полигональной модели или облаке точек).

- *Удаление текстур.* Некоторые сканеры позволяют получить сканы с наложенными текстурами, которые зачастую используются дизайнерами в 3D-моделях (кино, анимация). В подавляющем большинстве случаев текстуры являются излишними данными, поэтому их следует удалять. При этом, во-первых, освобождается дополнительное пространство памяти, и, во-вторых, экономится время на обработку программой этих текстур при дальнейшем соединении сканов и обработке поверхности.
- *Удаление лишних областей.* Во время сканирования всегда захватываются лишние элементы, например, поверхность, на которой лежит сканируемый объект. Естественно, что такие области необхо-

димо удалять, но встает закономерный вопрос, когда и как эффективнее это сделать. Когда речь идет о работе с 2–3 сканами, это не имеет принципиального значения, но при увеличении их количества, например, до 10, и площади захвата каждого порядка одного квадратного метра главным становится вопрос об экономии времени. Решается же данная проблема достаточно просто: при большом количестве данных удаление лишних областей необходимо производить сразу после удаления текстур, переходя от скана к скану, и, в таком случае, программа не тратит лишнее время на загрузку в память нужного инструмента. При этом экономится тем больше времени, чем большее количество сканов загружено для обработки. После соответствующих измерений установлено, что при обычной загрузке в 10–20 сканов и общем их количестве около 100 работа будет протекать быстрее примерно на 15%.

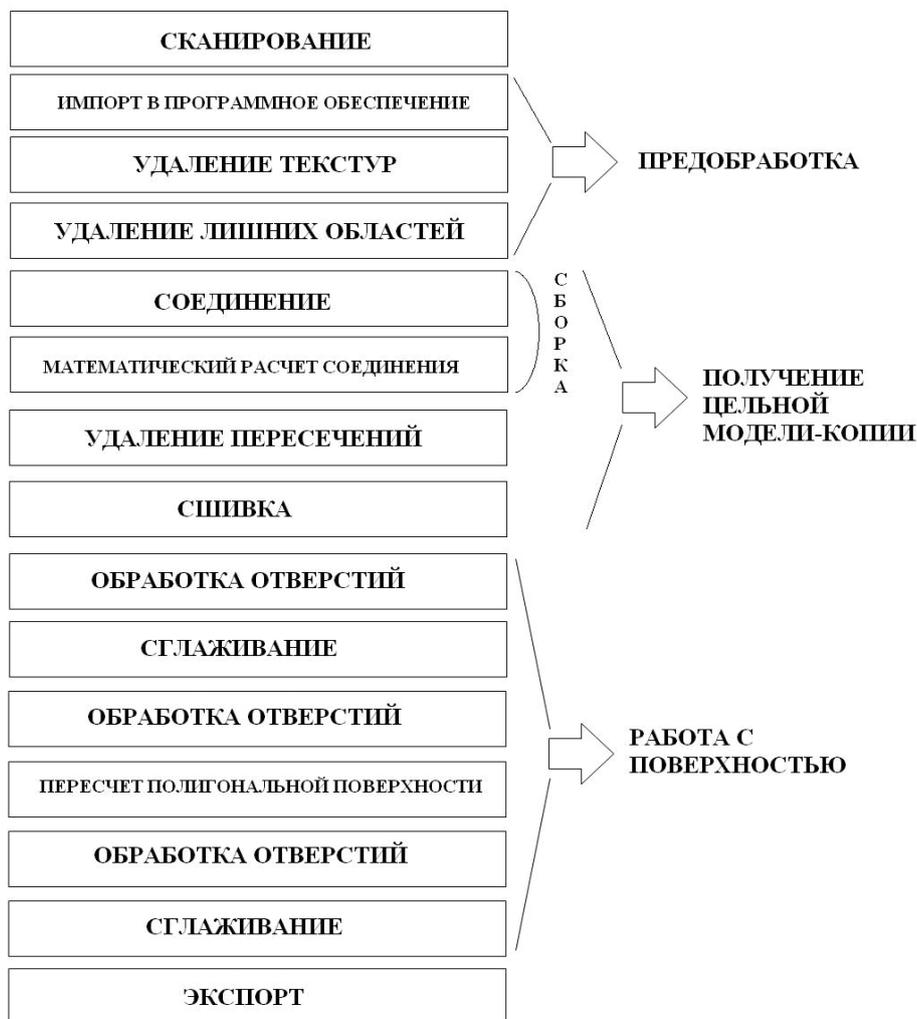


Рис. 1. Алгоритм сборки и обработки данных 3D-сканирования

### Получение цельной модели-копии

Получение цельной модели-копии подразумевает соединение полученных ранее сканов в единое целое. В результате проведенных операций на экране компьютера формируется объемная копия реального объекта. Естественно, что такие копии имеют определенные отклонения от исходной модели, вызванные погрешностью прибора, но нивелируемые дальнейшей обработкой.

Процесс получения цельной копии включает следующие операции.

- *Соединение.* Когда используются сканирующие системы без специальных позиционирующих маркеров, сканы не сгруппированы друг относительно друга таким образом, чтобы получилась цельная копия. Для этого в специализированном ПО предусмотрена функция соединения (но не в общее целое) двух сканов, имеющих общую поверхность. В RapidForm 2006 эта функция реализуется с помощью процедуры «Initial» (рис. 2, 3).

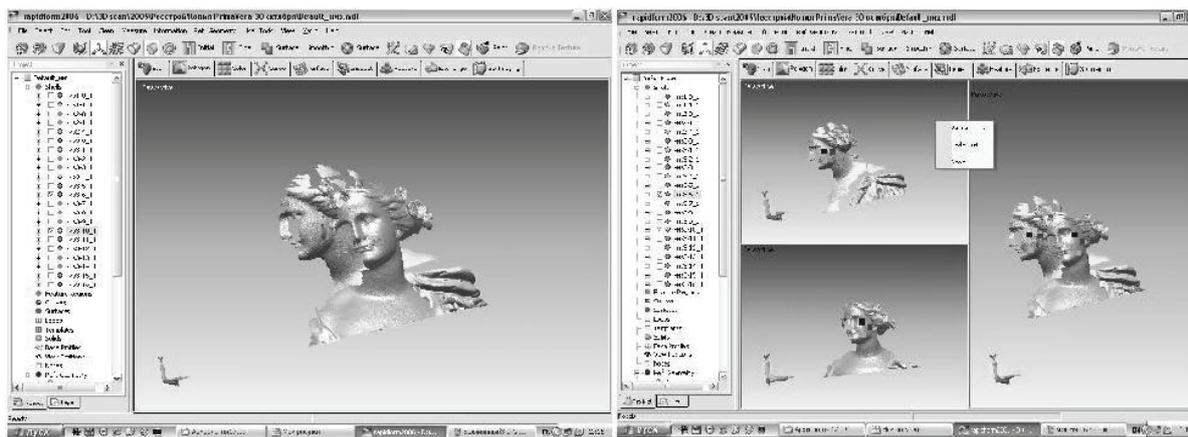


Рис. 2. Начальное положение сканов и процесс регистрации общих точек



Рис. 3. Результат соединения двух сканов

– *Математический расчет соединения («Fine», RapidForm 2006).* При соединении сканов возможны локальные погрешности, которые можно аннулировать, используя данную функцию. Эта функция особенно важна при работе с цельнотрехмерными объектами (статуи, автомобили и т.д.), и необходимо ее использовать до процедуры сшивки со всем комплексом **уже соединенных** между собой сканов (при достаточной мощности компьютера). Это позволяет избежать общей погрешности соединения на всей модели.

Соединение и математический расчет представляют из себя процесс сборки.

– *Удаление пересечений.* При соединении возникают места больших площадей наложения двух или более поверхностей (рис. 4). Такие места необходимо удалять, во-первых, для освобождения пространства памяти, а, следовательно, для уменьшения времени на обработку программой тех или иных действий, и, во-вторых, для того, чтобы избежать возможных ошибок (при наложении одной поверхности на другую) во время процедуры сшивания в единое целое.

– *Сшивка («Merge», RapidForm 2006).* Процедура сшивки позволяет соединить двух или более сканов в единое целое. Используемый метод предполагает сшивание всего комплекса соединенных между собой сканов после проведенной процедуры досоединения, что экономит время, в отличие от попарного сшивания сканов (что, тем не менее, в некоторых случаях эффективнее).

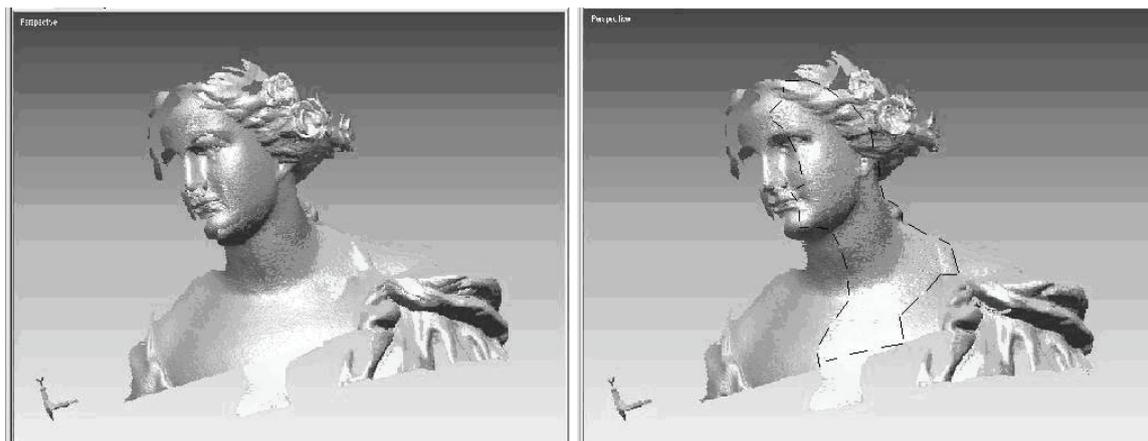


Рис. 4. До и после процедуры математического расчета соединения. Пунктиром выделена большая площадь наложения

### Работа с поверхностью

После получения цельной копии на ее поверхности могут иметь место различного рода погрешности: недостающие части (дыры); искажения вследствие программных ошибок; общая шероховатость, вызванная погрешностью устройства. Исправлением этого комплекса недочетов следует заниматься в третьем блоке.

– *Обработка отверстий (Fill holes)*. Практически на любом объекте существуют такие места на поверхности, сканирование которых, так или иначе, невозможно (отрицательные углы, высокая глубина рельефа), поэтому во всех пакетах для 3D-сканирования существует функция «зашивания» отверстий. Эта функция также оказывается полезной и в тех случаях, когда сканирование отдельных участков возможно, но представляет собой довольно кропотливую задачу, в то время как обработка недостающего материала программными методами проще и быстрее (рис. 5).

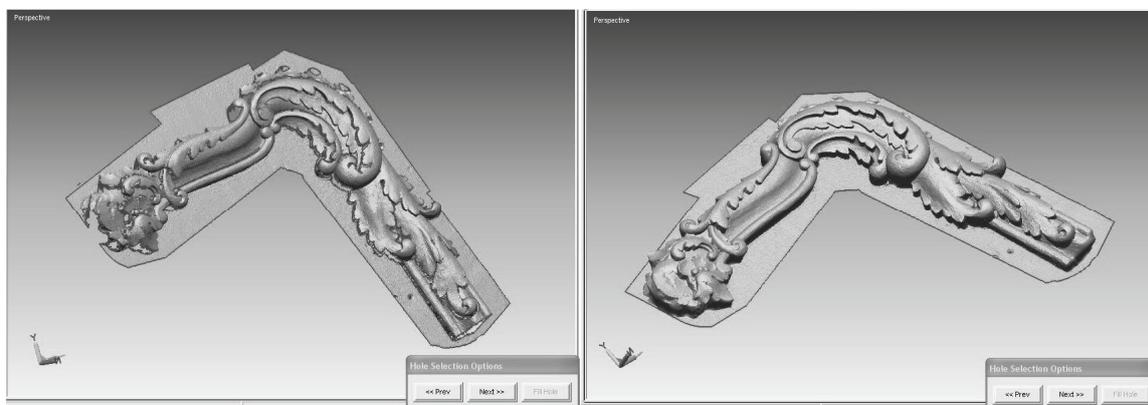


Рис. 5. Работа с недостающим материалом

– *Сглаживание (Smooth)*. Процедура сглаживания позволяет убрать шероховатости поверхности компьютерной копии, возникающие либо за счет погрешностей сканеров, либо вследствие специфики сканируемой поверхности. С другой стороны, являясь, по сути, функцией деформации, сглаживание дает возможность исправления программных ошибок, возникающих во время сшивания.

– *Пересчет полигональной поверхности (ретриангуляция, remesh)*. Такая функция позволяет перестроить структуру полигональной поверхности с тем, чтобы придать ей однородный вид. Это необходимо с точки зрения облегчения расчетов ЦП компьютера и, как следствие, уменьшения времени на проведение операций над моделью. С другой стороны, вследствие процедуры пересчета исчезают большие полигоны, которые появляются на гранях, острых или отрицательных углах поверхности. Это может быть даже более важно, чем уменьшение загрузки ЦП, так как, учитывая производительность современных компьютеров, получаемая экономия времени не так очевидна, как получение однородной полигональной структуры, обработку которой (в частности, различного рода деформации) можно вести более тонко (рис. 6).

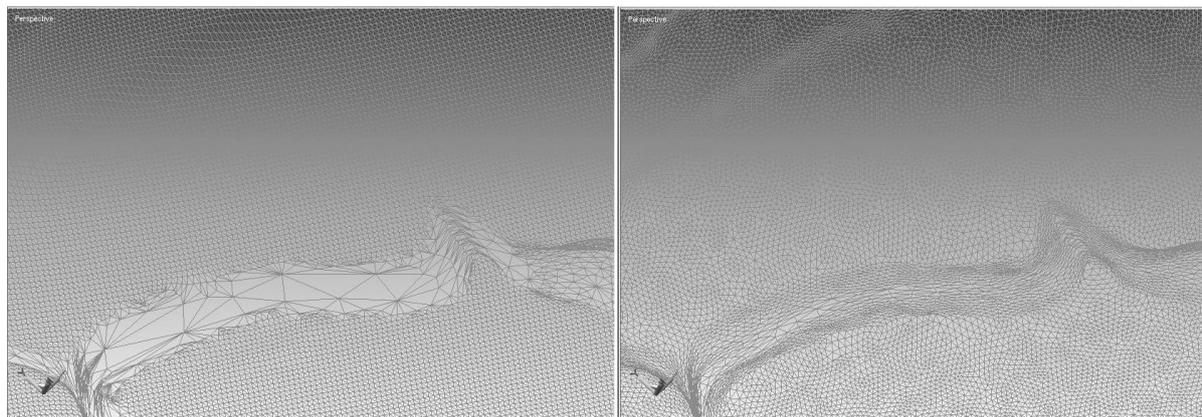


Рис. 6. Процедура remesh

### Заключение

Предлагаемый метод позволяет сократить время на обработку данных и качество получаемых моделей-копий.

Экономия времени реализуется за счет алгоритма сборки, а именно, использования функций соединения и расчета соединения. Среднее время на последовательную работу, т.е. соединение, расчет, удаление пересечений, сшивание с парами сканов весом около 600 тысяч полигонов составляет около 1 мин 10 с (без учета возможных программных ошибок). При дальнейшем присоединении дополнительных сканов эта цифра увеличивается. Предлагаемый алгоритм на отрезке получения цельной модели позволяет сэкономить от 50 с до 1 мин при работе с уже 4 сканами (около 3 мин 5 с по предлагаемому алгоритму против 4 мин при работе парами). Экономия возрастает при увеличении общего количества сканов.

Качество модели, т.е. однородность, ровность, отсутствие дыр, повышено за счет алгоритма работы с поверхностью. Описанным образом целесообразно обрабатывать объекты художественного плана.

### Литература

1. Rioux M. Digital 3-D imaging: theory and applications // Proc. of SPIE: Proceedings, Videometrics III, International Symposium on Photonic and Sensors and Controls for Commercial Applications, Boston, 1994. – V. 2350. – P. 2–15.
2. Борисенко Б., Ярошенко С. 3D-сканирование в интересах 3D-моделирования // Компьютер Price. – 2004.
3. Beraldin J.A., Blais F., Cournoyer L., Godin G., Rioux M. Active 3D sensing // Scuola Normale Superiore Pisa, Centro di Ricerche Informatiche per i Beni Culturali, 2000.
4. Baumberg A., Lyons A., Taylor R. 3D S.O.M. A commercial software solution to 3D-scanning // Vision, Video, and Graphics (2003).

*Тишкин Виталий Олегович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tiviol@gmail.com

УДК 535.211

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ И АТТЕСТАЦИЯ ЗОНДОВ ИЗ СТЕКЛЯННЫХ  
МИКРОКАПИЛЛЯРОВ ДЛЯ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО  
МИКРОСКОПА**

А.В. Стовпяга, Г.С. Французов

Изготовлены зонды для сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) на основе стеклянных микрокапилляров. Оценены характеристики зондов-пипеток по их изображениям, полученным в растровом электронном микроскопе (РЭМ) и в СЗМ с использованием тестовых решеток.

**Ключевые слова:** сканирующий зондовый микроскоп, нанопипетка, микрокапилляр, растровый электронный микроскоп.

**Введение**

Разрешающая способность СЗМ главным образом определяется размером вершины используемого зонда. Зонды для различных режимов работы СЗМ существенно отличаются своими параметрами и свойствами [1]. Применение стеклянных микро- и нанокапилляров в качестве зондов для СЗМ представляет интерес в связи с исследованием ионного транспорта и структуры биологических объектов (в частности, клеток) в жидких проводящих средах. Зонды-пипетки также могут быть использованы при решении задач, требующих переноса в пространстве малого количества жидкой пробы с нанометровой точностью.

Целью работы было исследование процесса вытяжки зондов-пипеток из стеклянных микрокапилляров при их разогреве с использованием газовой горелки и анализ характеристик получаемых зондов.

**Материалы, оборудование и методы измерений**

Объектами исследования являлись образцы нанопипеток, изготовленные из медицинских стеклянных капилляров при помощи вытяжной установки, использующей механическое натяжение и локальный разогрев капилляра в пламени газовой горелки. Исходный материал для изготовления микропипеток – капилляры из боросиликатного стекла с температурой размягчения  $\sim 760^\circ\text{C}$ . Внешний и внутренний диаметры соответственно составляют 1 мм и 0,58 мм. Температура открытого пламени горелки составляла  $\sim 1300^\circ\text{C}$ . После вытяжки зонды-пипетки закреплялись на свободном конце пьезотрубки, входящей в состав зондового датчика СЗМ «NANOEDUCATOR».

Аттестация зондов-пипеток осуществлялась двумя способами:

- прямая визуализация торца нанопипетки в режиме вторичных электронов с помощью РЭМ «FEI Inspect S»;
- сканирование изготовленными зондами тест-объектов с известным рельефом поверхности на СЗМ «NANOEDUCATOR» в полуконтактном режиме с последующим анализом результатов.

Нанопипетка закреплялась на конце пьезоэлектрической трубки зондового датчика СЗМ «NANOEDUCATOR». Закрепление зонда-пипетки выполнялось с использованием клея «Момент-1». В месте закрепления диаметр пипетки равнялся диаметру исходного стеклянного капилляра. Длина зонда от места закрепления до утоненного торца капилляра составляла 7–10 мм.

**Особенности формирования нанопипеток**

При изготовлении нанопипетки важно подобрать такой режим вытяжки, при котором полученные зонды имеют удлинение 7–10 мм от торца с внешним диаметром, равным диаметру исходного капилляра, до утоненного торца.

Сформулируем задачу о растяжении капилляра при его локальном нагревании [2]. Будем считать, что нагретый локально капилляр имеет равномерное по сечению распределение температуры, т.е. температура зависит только от координаты  $x$  и времени  $t$ ,  $T(x,t)$  ( $x$  – координата вдоль капилляра). Капилляр растягивается под действием силы  $F(t)$  (рис. 1).

Обычно деформацию стекла в вязкоупругом состоянии описывают на основании модели Максвелла, которая учитывает как вязкую, так и упругую деформации. В рассматриваемом случае деформации вязкого течения значительно больше упругих деформаций, поэтому поведение капилляра при растяже-

нии будем описывать, применяя модель Ньютона. По этой модели изменение относительной деформации  $\varepsilon$  во времени пропорционально действующим напряжениям  $\sigma$  и обратно пропорционально вязкости стекла  $\eta$  [3]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta}. \quad (1)$$

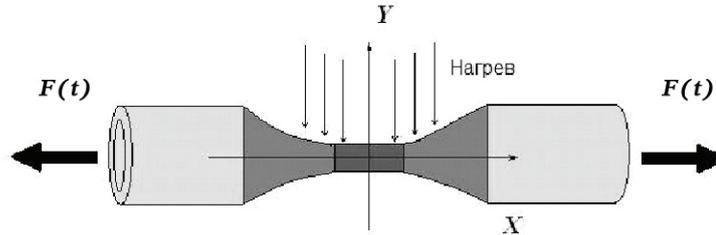


Рис. 1. Деформирующаяся зона нагрева под воздействием силы растяжения

Это выражение справедливо для каждого  $x$  в каждый момент времени  $t$ . Учитывая, что напряжение  $\sigma = \frac{F}{S}$ , можно прийти к уравнению

$$\frac{dS}{dt} = \frac{F}{\eta} \quad (2)$$

при начальном условии  $S(t=0) = S_0$  ( $S_0$  – площадь сечения исходного капилляра). При вычислении необходимо учитывать, что отношение внутреннего диаметра капилляра к внешнему сохраняется в течение процесса вытяжки практически постоянным, т.е.

$$\frac{r}{R} = \frac{r_0}{R_0} = \alpha. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) следует

$$R^2 = \frac{1}{\pi(1-\alpha^2)} \left[ S_0 - \int_0^t \frac{F}{\eta} dt \right]. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что процессом вытяжки можно управлять двумя способами:

- изменяя силу растяжения в пределах прочности капилляра;
- изменяя вязкость стекла в зоне нагрева, которая зависит от температуры.

Следует отметить, что исходная модель не учитывает многие факторы, проявляющиеся в работе реальной установки. Экспериментально было установлено, что большое влияние на формирование зонда-пипетки оказывает равномерность и локальность нагрева капилляра, которую достаточно сложно обеспечить, используя газовую горелку, даже при ее жестком закреплении. Вследствие неравномерности распределения температуры в пламени горелки имеет место существенное различие во времени, необходимым для образования шейки и разрыва капилляра для различных образцов. В результате разрыв капилляра происходит при различных начальных условиях, что приводит к плохой воспроизводимости метода. Очевидно, что лучшую воспроизводимость можно получить, используя для локального разогрева лазерную технологию [1, 2].

#### Аттестация зондов-пипеток

На рис. 2 представлено характерное изображение зонда в виде нанопипетки, полученное на РЭМ «FEI Inspect S» в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 30 кВ. Отметим, что диаметры годных зондов-пипеток варьировались в диапазоне 200–1000 нм. При этом остриев с меньшими диаметрами на данной установке получить не удалось. Острия пипетки, как правило, имели форму усеченных конусов с небольшим углом при вершине.

Вообще говоря, в процессе вытяжки торец пипетки может оплавиться, что может привести к нежелательному исчезновению внутреннего сквозного канала. Наличие сквозного канала на торце заостренной части пипетки контролировалось в РЭМ. При больших диаметрах внутреннего канала такой контроль производился с помощью оптического микроскопа.

Для визуализации торца зонда-пипетки в СЗМ «NANOEDUCATOR» использовалась аттестованная кремниевая тестовая решетка TGT1 [4]. Решетка состоит из одинаковых остриев, расположенных в шахматном порядке с диагональным периодом 2,12 мкм. Острия имеют высоту 0,3–0,5 мкм и угол при вершине 50°. Диаметр острия при вершине составляет 10 нм.

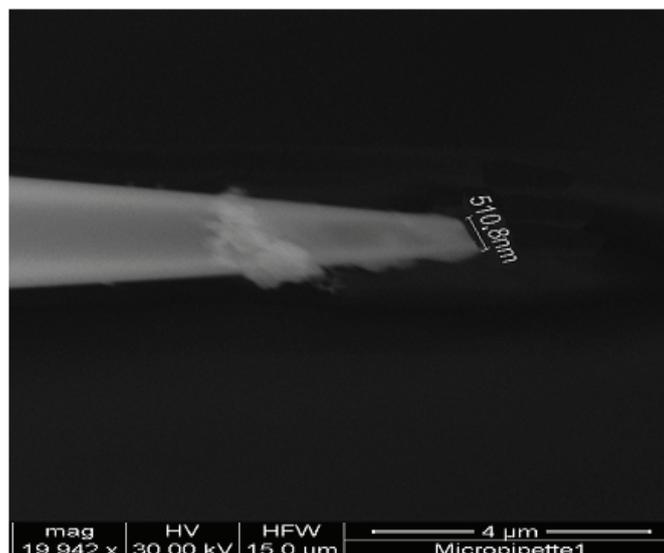


Рис. 2. РЭМ изображения острия микропипетки (РЭМ «FEI Inspect S»)

Тестовые решетки такого типа, как правило, используются для первичной оценки формы зонда. СЗМ-изображения, полученные в результате сканирования такой решетки, могут быть впоследствии использованы для процесса деконволюции (восстановление искажений, связанных с формой зонда).

На рис. 3 представлено поперечное сечение СЗМ-изображения, полученного при сканировании тестовой решетки TGT1 зондом-пипеткой в полуконтактном режиме. Скорость сканирования лежала в диапазоне 2000–4000 нм/с.

На рис. 3 наблюдаются две повторяющиеся структуры в виде двух пиков и впадины между ними. Расстояние между наблюдаемыми структурами равно 3 мкм, что соответствует периоду тестовой решетки. Понятно, что наблюдаемые на рис. 3 впадины возникают вследствие проникновения тонких (10 нм) остриев, составляющих тестовую решетку, во внутреннюю полость зонда-пипетки в процессе сканирования. По рис. 3 можно определить диаметр внутреннего отверстия в зонде-пипетке ~500 нм.

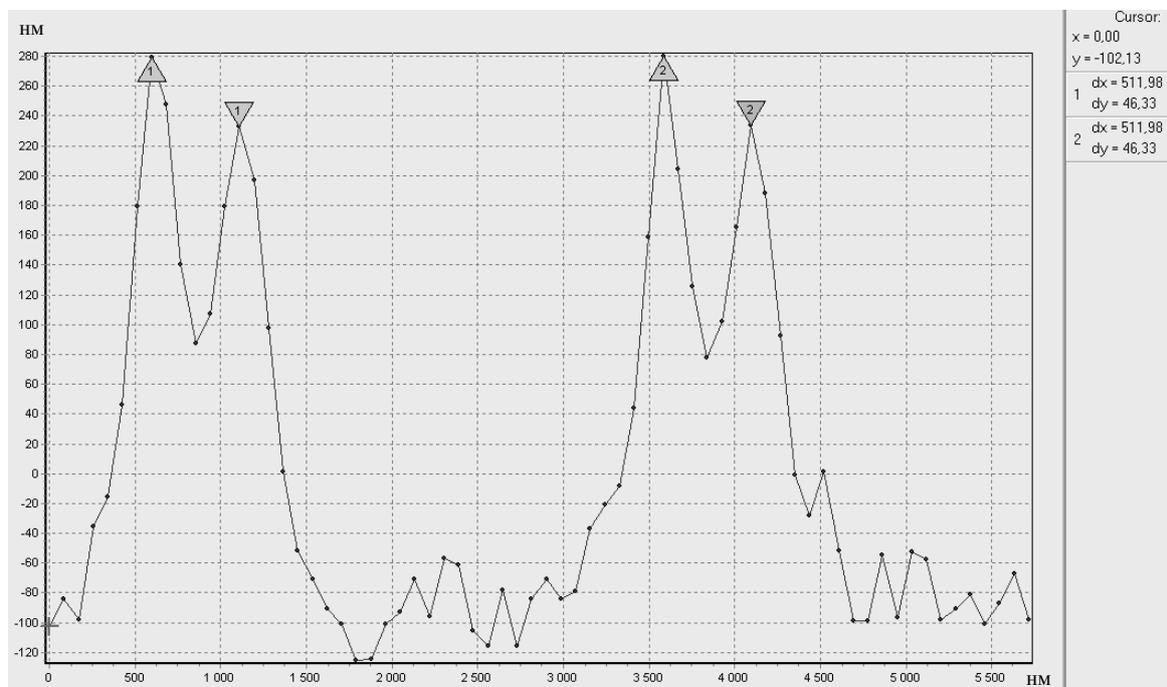


Рис. 3. Профиль поперечного сечения СЗМ-изображения поверхности тестовой решетки TGT1

Для оценки возможности СЗМ-визуализации биологических объектов (в частности, клеток) в функционально активной проводящей среде было проведено сканирование тестовой решетки TGT1 в воде (рис. 4).

Было установлено, что добротность зондового датчика при колебаниях на воздухе и в жидкой среде не изменяется и имеет величину  $Q \approx 25$ . Однако при работе в жидкости следует учитывать достаточно быстрое испарение жидкости (за 10–15 мин), что накладывает определенные ограничения на скорость и на площадь сканирования. Отметим, что проблему испарения можно решить, применяя специальный резервуар-держатель образца.

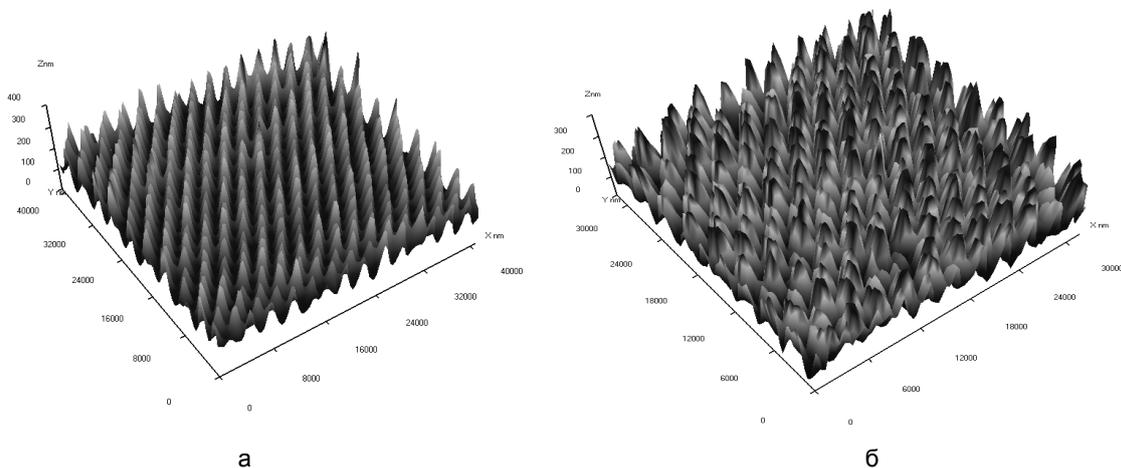


Рис. 4. СЗМ-изображение тестовой решетки TGT1, полученное с помощью зонда-микропипетки: а) в воде; б) на воздухе

Отметим, что при работе на воздухе на СЗМ-изображении тестовой решетки наблюдаются ярко выраженные раздвоенные пики (рис. 4, б), происхождение которых уже обсуждалось выше. Вместе с тем при работе в жидкости такого раздвоения не наблюдается (рис. 4, а). Для объяснения причины обнаруженного эффекта требуются дополнительные исследования.

### Заключение

Апробирована технология вытягивания зондов-пипеток для СЗМ из стеклянных капилляров с использованием локального разогрева в пламени газовой горелки. С помощью описанной технологии возможно получение зондов-пипеток с диаметром до 500 нм, однако выход годных зондов не превышает 10%. Характеризация зондов путем прямой визуализации в РЭМ и с использованием тестовых решеток в СЗМ дает адекватные результаты. Показана работоспособность зондового датчика СЗМ «NANOEDUCATOR» с зондом-пипеткой и выявлены особенности его функционирования в жидкости.

Работа выполнена в рамках реализации гранта № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение» при финансовой поддержке Министерства образования и науки.

### Литература

1. Veiko V.P., Golubok A.O., Levichev V.V., Zuong Z., Yakovlev E.B. Multifunctional universal SPM nanoprobe fabrication with laser technology // *Laser Physics*. – 2009. – V. 19. – № 5. – P. 1142–1151.
2. Зыонг Ван Зунг Зыонг Ти Зунг. Исследование лазерного формирования комбинированных нанозондов. Дис. ... канд. техн. наук: 05.27.03. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 135 с.
3. Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.П. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов. Справочник. – Л.: Наука, 1977. – Т. 3. – 586 с.
4. ЗАО «НТ-МДТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nt-mdt.ru>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ.

**Стовяга Александр Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanja100v@mail.ru  
**Францозов Григорий Сергеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, grigoryfrants@gmail.com

# 8

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.9

### ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М.Я. Беккер, Ю.А. Гатчин, Н.С. Кармановский, А.О. Терентьев, Д.Ю. Федоров

Рассмотрена обобщенная модель облачных вычислений и виды услуг облачных вычислений. Предложена классификация облаков. Показаны основные достоинства и основные риски информационной безопасности при использовании облачных вычислений.

**Ключевые слова:** облачные вычисления, безопасность облачных вычислений, IaaS, PaaS, SaaS, cloud computing, IT security.

#### Введение

В общем объеме производимых вычислений неуклонно растет доля той совокупности современных технологий, которая получила броское наименование «облачные вычисления» [1]. Если раньше через Интернет были доступны, по большей части, лишь приложения, ответственные за обмен электронными сообщениями и публикацию web-страниц, то сегодня глобальная сеть все чаще используется для работы со многими другими программными приложениями и базами данных.

Для дальнейшего развития распределенных сетевых приложений и концентрации вычислительных ресурсов все более важной становится проблема обеспечения информационной безопасности. Целью данной работы является анализ проблем обеспечения информационной безопасности при переходе к облачным вычислениям.

#### Основные понятия и классификация

Облачные вычисления – относительно новый термин, на сегодняшний день уже прочно вошедший в общепринятую практику как за рубежом, так и в России. Он используется для обозначения совокупности современных технологий, применяемых для распределенной обработки данных, при которой ресурсы вычислительных систем, программное обеспечение и информация предоставляются пользователю по запросу через сеть [2].

Под облаком принято понимать единый с точки зрения клиента виртуальный сетевой узел, реализующий вычислительные службы (один или несколько серверов), который физически может представлять собой географически распределенную совокупность взаимосвязанных аппаратных узлов компьютерной сети. В дальнейшем под поставщиком подразумевается организация, поставляющая услуги облачных вычислений, под потребителем – организация или физическое лицо, приобретающее такие услуги, а под пользователем – физическое лицо (сотрудник, партнер, гипотетический субъект – аппаратный или программный модуль), непосредственно использующее услуги, предоставленные поставщиком потребителю. При этом регулирование организации безопасности облачных вычислений и данных осуществляется на основании договора о предоставлении услуг (SLA – Service Line Agreement), заключаемого между поставщиком и потребителем. В зависимости от вида предоставляемых услуг варьируется и распределение ответственности поставщика и потребителя в вопросах обеспечения безопасности вычислений.

Обобщенная модель системы облачных вычислений представлена на рисунке.

Предполагается, что средства разных уровней приведенной обобщенной модели облачных вычислений (инфраструктуры, платформы, приложений) могут быть предоставлены одним поставщиком потребителю в качестве услуги (as a service), в то время как другие средства потребитель может получать у иного поставщика или контролировать и администрировать самостоятельно.

Рассмотрим три основных вида услуг облачных вычислений [3].

1. IaaS (Infrastructure-as-a-Service) – инфраструктура как сервис.

Поставщик предоставляет потребителю готовую IT-инфраструктуру для развертывания своих приложений. Такая инфраструктура включает в себя, как минимум, средства коммуникации и бесперебойное электропитание. Также могут быть предоставлены средства для исполнения приложений в виде выделенных или виртуальных серверов.

Потребитель получает непосредственный и (или) удаленный доступ для развертывания, настройки и сопровождения требуемых базовых программных продуктов (операционная система, система управления базой данных, система универсальной коммуникации и пр.), специальных программных продуктов (связанных с конкретной проблемной областью, например, система бухгалтер-

ского учета) и индивидуальных программных разработок (как правило, собственных или заказных программных продуктов), а также удаленный доступ для пользователей.

2. PaaS (Platform-as-a-Service) – платформа как сервис.

Поставщик предоставляет потребителю интегрированную платформу для развертывания и выполнения приложений. Также могут быть предоставлены соответствующие средства разработки, отладки, поддержки.

Потребитель получает удаленный доступ для развертывания, настройки и сопровождения требуемых специальных программных продуктов (связанных с конкретной проблемной областью, например, система бухгалтерского учета) и индивидуальных программных разработок (как правило, собственных или заказных программных продуктов), а также удаленный доступ для пользователей.

Базовые программные продукты (операционная система, система управления базой данных и пр.) предоставляются и сопровождаются поставщиком услуг.

3. SaaS (Software-as-a-Service) – программное обеспечение как сервис.

Поставщик предоставляет потребителю готовое для удаленного использования приложение, обеспечивающее решение тех или иных прикладных задач. Потребитель получает удаленный доступ только для пользователей заказанного программного продукта без привилегий администрирования информационной системы.

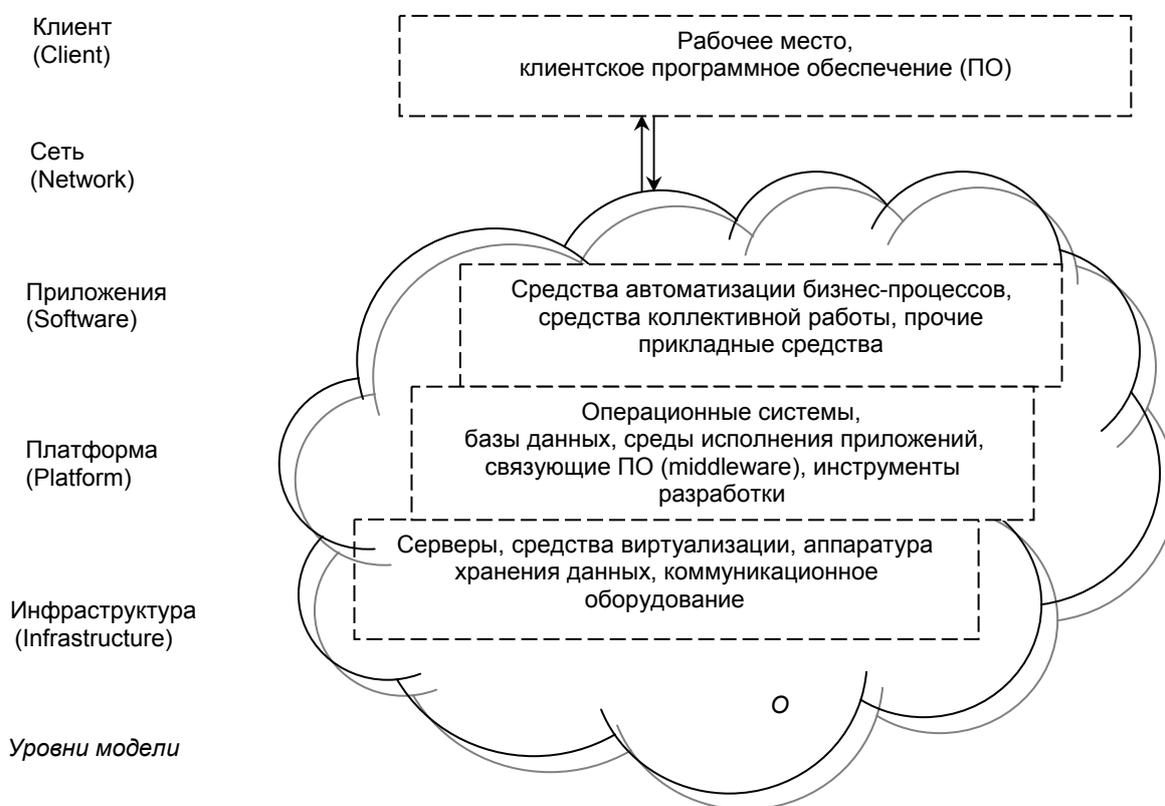


Рисунок. Обобщенная модель системы облачных вычислений

Перечисленные три модели вычислений касаются непосредственно организации вычислений внутри облака. При этом вовсе не подразумевается, что каждая последующая модель более высокого уровня включает в себя предыдущую, иначе говоря, PaaS  $\diamond$  (Infrastructure + Platform) as a Service, SaaS  $\diamond$  (Infrastructure + Platform + Software) as a Service. Однако на рынке наиболее распространены именно такие включающие предложения для конечного потребителя, вплоть до предоставления готовых пользовательских рабочих мест в качестве услуги. В то же время ничто не мешает сочетать перечисленные виды услуг произвольным образом, используя инфраструктуру, платформы и приложения от разных поставщиков услуг.

При каждом из указанных видов услуг поставщик несет ответственность за организацию безопасности вычислений на соответствующих уровнях – инфраструктуры, базовых программных продуктов (платформы), специальных прикладных программ (приложения). В случаях, если поставщик обеспечива-

ет для потребителя услуги всех указанных уровней, ответственность потребителя за организацию безопасности вычислений минимальна.

Вычисления могут быть организованы так, что средства всех перечисленных уровней не приобретаются как услуги, а полностью управляются и контролируются ИТ-специалистами компании, использующей облачные вычисления. Можно представить, что такая компания является и поставщиком, и потребителем услуг облачных вычислений одновременно. Это позволяет получить некоторые преимущества облачных вычислений, избежав при этом рисков, связанных с приобретением инфраструктуры, платформы или приложений как услуг. Такой подход обычно называют частным облаком, что создает путаницу в терминологии вследствие конфликта с другим, тоже весьма распространенным значением этого термина, о котором будет сказано ниже.

По пользовательской аудитории (области видимости) [2, 4] можно выделить пять классов облаков:

1. Private cloud (for internal users) – частное облако. Пользователями такого облака является ограниченный круг лиц, как правило, сотрудники и контрагенты соответствующей компании-потребителя. Такое облако может быть доступно только внутри локальной сети предприятия и/или посредством VPN-соединений;
2. Community cloud – облако для сообщества. Пользователями такого облака являются участники того или иного сообщества, связанного с потребителем определенными регламентными соглашениями;
3. Public cloud (for external users) – публичное облако. Пользователем такого облака может стать любое лицо, имеющее возможность сетевого доступа к службам облака, при выполнении им определенных условий (наличие электронной почты и т.д.) или без всяких условий (по запросу);
4. Hybrid cloud – гибридное облако. С дальнейшим развитием облачных вычислений перечисленные основные классы облаков и виды услуг образуют более сложные сочетания, которые называют гибридными облаками. Каждое такое облако может сочетать инфраструктуру, платформу и приложения от разных поставщиков услуг, а также предоставлять сервисы, некоторые из которых доступны для ограниченного круга пользователей, некоторые – для сообщества, а некоторые – публично;
5. Intercloud – Интерклауд. В ходе развития облачных вычислений возник новый термин – Интерклауд [4], подразумевающий глобальное «облако облаков» как совокупность групп взаимосвязанных серверов – узлов сети, взаимодействующих посредством «сети сетей» Интернет.

Каждый класс облака предусматривает индивидуальный подход к обеспечению защиты информации, отражающий специфику сетевой топологии и политику авторизации пользователей.

### **Стандартизация облачных вычислений**

Поскольку технологии облачных вычислений только начинают свой путь к массовому потребителю, одной из основных проблем обеспечения безопасности является отсутствие общепринятых стандартов предоставления облачных услуг. Следовательно, и в вопросах обеспечения безопасности при облачных вычислениях не существует общепринятых стандартов. Проблема стандартизации в обеспечении информационной безопасности находится в процессе решения по трем основным направлениям.

Во-первых, игроки на рынке облачных вычислений создают собственные корпоративные стандарты, которые вовсе не обязательно становятся достоянием общественности. Основное, на что вынужден полагаться потребитель в таком случае, – это имя и репутация компаний, активно продвигающих свои облачные услуги. Среди таких компаний сегодня выступают, например, Microsoft, Google, Adobe, Amazon, IBM, Force.com, VMware и др. Не исключено, что выработанные поставщиками услуг собственные стандарты будут опубликованы и станут общепринятыми.

Во-вторых, компании-поставщики услуг адаптируют свои предложения согласно уже существующим, устоявшимся стандартам информационной безопасности (сертификация НАТО и GIAC [5], BSI [6], и т.д.), проходят соответствующую сертификацию, получая в результате свидетельство о соответствии предоставляемых информационных услуг определенным регламентирующим документам. Эта работа на сегодняшний день особенно актуальна в аспекте получения заказов от государственных и общественных организаций как долгосрочных потребителей услуг облачных вычислений.

И, в-третьих, различные общественные, правительственные и коммерческие организации предпринимают усилия по выработке регламентирующих требований к созданию безопасных облачных служб обработки информации. Так, Европейское агентство сетевой и информационной безопасности (ENISA), созданное в 2004 г. для совершенствования сетевой и информационной безопасности в Евросоюзе, выпустило документ [7]. Группа компаний, включающая таких крупнейших игроков, как AMD, IBM, CISCO и SUN, подписали так называемый «Манифест открытого облака» (Open Cloud Manifesto), направленный на создание и сохранение как можно большей открытости облачных систем, что, безусловно, в интересах потребителей [8]. Ряд известных компаний сформировали группу «Альянс облачной безопасности». Группа выпустила обширный документ, подробное руководство по безопасности облач-

ных вычислений [9]. Группа специалистов на форуме Jericho Forum консорциума Open Group выработала ряд рекомендаций по безопасному использованию облачных вычислений, предложив подход к выбору архитектуры системы облачных вычислений для безопасной работы [10].

Известные специалисты по информационной безопасности уже представляют общественности свои наработки в области облачных вычислений. Так, например, в одном из самых уважаемых издательств академической литературы John Wiley & Sons вышла заслуживающая серьезного внимания работа [11]. Издательство уже выпустило и планирует выпустить ряд изданий, посвященных использованию и безопасности облачных вычислений.

### **Специфика обеспечения информационной безопасности при облачных вычислениях**

Рассмотрим основные достоинства облачных вычислений с точки зрения обеспечения информационной безопасности.

– Снижение затрат.

При росте масштабов вычислительных систем любые меры по обеспечению безопасности обходятся дешевле в расчете на одного пользователя. Концентрация ресурсов позволяет снизить как начальные, так и текущие расходы на защиту информации (например, на приобретение аппаратных средств защиты, использование усиленной аутентификации, резервное копирование, привлечение специалистов по информационной безопасности, на разработку и сопровождение концепции защиты информации, дизайн и стабилизацию производственных процессов и пр.).

– Оптимизация структуры инвестиций.

Облачные вычисления позволяют оптимизировать два ключевых показателя экономической эффективности информационной инфраструктуры. Возврат инвестиций в инфраструктуру (return of investments, ROI) легко планируется и начинается с момента использования облачных служб. Начальные инвестиции снижаются, потребители платят только за действительно необходимые и заказанные используемые ресурсы, службы и функции. Дополнительные и внеплановые инвестиции со стороны потребителя исключены, поскольку, в случае возникновения сбоев служб, ответственность несет поставщик.

Совокупная стоимость владения (total cost of ownership, TCO) во многих случаях существенно ниже, чем при организации собственных центров обработки данных. Затраты на содержание, сопровождение, минимизацию рисков, сервисное обслуживание и масштабирование, обслуживающий персонал и сопутствующие расходы (электроэнергия, производственные площади, страхование, противопожарная защита) включены в абонентскую плату.

Наибольший эффект от оптимизации структуры инвестиций могут получить предприятия малого и среднего бизнеса. Компании, для которых эксплуатация IT-инфраструктуры не связана с основным направлением деятельности, могут избежать вложений в непрофильные активы.

– Повышение защищенности данных и перенос ответственности.

Предоставление услуг облачных вычислений подразумевает высоконадежное хранение и резервирование данных, функции быстрого восстановления в случае отказа, сертифицированное шифрование данных при хранении и при пересылке между поставщиком и пользователями. При надлежащем обеспечении всех перечисленных условий поставщиком хранения данных в облаке, можно сравнить с арендой банковского сейфа. Ответственность за обеспечение информационной безопасности на соответствующих уровнях переносится с потребителя на поставщика.

При предоставлении системных ресурсов от поставщика потребителю в виде услуги возникает ряд организационных рисков, которые необходимо учитывать при использовании облачных вычислений.

Рассмотрим основные виды таких рисков.

– Зависимость от поставщика услуг.

Отсутствие общепринятых стандартов может поставить потребителя в зависимость от поставщика услуг. Необходимым условием минимизации этого риска является разработка, верификация и сопровождение концепции миграции данных и приложений к альтернативному поставщику.

– Невозможность соблюдения вновь возникающих требований.

Развитие бизнеса потребителя услуг может породить новые требования к системе вычислений, которые не могут быть соблюдены при работе с имеющимся поставщиком. Для минимизации этого риска потребителю необходимо заблаговременно разработать и внедрить производственные процессы отслеживания, оценки и планирования реализации новых свойств и функций вычислительных процессов (release management).

– Ограничение контроля над используемыми службами.

Используя услуги облачных вычислений, потребитель обладает не только ограниченной ответственностью за информационную безопасность, но и ограниченным контролем над эксплуати-

руемыми службами. Степень ограничений определяется выбранной моделью облачной инфраструктуры и положениями договора (SLA) между поставщиками и потребителем.

Концентрация и совместное использование вычислительных ресурсов также порождает ряд технических рисков, специфичных для облачных вычислений.

Рассмотрим эти риски.

- Нарушение изоляции данных.

Облачные вычисления в силу коллективного использования системных ресурсов требуют надежной изоляции пользовательских данных друг от друга. Потребителю следует обратить внимание на то, на каких уровнях обобщенной модели обработки данных имеет место участие других пользователей в вычислительном процессе – на уровне инфраструктуры (например, виртуальные серверы, совместно используемые аппаратные ресурсы и пр.), на уровне платформы (например, используемая система виртуализации и пр.), на уровне приложения (например, системы управления базами данных, web-приложения и службы и пр.).

Наибольшую опасность в этом плане представляют системы, не поддерживающие разделение мандатов и (или) партиционирование, в которых один аппаратный модуль (например, центральный процессор), фрагмент кода базового программного обеспечения (например, платформы виртуализации) или экземпляр прикладного приложения (процесс) используется несколькими различными пользователями от разных потребителей параллельно.

- Использование уязвимостей системы облачных вычислений.

Передаваемые и хранимые в системе облачных вычислений данные могут быть скомпрометированы или фальсифицированы в обход правил и процессов обеспечения безопасности в результате эксплуатации возможных уязвимостей на различных уровнях системы облачных вычислений. Информация о таких уязвимостях может оказаться общедоступной до того, как проблема будет решена поставщиком.

Для минимизации этого риска необходимо использовать шифрование передаваемых и хранимых данных. При этом отдельного внимания заслуживает организация управления ключами шифрования и сертификатами, используемыми для шифрования данных в организации – потребителе услуг облачных вычислений.

- Истощение ресурсов и отказ в обслуживании.

Превышение уровня запросов к службам над максимальной допустимой нагрузкой, в том числе вследствие DoS-атак (Denial of Service – отказ в обслуживании), может привести к недоступности системы облачных вычислений для пользователей. В этой связи особое внимание следует уделить гарантированным параметрам доступности вычислительных систем и восстановления в случае сбоев, которые предусмотрены договором (SLA) между поставщиком и потребителем.

- Несовместимость разработок.

К сбоям в системе безопасности могут привести проблемы аппаратной или программной совместимости (например, разработок для конкретной платформы с программным интерфейсом платформы). Для минимизации таких рисков следует обратить внимание на сертификацию аппаратной и программной части вычислительных систем и служб, предоставляемых поставщиком, ознакомиться с организацией поддержки в процессе эксплуатации (сервисное обслуживание, обновление и т.д.), выбрать модель организации инфраструктуры вычислений, предусматривающую минимальные требования к компетентности пользователей.

### **Заключение**

Использование облачных вычислений влечет за собой не только значительные экономические преимущества, такие как снижение затрат, оптимизация структуры инвестиций, повышение защищенности данных и перенос ответственности за обеспечение безопасности на поставщика услуг, но и значительные риски с точки зрения обеспечения информационной безопасности.

Рассмотренные виды услуг облачных вычислений и основных рисков, возникающих при их использовании, среди которых можно выделить организационные (такие как зависимость от поставщика услуг, невозможность соблюдения новых требований, ограничение контроля над используемыми службами) и технические (такие как нарушение изоляции данных, эксплуатация уязвимостей системы облачных вычислений, истощение ресурсов и отказ в обслуживании, несовместимость используемых разработок), лежат в основе рекомендаций для перехода на облачные технологии.

Фундаментальный и многосторонний анализ рисков для информационной безопасности является неотъемлемой предпосылкой разработки и сопровождения успешных и эффективных мер по защите информации в условиях облачных вычислений.

Несмотря на все достоинства облачных вычислений, на сегодняшний день потребителям необходимо взвешенно подходить к их внедрению, органично сочетать традиционные (локальные) и облачные инфраструктуры в организации вычислительного процесса.

Авторы планируют продолжить обсуждение ключевых вопросов предложенной тематики, обеспечивающей защиту информации, в дальнейших публикациях.

### Литература

1. XaaS Check 2010 – Status Quo und Trends im Cloud Computing. XaaS Check [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.xaas-check.eu/download.php?cat=00\\_Willkommen&file=2010-XaaS-Check-Report.pdf](http://www.xaas-check.eu/download.php?cat=00_Willkommen&file=2010-XaaS-Check-Report.pdf), свободный. Яз. нем. (дата обращения 04.12.2010).
2. Cloud Computing. Wikipedia, the free encyclopedia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud\\_computing](http://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_computing), свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.12.2010).
3. Сычев А.В. Теория и практика разработки современных клиентских веб-приложений. Интернет-Университет Информационных Технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.intuit.ru/department/internet/thpdevweba/24/thpdevweba\\_24.html](http://www.intuit.ru/department/internet/thpdevweba/24/thpdevweba_24.html), свободный. Яз. рус. (дата обращения 04.12.2010).
4. Bernstein David, Ludvigson Erik, Sankar Krishna, Diamond Steve, Morrow Monique. Blueprint for the Intercloud – Protocols and Formats for Cloud Computing Interoperability// IEEE Computer Society. – 2009.
5. GIAC Mission Statement. Global Information Assurance Certification [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.giac.org/overview/statement.php>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.12.2010).
6. BSI Functions. Federal Office for Information Security [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.bsi.bund.de/clin\\_174/EN/TheBSI/Functions/functions\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/clin_174/EN/TheBSI/Functions/functions_node.html), свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.12.2010).
7. Cloud computing: Benefits, risks and recommendations for information security. The official web site of The European Union [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.enisa.europa.eu/act/rm/files/deliverables/cloud-computing-risk-assessment>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.11.2010).
8. Open Cloud Manifesto. Opencloudmanifesto.org. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.opencloudmanifesto.org/opencloudmanifesto1.htm>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.12.2010).
9. Security Guidance for Areas of Focus in Cloud Computing V.2. 1. Cloud Security Alliance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cloudsecurityalliance.org/csaguide.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.12.2010).
10. Cloud Cube Model: Selecting Cloud Formations for Secure Collaboration. Open group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.opengroup.org/jericho/cloud\\_cube\\_model\\_v1.0.pdf](http://www.opengroup.org/jericho/cloud_cube_model_v1.0.pdf), свободный. Яз. англ. (дата обращения 04.12.2010).
11. Ronald L. Krutz, Russell Dean Vines. Cloud Security: A Comprehensive Guide to Secure Cloud Computing. – John Wiley & Sons, Inc., 2010.

<b>Беккер Михаил Яковлевич</b>	– Microsoft Deutschland GmbH, ведущий консультант, mbecker@microsoft.com
<b>Гатчин Юрий Арменакович</b>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, gatchin@mail.ifmo.ru
<b>Кармановский Николай Сергеевич</b>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, karmanov50@mail.ru
<b>Терентьев Андрей Олегович</b>	– Законодательное собрание Санкт-Петербурга, главный помощник депутата, 9444828@mail.ru
<b>Федоров Дмитрий Юрьевич</b>	– Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет, ассистент, dmitry.yuryevich.fedorov@gmail.com

УДК 681.51.015

**ТЕХНОЛОГИЯ LEGO MINDSTORMS NXT В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ  
ОСНОВАМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ****А.А. Бобцов, Ю.А. Капитанюк, А.А. Капитонов, С.А. Колюбин, А.А. Пыркин,  
С.А. Чепинский, С.В. Шаветов**

Описаны лабораторные работы (ЛР) с использованием установок, основанных на технологии Lego Mindstorms NXT и состоящих из ряда электромеханических систем. Установки используются для научных и образовательных целей, позволяя исследовать и сравнивать различные алгоритмы идентификации и адаптивного управления. Представлены результаты апробации теоретических алгоритмов адаптивного управления для различных мобильных роботов, собранных из конструктора Lego Mindstorms NXT (гусеничных, колесных и шагающих), и мехатронной маятниковой установки с инерционным маховиком на подвижном основании.

**Ключевые слова:** LEGO Mindstorms NXT, адаптивное управление, мобильные роботы, мехатронный комплекс, обучение студентов.

**Введение**

*Скажи мне, и я забуду;  
Покажи мне, и я, может быть, запомню;  
Вовлеки меня, и я пойму.  
Конфуций (450 г. до н.э.)*

В современной России, как и в мире в целом, падает интерес школьников и студентов к изучению точных наук, среди которых важнейшими являются математика, физика, информатика и т.п. Приходится признать тот факт, что средний уровень подготовки по математике и физике значительно упал. Можно бесконечно рассуждать о причинах, но, представляется, надо искать выходы из данной ситуации и поднимать статус точных наук у школьников и студентов. Именно привлечение или вовлечение в образовательный процесс является тем инструментом, который позволит вернуть былую славу и популярность математике, физике и информатике. Сегодня информатика пользуется популярностью, но лишь как придаток к модному словосочетанию «информационные технологии». Информационные технологии стали крайне популярными среди молодежи в мире, в том числе и в России – возможно, из-за молодости информационных технологий как направления в науке, возможно, из-за той свободы во времени, которую получает специалист, не привязанный ни к расписанию работы офиса, ни к рабочему месту. Конечно, это и большой уровень заработной платы, и, что немаловажно, романтика. Молодые люди видят с экрана кино и телевизора, как нищий программист-отшельник спасает мир одним нажатием кнопки. Однако мало кто даже из программистов среднего уровня понимает, что во главу угла положена именно математика. За математикой следует теория автоматического управления, где возникают те же проблемы, хотя, на взгляд авторов, теория управления сочетает в себе математику, и физику, и информатику, электротехнику и электронику. Часто молодые люди только в аспирантуре начинают понимать, что точные науки им крайне необходимы.

Такие же выводы можно сделать и при подготовке инженеров, специализирующихся в области разработки систем управления. Они полагают, что математика и физика им не нужны, так как они без труда запрограммируют микроконтроллер, который будет решать сверхзадачи. «Зачем нам знать дифференциальные уравнения и теорию устойчивости Ляпунова?» – говорят они и сильно разочаровываются впоследствии, когда понимают, что студенческое время упущено, а теоретические знания необходимы. Читатель разумно спросит авторов: «Почему вы все время рассуждаете о математике и теории управления, хотя статья носит другое название?». Дело в том, что в теории управления самым романтичным разделом является теория адаптивных систем. На взгляд авторов, крайне романтично компенсировать все неопределенности объекта и достигать желаемой цели управления. Показывать студенту обычные следящие системы, построенные на базе двигателя постоянного тока, может быть кому-то интересно. Но вот она, романтика: студент программирует контроллер Lego NXT, и его робот совершает маленькие чудеса, обходя все неизвестные препятствия.

Вовлечение в обучение и романтика обучения лежат в основе предлагаемой образовательной технологии. Теория адаптивных систем как раздел теории автоматического управления позволит сделать науку об управлении более привлекательной среди молодежи. В данной работе на примере проведения конкретных ЛР освещается опыт авторов, полученный при обучении магистрантов кафедры систем управления и информатики СПбГУ ИТМО по дисциплине «Основы адаптивного управления».

Лабораторная работа № 1 «Стабилизация перевернутого маятника»

Теоретические положения, используемые в данной ЛР, изложены в ставших уже классическими работах [1–7]. Установка, на которой выполняется ЛР, построена на базе технологий Lego NXT. В качестве алгоритмов адаптивного управления используются подходы, опубликованные в [1–3, 8–24]. Теория адаптивных систем развивалась на базе двух подходов – прямого адаптивного управления и метода, предусматривающего предварительную идентификацию неизвестных параметров объекта [1, 4–7]. В данной ЛР на базе идентификационного подхода исследуется система адаптивного управления маятником с инерционным маховиком. Рассматривается однозвенный маятник, пассивно закрепленный на оси вращения, с расположенным на его конце, удаленном от оси вращения, инерционным маховиком. На рис. 1, а, представлено схематическое изображение маятника с инерционным маховиком на подвижном основании. Конструкция механической части маятниковой системы должна быть максимально простой для быстрой сборки, а также достаточно прочной, чтобы выдерживать механические колебания и вибрацию при проведении экспериментов. Для создания подвижного основания (тележки) используется конструктор LEGO. Управление движением маятника осуществляется за счет изменения направления и скорости вращения инерционного маховика. В свою очередь, управление вращением инерционного маховика осуществляется посредством регулирования напряжения в цепи питания якоря электродвигателя постоянного тока, смонтированного совместно с маховиком на конце маятника.

Математическая модель [1, 12–15, 17, 18, 22, 23] установки в пространстве состояний может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + a \sin \theta = -b_p \bar{u}, \\ \ddot{\theta}_r = b_r \bar{u}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол крена маятника относительно вертикали,  $\theta_r$  – угол поворота инерционного маховика относительно вертикали,  $a$ ,  $b_p$ ,  $b_r$  – неизвестные комплексные параметры маятниковой системы. Ставится задача стабилизации маятника в верхнем положении равновесия (рис. 1, б) из произвольного начального состояния. Решение поставленной задачи разбивается на два этапа – раскачка маятника и его стабилизация в перевернутом положении. В качестве закона управления был выбран алгоритм, опубликованный в [12–15, 22, 23]. Для раскачки маятника и приведения его в заданный сектор используется метод скоростного градиента [3], позволяющий системе накопить энергию, соответствующую потенциальной энергии перевернутого маятника. Благодаря такому подходу маятник входит в заданную область с минимальной скоростью. Второй алгоритм, основанный на методе модального управления, обеспечивает стабилизацию маятника в перевернутом положении. Такая гибридная система управления была предложена в [1]. Однако этот подход предполагает точное знание всех массогабаритных параметров системы для формирования закона управления.

Основными отличиями рассматриваемого в ЛР подхода является параметрическая неопределенность и подвижное основание, собранное из конструктора LEGO [12, 13, 15, 23]. Изучаемый метод включает в себя адаптивный идентификационный контур, в котором в режиме онлайн происходит оценивание параметров  $a$ ,  $b_p$ ,  $b_r$  модели (1). Оценки, полученные на основе метода наименьших квадратов, подставляются в алгоритмы раскачки и стабилизации. Результат превосходит все ожидания. Маятник еще быстрее раскачивается и удерживается в перевернутом неустойчивом положении, в то время как оценки трех параметров стремятся к некоторым постоянным значениям.

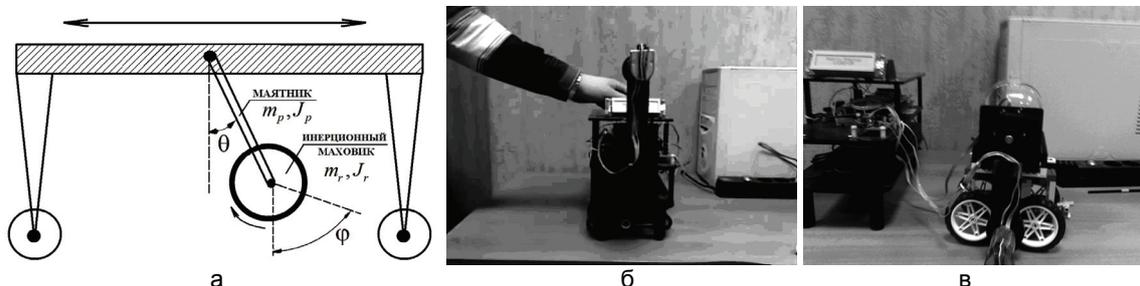


Рис. 1. Маятник с инерционным маховиком на подвижном основании: структурная схема маятника (а); маятник в верхнем неустойчивом положении равновесия (б); маятник на подвижном основании (в)

Данная конструкция оказалась интересной для решения принципиально другой задачи – компенсации внешнего возмущения [16–18, 21, 24]. Ко всей конструкции, свободно перемещаемой в горизонтальной плоскости, прикладывается возмущающее воздействие, создаваемое рукой и имитирующее нерегулярную качку (рис. 1, в). Рассматривается задача стабилизации нижнего положения равновесия ма-

ятника, возмущенного внешним воздействием, при условии запаздывания в канале управления [17, 18]. Для исследования работы алгоритмов в условиях запаздывания программно создается буфер в оперативной памяти контроллера мехатронного комплекса, через который пропускается функция управления: сигнал управления подается на вход буфера, а выходной сигнал буфера поступает на объект управления. Величина имитируемого запаздывания определяется размером буфера. Закон управления основан на методе адаптивной идентификации частоты гармонического сигнала [8, 16, 21, 24]. В данной ЛР запрограммирован алгоритм идентификации частоты возмущающего воздействия, обладающий робастными свойствами по отношению к нерегулярным составляющим возмущения. Алгоритм компенсации возмущения формирует сигнал управления, подаваемый на двигатель, с тем, чтобы парировать возмущения и удерживать маятник в вертикальном устойчивом положении без колебаний.

### Лабораторная работа № 2 «Движение вдоль неизвестной траектории»

В качестве объекта управления рассматривается мобильный робот с гусеничным приводом, собранный из конструктора Lego NXT. Сначала решается более простая задача – слежение за подвижным объектом или целью. Объектом слежения может быть любой предмет, например, книга (рис. 2). На макете установлен ультразвуковой датчик, измеряющий дистанцию до книги. Алгоритм управления сравнивает текущее расстояние с заданным и на основе ошибки слежения  $e(t)$  формирует сигнал управления на сервоприводы. Закон управления имеет вид

$$u_1 = u(t), u_2 = u(t), \quad (2)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – сигналы управления, подаваемые непосредственно на сервоприводы. Для расчета сигнала управления  $u(t)$  был использован метод «последовательный компенсатор» [2, 9–11, 19, 20]:

$$u(t) = -k\alpha(p)\xi_1(t), \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \sigma\xi_2, \\ \dot{\xi}_2 = \sigma\xi_3, \\ \dots \\ \dot{\xi}_{p-1} = \sigma(-k_1\xi_1 - k_2\xi_2 - \dots - k_{p-1}\xi_{p-1} + k_1e), \end{cases} \quad (4)$$

где число  $k > 0$ ;  $\alpha(p)$  – гурвицев полином степени  $p-1$ , где  $p$  – относительная степень выбираемой модели движения робота; число  $\sigma > k$ ; коэффициенты  $k_i$  рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (4) при нулевом входе. Настройка параметров  $k$  и  $\sigma$  осуществлялась за счет увеличения их значений до тех пор, пока не выполнялось условие [11]

$$|e(t)| < \delta_0 \text{ для } t \geq t_1, \quad (5)$$

где положительное число  $\delta_0$  задается разработчиком системы управления.

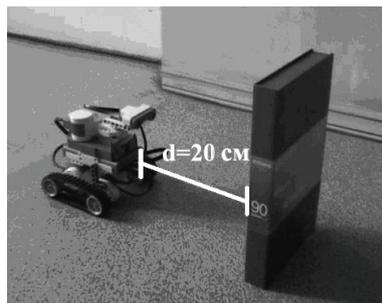


Рис. 2. Удержание заданной дистанции

Для настройки параметра  $k$  использовался алгоритм

$$k(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau, \quad \sigma = \sigma_0 k^2, \quad \lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & \text{при } |e(t)| > \delta_0 \\ 0 & \text{при } |e(t)| \leq \delta_0, \end{cases} \quad (6)$$

где числа  $\lambda_0 > 0$  и  $\sigma_0 > 0$ . Далее рассматривалась задача адаптивного управления движением мобильного робота вдоль неизвестной траектории (рис. 3, а, б). На базе конструктора Lego NXT собрана мобильная установка с гусеничным приводом, на которой установлен ультразвуковой датчик расстояния, измеряющий дистанцию до стены, вдоль которой происходит движение. Кривизна стены заранее не определена. Робот, двигаясь в направлении стены, определяет расстояние до нее, сравнивает это значение с

заданным и на основе траекторной ошибки формирует сигналы управления на приводы. Закон управления имеет вид

$$u_1 = u_v(t) + u(t), \quad u_2 = u_v(t) - u(t), \quad (7)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  – сигналы управления, подаваемые непосредственно на сервоприводы, функция  $u_v$  выбирается пропорционально скорости, с которой макет будет двигаться на прямом участке траектории, функция  $u$  вносит рассогласование между приводами, что обуславливает поворот робота влево или вправо. Для расчета сигнала управления  $u(t)$  использовался алгоритм (3)–(6).

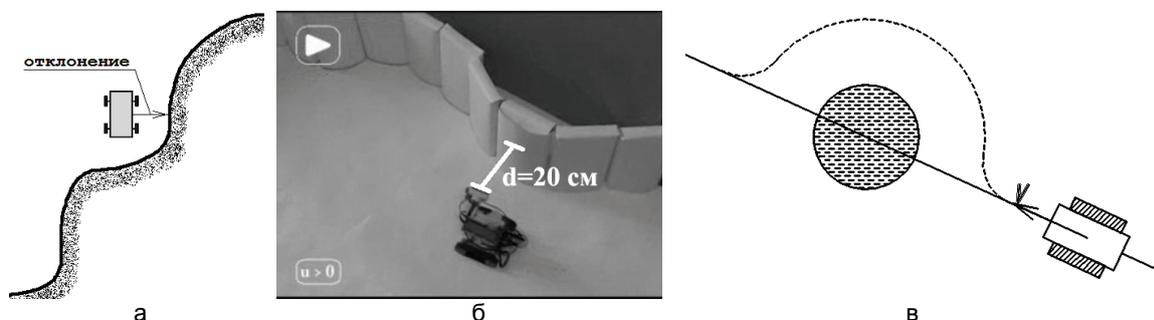


Рис. 3. Движение мобильного робота вдоль неизвестной траектории: схема движения (а); практическая реализация (б); схема объезда препятствия и возврата на заданную траекторию (в)

Усложняя задачу управления роботом, поставим на пути его движения внешнее препятствие (рис. 3, в). Робот движется по заданной траектории и видит на своем пути препятствие. Подъехав к нему на некоторое расстояние, робот начинает объезжать препятствие, удерживая заданную дистанцию от него. По мере приближения к основной траектории робот начинает выруливать на нее, оставляя позади препятствие. При движении по заданной траектории может быть использован алгоритм (3)–(7) при условии, что доступна измерению траекторная ошибка  $e(t)$ . Этот же подход используется для построения алгоритма объезда препятствия на заданном расстоянии.

### Лабораторная работа № 3 «Адаптивное управление двух- и одноколесными балансирующими роботами»

В ЛР предполагается, что робот имеет только два колеса (рис. 4, а, б). В первую очередь необходимо решить задачу стабилизации робота в вертикальном положении. Решение этой задачи аналогично стабилизации перевернутого маятника, рассмотренного в ЛР № (рис. 1, б). Далее решается задача слежения (рис. 2), но уже на базе двухколесного балансирующего робота. Закон управления имеет комбинированную структуру:

$$u_1 = u_s(t) + u(t), \quad u_2 = u_s(t) + u(t), \quad (8)$$

где алгоритм  $u_s$  рассчитывается из соображений стабилизации установки, функция  $u(t)$  выбирается в виде (3)–(6), как и в ЛР № 2 для гусеничного устойчивого робота. На рис. 4, а, представлен результат использования комбинированного управления. Робот удерживает вертикальное положение равновесия и заданную дистанцию до объекта слежения, равную 40 см. На рис. 4, б, показан более сложный эксперимент: поверхность, на которой балансирует робот, наклонена, причем угол наклона плавно изменяется, а робот сохраняет вертикальное положение и заданное расстояние до препятствия.

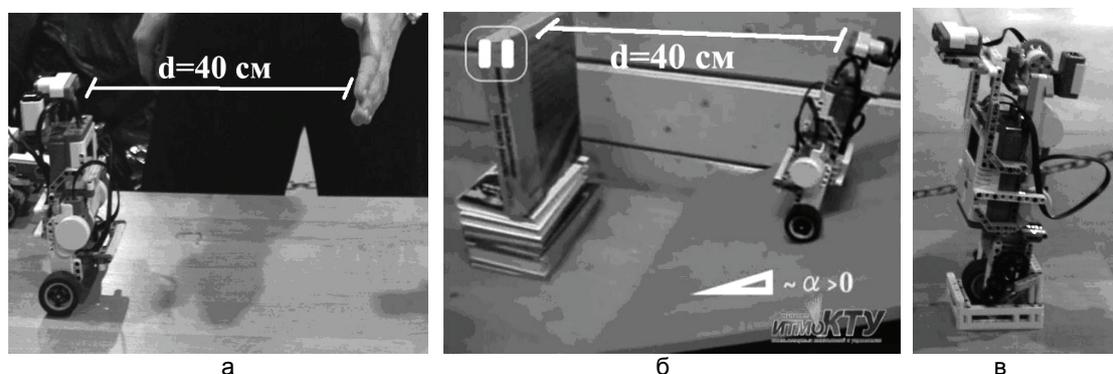


Рис. 4. Двухколесный и одноколесный мобильные роботы: двухколесный робот удерживает заданную дистанцию (а); двухколесный робот удерживает заданную дистанцию на наклонной поверхности (б); макет одноколесного робота (в)

Интересной и весьма сложной задачей является удержание равновесия для одноколесного робота (рис. 4, в). Наряду с задачами слежения и управления вдоль неизвестной траектории, в этой части ЛР необходимо решить задачу стабилизации вертикального положения.

#### **Лабораторная работа № 4 «Адаптивное управление двуногим шагающим роботом»**

Здесь исследуются методы адаптивного управления для двуногого шагающего робота (рис. 5). На рис. 5, а, представлен эксперимент по управлению шагающим роботом при решении задачи слежения за целью на заданном расстоянии. Данная задача, в отличие от предыдущих, усложнена нетривиальностью конструкции робота. Необходимо заставить робот ходить вперед и назад. Далее, как и в ЛР № 2 и № 3, решаются задачи управления движением робота относительно неизвестных траекторий.

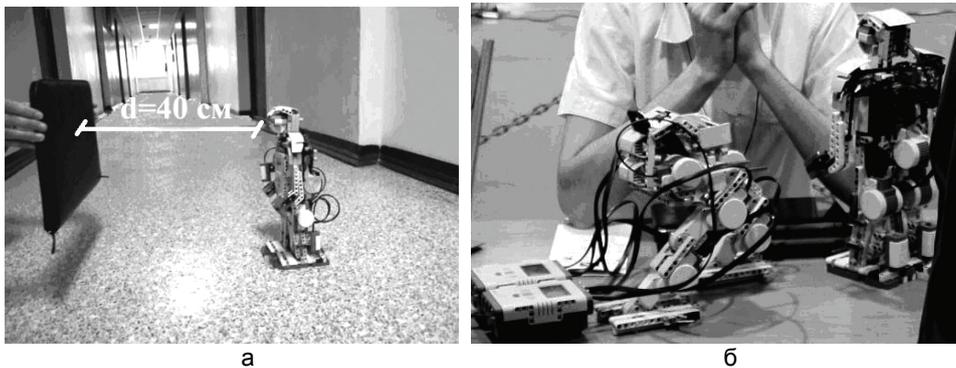


Рис. 5. Двуногие шагающие роботы: удержание заданной дистанции шагающим роботом (а); роботизированные ноги с тремя степенями свободы (б)

На рис. 5, б, показан эскизный образец двуногого шагающего робота, ноги которого имеют три управляемые степени свободы по аналогии с обычной ногой, у которой есть коленный и голеностопный суставы. Модель может запоминать движения, которые ей показывают на стадии «обучения», а затем воспроизводить их. В рамках ЛР студенту предложено исследовать адаптивные алгоритмы, обеспечивающие устойчивую прямолинейную походку по горизонтальной и наклонной поверхностям, а также задачи слежения за объектом, ходьба вдоль неизвестной траектории и ходьба с обходом препятствий на заданном расстоянии.

#### **Заключение**

*Пределы наук походят на горизонт: чем ближе подходят к ним, тем более они отодвигаются.  
Пьер Буаст*

В работе показаны способы вовлечения студентов в процесс изучения точных наук. Отклики студентов, их заинтересованность и идеи ставят перед авторами новые задачи, стимулируя развитие теории адаптивного управления. Уже на этапе обучения студенты начинают чувствовать себя полноправными сотрудниками кафедры, а преподаватели – наставниками, которые ищут возможности для реализации их замыслов, направляют их идеи в нужное русло.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 09-08-00139-а), Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты № П498 от 8 августа 2010г. и № П127 от 13 апреля 2010г.) и грантом Президента России для молодых ученых – кандидатов наук (грант № МК-3486.2009.8).

#### **Литература**

1. Astrom K.J., Block D.J., Spong M.W. The Reaction Wheel Pendulum. – 2001.
2. Bobtsov A.A. A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity // Automatica. – 2005. – № 12. – P. 1277–1280.
3. Fradkov A.L., Miroshnik I.V. and V.O. Nikiforov. Nonlinear and adaptive control of complex systems. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. – 1999. – 528 p.
4. Krstic M., Kanellakopoulos L. and P.V. Kokotovich. Nonlinear and adaptive control design. Wiley. – New York, 1995.
5. Monopoli R.V. Model reference adaptive control with an augmented signal // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1974. – V. 19. – № 5.
6. Narendra K.S. and L.S. Valavani. Stable adaptive controller design – direct control // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1978. – V. 23. – № 4.

7. Nikiforov V.O. Robust high-order tuner of simplified structure // Automatica. – 1999. – V. 35. – № 8.
8. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. – 2010. – № 2. – P. 129–139.
9. Bobtsov A.A. Discussion on: «Positive Real Control for Uncertain Singular Time-delay Systems via Output Feedback Controllers» // European Journal of Control. – 2004. – № 4. – P. 305–306.
10. Bobtsov A., Pyrkin A. A new approach to MRAC problem with disturbance rejection // 9th IFAC Workshop ALCOSP. – Saint-Petersburg, Russia, 2007.
11. Bobtsov A., Pyrkin A. Experimental research of consecutive compensator approach on basis of mechatronic systems // 6th EUROMECH Conference ENOC. – Saint-Petersburg, Russia, 2008.
12. Bobtsov A., Kolyubin S., Pyrkin A. Adaptive stabilization of reaction wheel pendulum on moving LEGO platform // 3rd IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC 2009). – Saint Petersburg, Russia, 2009.
13. Bobtsov A., Kolyubin S., Pyrkin A. Stabilization of Reaction Wheel Pendulum on Movable Support with On-line Identification of Unknown Parameters // 4th International Conference «Physics and Control» (Physcon 2009). Catania, Italy, 2009.
14. Kolyubin S., Pyrkin A. Adaptive control of a reaction wheel pendulum // 12th International Student Olympiad on Automatic Control BOAC. – Saint-Petersburg, Russia, 2008.
15. Kolyubin S., Pyrkin A. Development Prospects of Adaptive Stabilization of a Reaction Wheel Pendulum // 13th International Student Olympiad on Automatic Control. – Saint-Petersburg, Russia, 2010.
16. Pyrkin A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of Sinusoidal Disturbance of Unknown Frequency for Linear System with Input Delay // American Control Conference, Baltimore, 2010.
17. Pyrkin A., Bobtsov A., Kremlev A. Rejection of Unknown Biased Harmonic Disturbance for Nonlinear System with Input Delay // Time Delay System Conference, Prague, Czech Republic, 2010.
18. Pyrkin A., Bobtsov A., Chepinskiy S., Kapitanyuk Y. Compensation of Unknown Multiharmonic Disturbance for Nonlinear Plant with Delay in Control // 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Bologna, Italy, 2010.
19. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Последовательный компенсатор в задаче управления однозвенным роботоманипулятором с гибкими связями // Мехатроника, автоматизация, управление.– 2006. – № 8. – С. 2–7.
20. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу линейными системами с неучтенной паразитной динамикой // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 6. – С. 115–122.
21. Бобцов А.А., Колубин С.А., Пыркин А.А. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 136–148.
22. Колубин С.А., Пыркин А.А. Адаптивное управление маятником с реакционным маховиком // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 5. – С. 28–32.
23. Колубин С.А., Пыркин А.А. Управление нетривиальными маятниковыми системами в условиях параметрической и функциональной неопределенностей // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 69. – С. 34–39.
24. Пыркин А.А. Адаптивный алгоритм компенсации параметрически неопределенного смещенного гармонического возмущения для линейного объекта с запаздыванием в канале управления // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 8. – С. 62–78.
25. Mechatronic Systems, Mechatronic Control Kit. Model M-1. User's Manual. – 2001.

- |  |   |
|--|---|
| <i>Бобцов Алексей Алексеевич</i>         | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, bobtsov@mail.ifmo.ru |
| <i>Капитанюк Юрий Андреевич</i>          | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, yura.kapitanyuk@gmail.com                                      |
| <i>Капитонов Александр Александрович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kap2fox@gmail.ru   |
| <i>Колубин Сергей Алексеевич</i>         | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, s.kolyubin@gmail.com  |
| <i>Пыркин Антон Александрович</i>        | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com                |
| <i>Чепинский Сергей Алексеевич</i>       | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, Chepinsky_S@hotmail.com              |
| <i>Шаватов Сергей Васильевич</i>         | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, r41f.814ck.h4wk@gmail.com                                      |

УДК 371.693

## **МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕНАЖЕРОВ С ИММЕРСИВНЫМИ ОБУЧАЮЩИМИ СРЕДАМИ**

**С.Ф. Сергеев**

Рассматривается проектирование тренажеров для подготовки операторов сложных эргатических систем, работающих в условиях витального стресса. Предложена методология средоориентированного подхода к проектированию обучающих сред, использующая положения постклассической эргономики. Обучающая среда представлена в виде самоорганизующейся аутопозитической системы, включающей оператора в качестве активного конструирующего звена.

**Ключевые слова:** тренажер, оператор, эргатическая система, обучающая среда, аутопозитические системы, средоориентированный подход.

### **Введение**

В настоящее время наблюдается тенденция усложнения объектов вооружения и военной техники, которые, постепенно видоизменяясь, переходят в область сетевых и высокоавтоматизированных эргатических систем. Деятельность оператора приобретает плохо алгоритмизированный характер, что по-новому ставит задачу профессиональной подготовки операторов, обслуживающих данную технику. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что это массовые операторские специальности, и возможности профессионального отбора кандидатов для специализированного обучения на них в значительной мере ограничены. Обучение в реальной деятельности зачастую невозможно в силу ее экстремальности и наличия угрозы жизни курсанту. Кроме того, реальная техника имеет ограниченный технический ресурс, и в ней отсутствуют режимы, моделирующие стрессогенное воздействие условий боевой деятельности.

Метод обучения «делай как я», широко принятый в армейской подготовке, в данной ситуации также имеет серьезные ограничения в силу необходимости выполнения значительного объема алгоритмических операций, непонятных курсанту и вызывающих в силу этого у него «информационный шок». Выходом из сложившегося положения является применение специальных тренажерных средств, формирующих искусственную среду обучения и моделирующих основные элементы реальной боевой обстановки и условия применения изучаемой техники. Тренажер в моделируемых условиях позволяет реализовать деятельность оператора, выполнение которой на реальной технике невозможно по экономическим критериям или сопряжено с угрозой жизни оператора. В ряде случаев тренажерная подготовка является единственным методом обеспечения профессиональной готовности оператора.

### **Постановка задачи проектирования тренажеров**

Традиционно тренажеры понимают как модели реального объекта управления и условий его применения, используемые в целях обучения. Погружение в создаваемую в тренажере искусственную среду и деятельность в ней обеспечивают требуемый уровень обученности. Тренажер в междисциплинарном дискурсе рассматривается в более широком контексте. Это не только технологический объект технических и педагогических наук, но и многоуровневая система, включающая обучаемого, которая описывает и порождает феномен обучения. В соответствии с ГОСТ 26387-84 тренажер оператора СЧМ – это «техническое устройство, предназначенное для профессиональной подготовки операторов СЧМ, отвечающее требованиям методик подготовки, реализующее модель СЧМ и обеспечивающее контроль качества деятельности обучаемого» [1]. Однако данное определение захватывает лишь часть описания тренажера как многоуровневой эргатической системы и дано лишь в техническом, инженерном контексте. Из него не ясно, как создать тренажер, эффективно решающий задачу профессиональной подготовки.

Создание тренажера для сложной эргатической системы специального назначения с сетевой архитектурой построения не сводится только к решению двух, кажущихся относительно независимыми, задач – технологической, заключающейся в создании высокоточной имитации среды обучения при приемлемых затратах на ее изготовление и эксплуатацию и – учебно-методической, рассматривающей вопросы проектирования и применения тренажера. Основная сложность заключается в междисциплинарном характере проектирования. Обе задачи имеют разную целевую функцию и решаются в парадигмах разных наук – гуманитарных и технических. Разделенность технического и методического проектирования тренажерной системы ведет к смещению целей проектирования тренажера. Инженеры воспринимают проектирование тренажера как создание высокоточной имитации реальности и не уделяют внимания вопросам его применения, а проектировщики методического обеспечения плохо понимают возможности техники и вынуждены принимать то, что им предлагают инженеры. В результате в ущерб обучающим свойствам тренажера господствует доктрина высокого реализма как понятная большинству участников проектирования.

**Основные методологические схемы проектирования тренажеров**

Можно выделить ряд подходов к проектированию тренажеров:

- *системотехнический (инженерный)* – добиваются обеспечения максимального подобия модели, реализованной в тренажере, реальным условиям деятельности;
- *антропоцентрический (психолого-педагогический)* – оператор является пассивным объектом педагогического воздействия, осуществляемого системами тренажера в соответствии с реализуемой методикой обучения;
- *конструирующей активности (средоориентированный, постклассический)* – оператор является активным деятелем в порождаемой тренажером специально организованной искусственной среде. Активность субъекта формирует его когнитивные и операциональные структуры, помогающие выполнению профессиональной деятельности.

**Классические психолого-педагогические подходы к проектированию тренажеров**

Первые две методологические схемы широко применяются в инженерных и психолого-педагогических вариантах проектирования тренажеров. Необходимо отличать тренажеры от имитаторов и наглядных пособий, основная задача которых состоит в воспроизведении отдельных свойств элементов технической системы, их внешнего вида, не связанного с операциональным составом деятельности оператора. Основным критерием выделения действий, выполняемых на тренажере из целостной профессиональной деятельности, по мнению К.К. Платонова, является критерий их соответствия действиям по своей психологической структуре, одинаково выполняемым в реальной деятельности [2]. В психологическую структуру действия входят его цель, особенности восприятия, внимания, мышления, особенности движений, которыми реализуется это действие, и т.д. Сложную деятельность можно раздробить на отдельные действия и их группы для раздельной тренировки, но дробить деятельность дальше, на отдельные акты, не имеющие самостоятельной цели, нельзя.

Это справедливо только для простых, повторяющихся видов деятельности, не требующих решения задач выбора и принятия интеллектуальных решений. В противном случае индивидуальные стратегии, стихийно возникающие в обучаемом, могут быть очень далеки от совершенства. Традиционный подход, заключающийся в отработке элементов деятельности путем их многократного повторения при подготовке для работы в сложных военных эргатических системах, работает плохо, так как требуется описание всего поля возможных решений, что зачастую невозможно.

А.И. Нафтульев, рассматривая тренажеры для принятия решения [3], выдвинул гипотезу о том, что физическое подобие не является значимым для данного класса устройств. Важно ориентировать субъекта на существенные отношения, присущие данному классу задач. Ситуация обучения не обязательно должна соответствовать физической сущности объекта [3]. Отметим, что оператор в процессе обучения порождает психологический конструкт профессионального знания, включающий элементы интерфейса системы как часть среды управления.

Попытки уйти от диктата инженерного проектирования в процессе тематического синтеза структуры тренажеров неоднократно предпринимались в рамках педагогики и инженерной психологии. Так, например, А.Н. Печниковым предложен психолого-педагогический подход к проектированию и созданию автоматизированных обучающих систем (АОС). Под этим подходом понимается «превалирование психолого-педагогического проектирования над другими видами системного проектирования (системотехнического, эргономического, инженерно-психологического и т.д.) в решении принципиальных вопросов определения основных технических характеристик, структурных и функциональных схем, схем информационных потоков, моделей и алгоритмов функционирования проектируемых АОС» [4].

Данный подход представляет собой форму инженерно-психологического проектирования со всеми вытекающими из этого достоинствами и недостатками, дополненную педагогическими интерпретациями. Проектирование при этом заключается в интерпретации – научном обосновании технологии обучения, представленной в виде совокупности обучающих процедур, осуществляемых в основном в терминах и методами педагогических наук. Целью разработки методологии психолого-педагогического проектирования является «органическое сочетание в процессе проектирования АОС двух начал – кибернетического и психолого-педагогического – такого сочетания, которое на основе взаимосвязанного решения проблем информатики, вычислительной техники, эргономики, дидактики, педагогической и инженерной психологии способно обеспечить заданную дидактическую эффективность разрабатываемой АОС».

Психолого-педагогический подход, несмотря на его несомненную пользу в военной педагогике, при изучении сложных эргатических систем имеет ряд ограничений, связанных с информационно-кибернетическим базисом, лежащим в основе его методологии. В первую очередь, в нем не учитываются эффекты самоорганизации, возникающие в замкнутых и аутопоэтических системах, к которым относятся обучающие организации и курсанты. Во-вторых, его использование требует высокого уровня инженерной подготовки у преподавательского состава, формирующего и использующего методику обучения на трена-

жере. Кроме того, педагогические интерпретации в значительной мере субъективны и индивидуальны, что мешает передаче педагогического опыта в процессе совершенствования системы обучения. Особенно сильно это проявляется в том случае, если тренажер экспортируется в зарубежные страны, где культурные среды отличаются от российской среды обучения и прямой перенос методик обучения часто невозможен. Попытки перевода методического обеспечения на другой язык требуют учета культурного контекста, что возможно лишь при участии специалистов-переводчиков, хорошо понимающих предметную область.

### **Тренажер как средство формирования обучающей среды**

Третья методологическая схема реализуется в средоориентированных технологиях [5]. Тренажер в них можно определить как организационно-техническую систему, создающую в обучаемом искусственную обучающую среду, деятельность в которой приводит к формированию у обучаемого требуемого уровня профессиональной компетенции. Это техническая система, моделирующая с определенным уровнем подобия (вплоть до полного) элементы и условия применения реальной СЧМ, порождающая обучающую среду, деятельность в которой приводит к формированию и поддержанию у оператора требуемого уровня профессиональной готовности [6]. Отметим в данных определениях новое для нас содержание понятия «обучающая среда». Это, в первую очередь, психологическое понятие, а не физическая реальность и техническое окружение, в котором работает оператор. Обучающая среда не является простой имитацией окружающей обстановки или алгоритмов работы человеко-машинной системы. Она содержит в своей основе психологический конструкт, возникающий в операторе в специально организованных (с учетом психологии обучения и поведения человека) условиях. В формировании данного конструкта значительную роль играет опыт обучающегося и контент, в котором происходит обучение. Деятельность в обучающих средах активно формирует качества профессионала, которые могут быть перенесены на реальную деятельность [7].

Постклассическая эргономика тренажеростроения основана на следующих взглядах на понятия «среда», «обучающая среда».

1. Среда эргатической обучающей системы является продуктом конструирующей деятельности психики человека-оператора и не может быть рассмотрена вне ее психического содержания.
2. Среда отражает феномен динамической целостности циклически формирующихся цепей отношений человека с физической и социальной реальностью в процессе обеспечения его жизнедеятельности. Среда выступает перед субъектом одновременно в виде субъективной реальности и как внешняя предметная, объективная структура мира, в которой действует субъект.
3. Обучающая среда в содержательном плане возникает всегда как динамический процесс формирования сети отношений в субъекте обучения, в который им лично (не всегда осознанно) избирательно вовлекаются самые разнообразные элементы внешнего и (или) внутреннего окружения с целью обеспечения: аутопоззиса организма, стабильности личности и непрерывности ее истории.

Понятие «знание» в постклассической интерпретации также имеет смысл, отличный от понятий «знание», принятых в традиционных инструменталистских теориях:

- знание, в отличие от информации, не может быть извлечено из человека, в котором оно существует;
- знание нельзя передать непосредственно от человека к человеку, оно может быть построено только самим учеником, выращено в нем;
- знание зарождается и развивается вместе с человеком, совершенствуется в процессе жизни, приобретает свойства, учитывающие опыт субъекта;
- знание не обладает материальной формой, к нему не применимы операции, аналогичные операциям с физическими, материальными объектами;
- знание связано с работой механизма понимания;
- знание носит черты социального конструкта, отражающего интерпретации, порождаемые и разделяемые членами общества;
- язык выступает в качестве средства конструирования знаний, которые являются социальным продуктом, возникающим в процессе языковой деятельности в процессе коммуникаций [7].

На базе постклассической эргономики сформулирована теория обучения в иммерсивных средах, которая включает следующие базовые принципы: самоорганизации, селективности, погружения, присутствия, конструирующей активности обучаемого, взаимной ориентации (человек–машина, человек–человек) в процессе обучающей коммуникации, физической непосредственности и субъектной (сознательной) опосредованности – интерпретативности, историчности [5].

Применение постулатов данной теории в практике тематического проектирования тренажеров и обучающих систем ведет к новым взглядам на компоненты обучающих сред, меняет логику разработки структуры и элементов обучающей системы на всех этапах формирования проектных решений (табл. 1).

Иммерсивная обучающая среда является динамическим, системным, самоорганизующимся психологическим конструктом, обладающим следующими свойствами: иммерсивность; присутствие; интерактивность; внесубъектная пространственная локализация; избыточность; наблюдаемость; доступность

когнитивному опыту (конструируемость); насыщенность; пластичность; целостность; мотивогенность, проявляющимися в форме активного обучения [5].

Компоненты обучающих систем и сред обучения	Роль в обучающих системах и средах обучения	
	Классический подход	Средоориентированный подход
<b>Обучаемый</b>	Пассивен, является объектом педагогического воздействия. Исполнитель инструкции	Активен, является действующим в динамической среде агентом, включенным в процесс обучающей коммуникации
<b>Инструктор</b>	Непосредственно действует на ученика, формирует его поведение, дает учебную информацию, реализует дидактические процедуры	Является наблюдателем и активным участником коммуникации, использующим свой опыт и авторитет для ориентации ученика в зоне учебных смыслов, изменения наблюдаемых параметров среды обучения
<b>Роль средств обучения и моделирования среды обучения</b>	Моделирование с максимальной возможной степенью подобия содержания и условий реальной профессиональной деятельности	Реализация профессиональных средовых ниш для развертывания деятельности обучаемого
<b>Содержание обучения</b>	Выполнение учебных задач	Учебная деятельность в среде обучения. Жизнь в среде обучения
<b>Коммуникации в системе</b>	Передача информации от инструктора к ученику	Координация смыслов участников общения в общей зоне коммуникации
<b>Системы оценок</b>	Объективный контроль показателей деятельности, парциальные оценки. Количественные показатели	Фиксация траектории получения профессионального опыта. Интегральные оценки. Качественные оценки
<b>Роль оценок</b>	Объективная, свидетельствующая об уровне сформированности профессиональных качеств	Двойственный характер: мотивационно-стимулирующая, организующая и координирующая деятельность в системе «среда обучения–обучаемый»
<b>Цель системы подготовки</b>	Сформировать знания, умения и навыки	Создать условия для получения опыта в среде обучения и переноса полученного опыта на деятельность в профессиональной среде
<b>Организация системы подготовки</b>	Жестко детерминирована	С гибко изменяющейся структурой, учитывающей аутопоэтический характер организации субъекта и его свойств
<b>Принципы организации системы подготовки</b>	Фиксированная структура, жестко определяющая функции системы. Описания однозначны	Системная дифференциация. Редукция сложности. Операционная замкнутость. Самореферентность

Таблица 1. Различие взглядов на ключевые компоненты обучающих систем и сред в классическом и средоориентированном подходах

Обучение в иммерсивной среде сопровождается субъективным чувством присутствия в среде, в том числе, отличающимся от среды непосредственного чувственного опыта. Присутствие в иммерсивной обучающей среде – это динамический процесс включения человека (его психологической и психофизиологической систем) в среды человеческого опыта в процессе их конструирования и освоения. Чаще всего рассматривают физическое и социальное присутствия. Физическое присутствие относится к чувству человека «физически находится в каком-нибудь месте». Социальное присутствие отражает чувство «быть вместе (и связываться) с кем-то».

Эффективная деятельность в искусственной среде обучения обеспечивается интерактивностью среды – мерой предоставляемых человеку возможностей для свободных действий с контентом среды. Интерактивность включает в себя многообразие взаимодействий, возникающих в среде на различных уровнях ее представления – физическом, межличностном, групповом, институциональном. Она структурируется в сферах обмена (информацией, объектами, чувствами); интерпретаций; производства впечатлений и типизации сообщений. Интерактивность обеспечивает диалоговый характер отношений ученика с содержанием среды.

### **Иммерсивные тренажеры**

В тренажере, созданном на базе теории обучающих иммерсивных сред, имитируется искусственная среда в форме виртуальной реальности и элементы ее взаимодействия с оператором. При этом, в соответствии со сценарием и этапами обучения, избирательно моделируются только те элементы реальной деятельности, которые необходимы для порождения обучающей среды в соответствии с требуемой на том или ином этапе профессиональной подготовки логикой обучения, что достигается с помощью тех-

нологий виртуальной реальности [8]. Выбор парадигмы проектирования определяет логику проектирования и влияет на выбор и содержание проектного решения (табл. 2).

Основные решения	Классический подход	Средоориентированный подход
<b>Формы взаимодействий в системе «среда - обучаемый»</b>	Реализация монолога обучающей системы с учеником	Обеспечение диалога (полной интерактивности) ученика со средой обучения
<b>Форма представления учебного материала</b>	Материал заранее определен, выстроен в логике и терминах процесса обучения	Материал частично недетерминирован, задан в избыточности и динамике среды обучения
<b>Алгоритм поведения ученика</b>	В терминах учебной задачи. Реализация заранее заданного алгоритма в виде последовательности операций и действий ученика с материалом	Не определен заранее, зависит от конкретной учебной ситуации и отражает личный опыт ученика, стратегии и тактики его поведения и деятельности в среде обучения
<b>Способ описания учебного материала</b>	Задан в явной форме в виде описания учебной задачи и условий, обеспечивающих ее решение	В форме сценария, описывающего свойства среды обучения
<b>Цели обучения</b>	Заданы в конкретных, часто количественных показателях, отражающих критерии достижения учебной задачи	Цели заранее не определены. Отражены в форме общей стратегии, миссии, определяющей направление деятельности ученика в среде обучения
<b>Обеспечение мотивации деятельности</b>	Внешне заданная система бонусов и поощрений. Оценки и критерии для их получения. Содержит формы принуждения и наказания для включения мотивов избегания неудачи	Использование внутренней мотивации, порождаемой миссией
<b>Цель проектирования</b>	Реализация учебных задач	Реализация системы, порождающей эффективную обучающую среду

Таблица 2. Содержание проектных решений в рамках традиционного и средоориентированного подходов

Вводится понятие «иммерсивность» как степень погружения, включения курсанта в обучающую среду. Чем выше иммерсивность среды, тем теснее связи погруженного в нее субъекта с содержанием среды, тем выше обучающий эффект по отношению к данному учебному содержанию. Обучаемый является активным деятелем в среде. Он наделяет смыслами содержание своей деятельности, создает интерпретацию, определяющую историю его личности.

Тренажер, формирующий обучающую среду, в которую погружается субъект обучения, назовем *погружающим* или *иммерсивным тренажером*. Практика создания тренажеров данного класса показывает их перспективность при решении задач массовой подготовки операторов сложных эргатических систем. Использование иммерсивных тренажеров для подготовки операторов систем слежения за динамическими объектами, созданных в ЦКБ аппаратостроения (г. Тула), позволило в 2–3 раза сократить сроки обучения курсантов, повысило качество реальной профессиональной деятельности [9].

### Заключение

Предложена и обоснована методология проектирования тренажеров с иммерсивными средами для операторов сложных эргатических систем различного, в том числе и специального, назначения, позволяющая учитывать активность оператора в процессе профессиональной подготовки. На базе постклассических представлений эргономики и инженерной психологии введены понятия «обучающая среда», «знание», «иммерсивная среда», объединяющие в междисциплинарном плане дискурсы разработчиков систем подготовки, что позволяет вести проектирование тренажеров с учетом самоорганизующегося характера учебной деятельности человека.

Для решения задач, возникающих в процессе разработки учебно-тренировочных средств для подготовки операторов сложных эргатических систем, требуются изменения и дополнения в методологический и понятийный базисы проектирования, учитывающие синергетический характер взаимодействий в системе «оператор – среда».

### Литература

- ГОСТ 26387-84. Система «человек–машина». Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
- Платонов К.К. Психологические вопросы теории тренажеров // Вопросы психологии. – 1961. – № 4. – С. 77–86.

3. Нафтутльев А.И. О выборе уровня подобия тренажера реальному объекту управления // Проблемы общей и инженерной психологии. Экспериментальная и прикладная психология. Вып. 7. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1976. – С. 129–133.
4. Печников А.Н. Теоретические основы психолого-педагогического проектирования автоматизированных обучающих систем. – Петродворец: ВВМУРЭ им. А.С. Попова, 1995. – 341 с.
5. Сергеев С.Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. – М.: Народное образование, 2008. – 434 с.
6. Сергеев С.Ф. Эргономика объектов вооружения: Курс инженерной психологии для конструкторов управляемого оружия. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 174 с.
7. Сергеев С.Ф. Инженерно-психологическое проектирование сложных эрготехнических сред: методология и технологии // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики / Под ред. В.А. Бодрова, А.Л. Журавлева. Вып. 1. – Изд-во «Институт психологии РАН», 2009. – С. 429–449.
8. Сергеев С.Ф. Методология проектирования иммерсивных тренажеров операторов систем слежения / С.Ф. Сергеев, Г.Л. Коротеев, В.Н. Соколов // Передовые технологии в авиаприборостроении. Материалы V Всероссийской научно-технической конференции Национальной Ассоциации авиаприборостроителей (НААП). – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 96–101.
9. Сергеев С.Ф. Виртуальные тренажеры: проблемы теории и методологии проектирования // Биотехносфера. – 2010. – № 2(8). – С. 15–20.

*Сергеев Сергей Федорович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат психологических наук, зав. лабораторией, [ssfpost@mail.ru](mailto:ssfpost@mail.ru)

УДК 65.011, 519.256, 004.043

## **ОЦЕНКА ЧИСЛА ПОБЕДИТЕЛЕЙ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ ЭТАПОВ ОЛИМПИАД**

**В.Н. Васильев, Т.В. Харченко, В.В. Клименко**

Описан математический подход оценивания результатов участников массовых олимпиад, приведены результаты численных расчетов, демонстрирующие полученные оценки. Предлагаемый подход может применяться методическими комиссиями и жюри массовых олимпиад при разработке заданий этапов олимпиад, определении численности участников заключительных этапов и количества победителей и призеров. В рамках математического подхода оценивания результатов участников массовых олимпиад используются данные об индексах решаемости заданий отборочного этапа, распределении участников отборочного этапа по типам решенных задач и набранным баллам.

**Ключевые слова:** математическая статистика, олимпиады школьников, критерии оценки результатов.

### **Введение**

Ежегодно в цикле олимпиад по информатике, проводимых ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО», принимает участие порядка 4 000 школьников 11 классов из всех федеральных округов Российской Федерации. Олимпиады проводятся в два этапа: отборочный (дистанционный) и заключительный (очный). Отборочный этап разбит на три тура и длится около четырех месяцев. В ходе отборочного этапа участникам предлагаются задачи всех разделов информатики, соответствующие школьной программе. К заключительному этапу допускаются участники, набравшие проходной балл, который устанавливается жюри олимпиады.

Методическая комиссия олимпиады разрабатывает задачи отборочного и заключительного этапов, руководствуясь утвержденными организационным комитетом Критериями определения победителей и призеров. Так, в соответствии с Критериями, победителем становится участник, решивший обе творческие задачи по технологиям программирования при условии правильного решения не менее 9 из 10 задач по общим вопросам информатики и информационно-коммуникативных технологий (ИКТ) уровней воспроизведения и применения. Призером становится участник, который решил 9 из 10 задач по общим вопросам ИКТ и не справился или не решал творческие задачи. Таким образом, можно утверждать, что призер олимпиады уверенно владеет материалом информатики и ИКТ на уровнях воспроизведения и применения, но еще не достигает творческого уровня владения материалом. Методическая комиссия и жюри олимпиады определяют баллы за задачи заключительного этапа с учетом описанных выше Критериев. При определении победителей и призеров этапа олимпиады необходимо учитывать дополнительно следующие требования: количество победителей и призеров не должно превосходить 45%, а количество победителей не должно превосходить 10% от числа участников этапа.

В настоящее время актуальной является задача определения проходного балла  $p$  в заключительный этап олимпиады, поскольку среди не допущенных в заключительный этап могли быть те, кто смог

бы справиться с предложенными задачами и войти в состав победителей и призеров. Для решения этой задачи требуется оценить вероятности решения задач участниками заключительного этапа и соответственно оценить численность победителей и призеров заключительного этапа в зависимости от их результатов в отборочном этапе, предполагаемого состава и уровня сложности заданий заключительного этапа.

### Оценка числа участников

В цикле олимпиад 2009–2010 учебного года к заключительному этапу были допущены участники отборочного этапа, набравшие 23 и более баллов из 90 возможных баллов. Таким образом, проходной балл  $p=23$ . Количество участников заключительного этапа – 931 школьник 11 классов. Фактически к участию в заключительном этапе допущено менее трети участников отборочного этапа. На рис. 1 представлено распределение участников по набранным баллам по итогам отборочного этапа среди школьников выпускных классов в цикле олимпиад по информатике 2009–2010 учебного года.

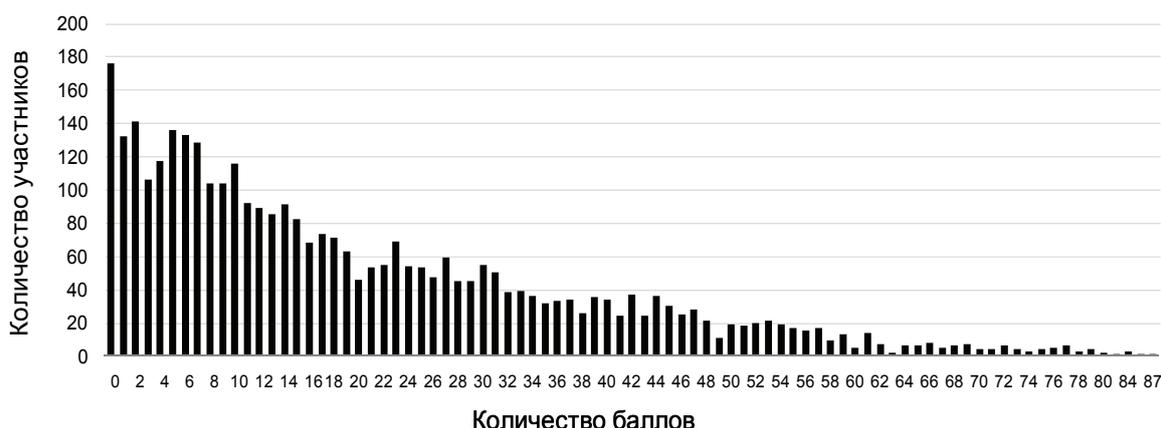


Рис. 1. Гистограмма распределения участников отборочного этапа по набранным баллам

Каждой задаче заключительного этапа соответствует по теме и уровню сложности группа заданий отборочного этапа. По этой группе заданий отборочного этапа рассчитан средний индекс решаемости. Проведено сопоставление индексов решаемости заданий заключительного этапа с усредненными индексами решаемости соответствующих им групп заданий отборочного этапа. Полученные результаты приведены в табл. 1.

№ задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Заключительный	45,86	43,39	35,23	44,68	44,36	68,85	29,43	41,03	40,28	53,38	26,42	27,71
Отборочный	29,43	39,42	33,30	33,51	8,92	40,49	29,32	34,59	32,01	46,62	15,79	17,08

Таблица 1. Индексы решаемости заданий (%) по этапам олимпиады

Как видно из табл. 1, не существует прямой зависимости между индексом решаемости задач отборочного этапа и индексом решаемости соответствующих типов задач заключительного этапа. Для построения оценки количества победителей и призеров заключительного этапа в зависимости от значения проходного балла при  $p < 23$  необходимо определить принципы назначения баллов за задачи заключительного этапа. Рассматривается несколько подходов: экспертная оценка (вариант “А”), оценка по индексу решаемости соответствующих заданий в отборочном этапе (вариант “В”), оценка по индексу решаемости задач очного этапа (вариант “С”).

Номер задачи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Количество баллов											
вариант “А”	1	2	1	1	2	2	2	1	2	1	3	3
вариант “В”	5	3	4	4	10	2	5	4	4	1	8	8
вариант “С”	5	6	7	6	7	1	9	6	7	4	10	10

Таблица 2. Распределение баллов по задачам

С использованием данных табл. 2 и фактических результатов участников построены распределения участников заключительного этапа по набранным баллам для вариантов “А” и “В” распределения баллов по задачам (см. рис. 2, 3). Рассмотрение варианта “С” детально не проводится в связи с тем, что этот вариант представляет собой апостериорную оценку уровня сложности заданий заключительного этапа.

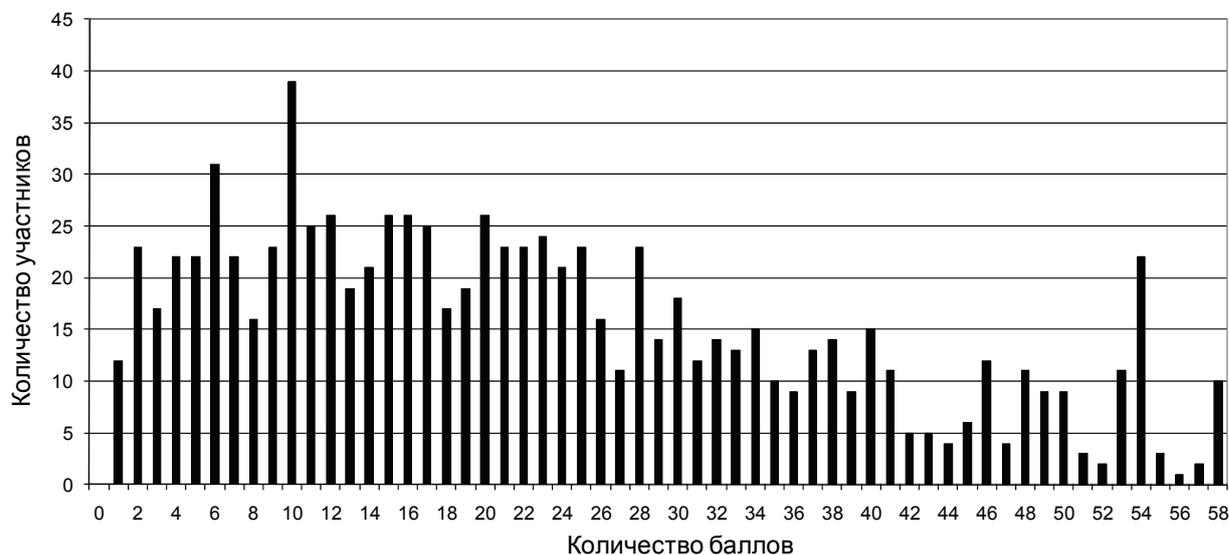


Рис. 2. Гистограмма распределения участников заключительного этапа по количеству набранных баллов. Количество участников – 931. Вариант “В” распределения баллов по задачам (см. табл. 2)

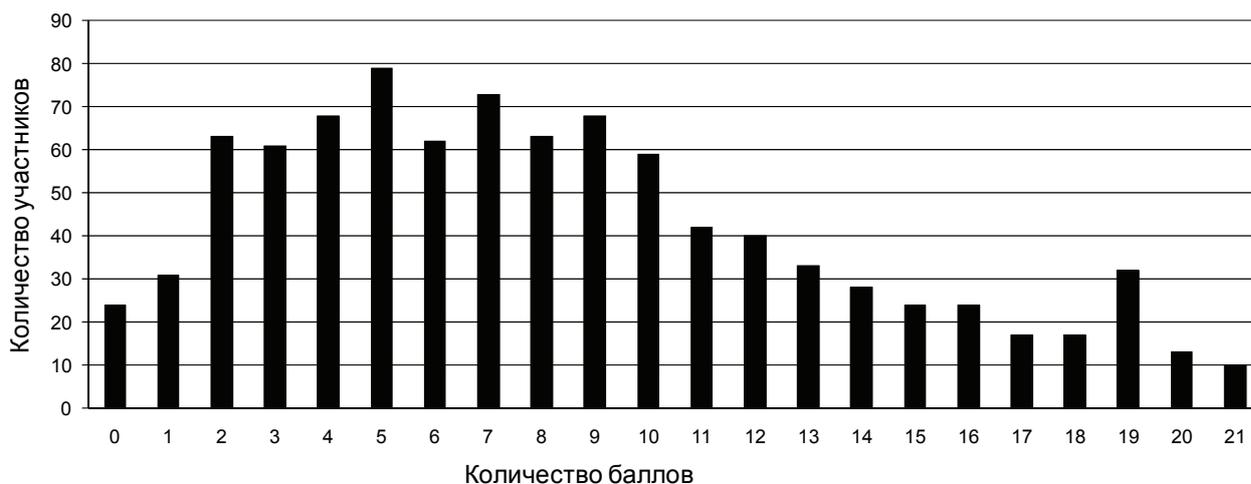


Рис. 3. Гистограмма распределения участников заключительного этапа по количеству набранных баллов. Количество участников – 931. Вариант “А” распределения баллов по задачам (см. табл. 2)

Кроме того, проведена оценка «погрешности» вариантов “А”, “В” и “С” с точки зрения критериев определения победителей и призеров. Погрешность возникает, когда победитель или призер определяется по числу набранных баллов, а не по составу решенных заданий, и заключается в том, что участник фактически решил набор заданий, удовлетворяющий критерию «победитель», но по набранным баллам отнесен к «призерам», и наоборот.

	Погрешность: победитель – призер	Общая погрешность
вариант “А”	89 участников	144 участника
вариант “В”	35 участников	52 участника
вариант “С”	5 участников	22 участника

Таблица 3. Погрешности методов в определении состава групп призеров и победителей

Из двух вариантов “А” и “В” предпочтительным является вариант “В”, поскольку он дает меньшую величину погрешности по сравнению с вариантом “А” (см. табл. 3).

Для получения оценки количества победителей и призеров заключительного этапа олимпиады в зависимости от проходного балла при  $p < 23$  используется метод экстраполяции (см. [4]).

Пусть  $K$  – максимальное количество баллов отборочного этапа,  $N$  – максимальное количество баллов заключительного этапа. Вводятся случайные величины  $X$  и  $Y^{(n)}$ ,  $0 \leq n \leq N$ . Значения  $x_k$  случайной величины  $X$  – число участников, набравших  $k$  баллов в отборочном этапе. Значения  $y_k^{(n)}$  случайной величины  $Y^{(n)}$  – число участников, набравших  $k$  баллов в отборочном этапе и  $n$  баллов в заключительном этапе. Таким образом, рассматриваются значения  $(y_k^{(n)}, x_k)$  двумерной случайной величины  $(Y^{(n)}, X)$ . Для оценки числа победителей и призеров заключительного этапа в зависимости от проходного балла при  $p < 23$  рассмотрим линейную регрессию случайной величины  $Y^{(n)}$  на  $X$  (см. [4, 5]). Используем уравнение линейной регрессии в виде [1]

$$y = m_y + \frac{\rho_{XY}\sigma_Y}{\sigma_X}(x - m_X), \tag{1}$$

где  $m_X, m_Y$  – выборочные средние значения случайных величин  $X$  и  $Y$ ,  $\sigma_X, \sigma_Y$  – выборочные среднеквадратичные отклонения случайных величин  $X$  и  $Y$ ,  $\rho_{XY}$  – выборочный коэффициент корреляции случайных величин  $X$  и  $Y$ . Уравнение (1) дает оценку значений случайной величины, определяемых теоретическим уравнением регрессии, наилучшим образом в смысле принципа наименьших квадратов [1, 2]. Подобно формуле (1), выражения для частных уравнений эмпирической линейной регрессии для оценки значений  $Y^{(n)}$  имеют вид

$$y_k^{(n)} = m_{Y^{(n)}} + \frac{\rho_{XY}^{(n)}\sigma_{Y^{(n)}}}{\sigma_X}(x_k - m_X), \tag{2}$$

где  $m_X, m_{Y^{(n)}}$  – выборочные средние значения случайных величин  $X$  и  $Y^{(n)}$ ,  $\sigma_X, \sigma_{Y^{(n)}}$  – выборочные среднеквадратичные отклонения случайных величин  $X$  и  $Y^{(n)}$ , где  $\rho_{XY}^{(n)}$  – выборочный частный корреляционный коэффициент случайных величин  $X$  и  $Y^{(n)}$  при фиксированном  $n$ . Таким образом, получаем случайную величину  $R = \{\rho_{XY}^{(n)}, n=1, \dots, M\}$  из значений частных корреляционных коэффициентов со средним значением  $E(R) = 0,603$  и дисперсией  $D(R) = 0,453$ . Используя тот факт, что величина  $t = \frac{Y - \bar{Y}}{S_Y}$

(величина  $S_Y$  пропорциональна  $\sigma_Y$ ) имеет  $t$ -распределение Стьюдента с 60 степенями свободы [2], проведены расчеты величин  $d_p$  95-процентных доверительных интервалов для оценки значений случайной величины  $Y^{(n)}$  в интервале  $10 < p < 50$  значений проходного балла, полученных из уравнения (2). Полученные значения величин  $d_p$  для отдельных  $p$  приведены в табл. 4.

Проходной балл, $p$	50	45	40	35	30	25	20	15	10
Величина, $d_p$	2,24	2,67	2,87	3,09	3,38	3,46	3,52	3,62	3,86

Таблица 4. Размеры доверительных интервалов при некоторых значениях проходного балла

На основании рассчитанных значений случайных величин  $Y^{(n)}$  построено семейство  $\{\Psi_p\}$  распределений числа участников по набранным баллам в заключительном этапе в зависимости от проходного балла  $p$ . По каждому из распределений  $\Psi_p$  случайной величины  $Y^{(n)}$  рассчитываются величины  $\lambda_p, \mu_p, \lambda_{10}^p, \mu_{45}^p$ . Здесь  $p$  – проходной балл в заключительный этап,  $\lambda_p$  – количество победителей этапа,  $\mu_p$  – число победителей и призеров этапа,  $\lambda_{10}^p$  – количество участников, составляющих 10% от числа участников заключительного этапа,  $\mu_{45}^p$  – количество участников, составляющих 45% от числа участников заключительного этапа.

#### Анализ полученных результатов

Проведенные расчеты значений случайной величины  $Y^{(n)}$  позволяют с учетом результатов отборочного этапа – индексов решаемости заданий и распределения участников по набранным баллам – оценить при  $p < 23$  количество победителей заключительного этапа с учетом критериев определения

победителей и призеров, а также проанализировать выполнение условий  $\lambda_p < \lambda_{10}^p$  и  $\mu_p < \mu_{45}^p$  в зависимости от значений проходного балла  $p < 23$ .

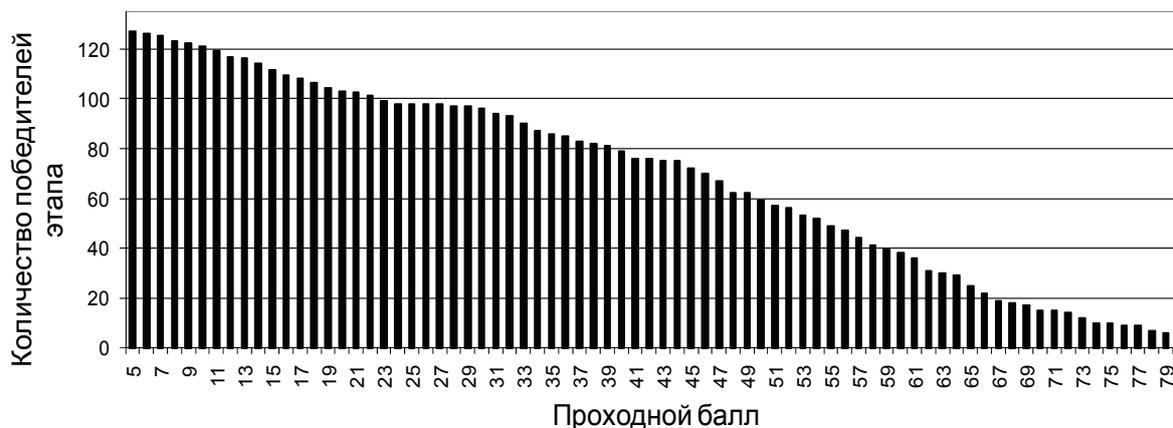


Рис. 4. Рассчитанная численность победителей от величины проходного балла

Рис. 4 показывает равномерный рост численности победителей заключительного этапа при уменьшении значения проходного балла.

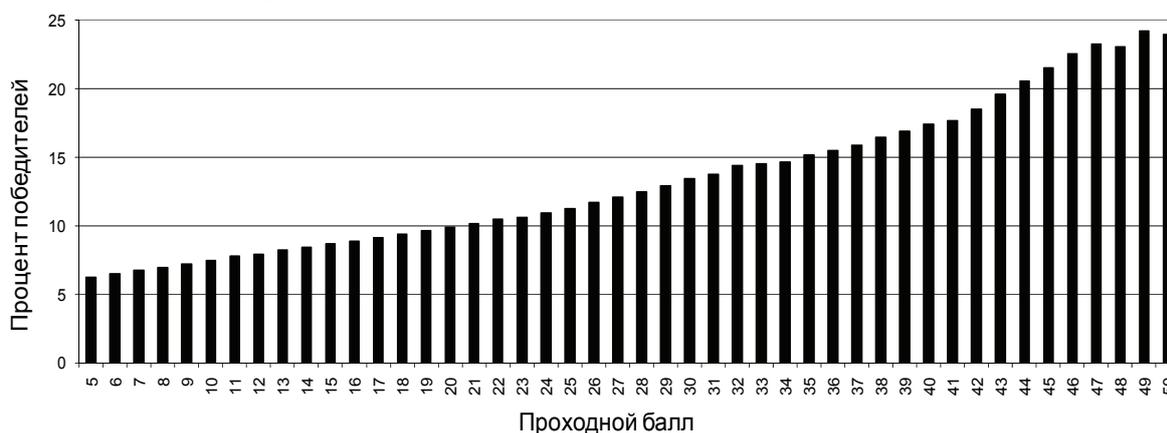


Рис. 5. Процент победителей этапа

Гистограмма на рис. 5 иллюстрирует рассчитанные значения процента победителей заключительного этапа от значения проходного балла, полученные с использованием распределения участников отборочного этапа по баллам (см. рис. 1), индексов решаемости заданий (см. табл. 1) и варианта “В” распределения баллов по задачам (см. табл. 3). Как следует из рис. 5, при значении проходного балла 21 и выше число победителей превышает 10%. Данный факт необходимо принимать во внимание при определении проходного балла в заключительный этап. Можно показать, что для проходного балла, меньшего 37, общее число победителей и призеров не превосходит 45% от числа участников этапа. Таким образом, если проходной балл  $p \geq 21$ , то условия  $\lambda_p < \lambda_{10}^p$  и  $\mu_p < \mu_{45}^p$  выполняются.

### Заключение

В работе средствами математической статистики построены оценки числа победителей заключительного этапа олимпиады в зависимости от значения проходного балла.

Показано, что существует зависимость распределения участников заключительного этапа по набранным баллам от распределения участников отборочного этапа по набранным баллам и дополнительного параметра – проходного балла в заключительный этап.

Предполагается использовать описанный в статье математический подход в цикле олимпиад 2010–2011 учебного года при определении проходного балла в заключительный этап и определении баллов за правильно решенные задания в заключительном этапе.

**Литература**

1. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 468 с.
2. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
3. Беспалько В.П. Образование и обучение с участием компьютеров (педагогика третьего тысячелетия). – М.: Изд-во Московского психолого-социального института, 2002. – 234 с.
4. Круг Г.К., Сосулин Ю.А., Фатуев В.А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции, М.: Наука, 1977. – 207 с.
5. Elfving G. Optimum allocation in linear regression theory // Ann. Math. Statist. – 1952. – № 23. – P. 255–262.

- Васильев Владимир Николаевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ректор, [vasilev@mail.ifmo.ru](mailto:vasilev@mail.ifmo.ru)
- Харченко Татьяна Владимировна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ст. преподаватель, [kharchenko@mail.ifmo.ru](mailto:kharchenko@mail.ifmo.ru)
- Клименко Виктор Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр математики, [shurup239@mail.com](mailto:shurup239@mail.com)

УДК 334.02

**КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ИНФОРМАТИЗАЦИЕЙ ПРЕДПРИЯТИЯ**

**О.А. Литвиненко**

Современное промышленное предприятие в России не может эффективно функционировать без активного и всестороннего привлечения в производственные и управленческие процессы информационных технологий. Внедрение информационных технологий (ИТ), как и обеспечение работоспособности существующей на предприятии информационно-технологической инфраструктуры, должно быть эффективно. Это достигается установлением определенной системы управления информатизацией предприятия. В настоящее время не сформированы комплексные системы управления информатизацией предприятия, учитывающие специфику данной области. В работе рассматриваются концептуальные аспекты системы управления информатизацией, а также предполагаемые направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** информатизация предприятия, управление информатизацией, система управления ИТ, стратегия управления ИТ.

**Введение**

Уровень развития и внедрения ИТ стал мощным фактором обеспечения конкурентоспособности государств в борьбе за экономическое лидерство, развитие территорий, прогресса в науке, образовании, здравоохранении, технике и производстве. Не случайно более 80% мирового рынка информационных технологий приходится на долю стран «Большой семерки». Именно ведущим индустриальным государствам в наибольшей степени доступны современные достижения в этой области, в силу чего существующий разрыв между ними и странами, находящимися на более низком уровне научно-технического развития, лишь усиливается.

Перспективы становления и развития экономики в России, возрождение высокотехнологичных отраслей промышленности, науки и образования, повышение качества жизни во многом определяются тем, насколько эффективно будет использоваться информация как один из важнейших ресурсов в производстве и социальной сфере. Успешная информатизация промышленных предприятий служит не только повышению конкурентоспособности и рентабельности самих предприятий, но и экономическому росту в масштабах всей страны, что подтверждается и большим количеством законодательных актов и целевых программ, направленных на повышение информационно-технологической оснащенности различных отраслей экономики России.

**Постановка проблемы**

Современное промышленное предприятие в России, как и в других развитых странах, не может эффективно функционировать без активного и всестороннего привлечения в производственные и управленческие процессы ИТ. В практической плоскости данный процесс называется информатизацией предприятия [1].

Внедрение информационных технологий, как и обеспечение работоспособности существующей на предприятии информационно-технологической инфраструктуры, должно отвечать предъявляемым на настоящем этапе развития науки и техники требованиям по достижению высоких показателей эффективности, что реализуется установлением определенной системы управления информатизацией предприятия.

В настоящее время не сформированы комплексные системы управления информатизацией предприятия, учитывающие специфику данной области. Существующие иностранные стандарты и методики не отвечают всем требованиям российской действительности. Отечественный опыт управления информатизацией представляет набор разрозненных и неоднородных элементов управления, зачастую неадаптированных, заимствованных из других отраслей или зарубежных практик.

В целях повышения эффективности работы самого предприятия и снижения издержек на информационно-технологическую поддержку и сопровождение бизнес-процессов необходимо определить концептуальные аспекты системы управления информатизацией российского предприятия.

**Базовые положения исследования**

Прежде всего, необходимо определить понятие информатизации. В соответствии с различными научными литературными источниками под информатизацией подразумевались либо политика и процессы, направленные на построение и развитие телекоммуникационной инфраструктуры, объединяющей

территориально распределенные информационные ресурсы [2], либо организационный социально-экономический и научно-технический процесс создания оптимальных условий для удовлетворения информационных потребностей и реализации прав граждан, органов государственной власти, органов местного самоуправления, организаций, общественных объединений на основе формирования и использования информационных ресурсов [3]. В литературе научно-исследовательского и справочного характера можно найти и другие определения информатизации, в целом сводимые к первым двум вариантам.

В масштабе предприятия понятие информатизации, как правило, идентично понятию внедрения информационной системы. Тем не менее, круг проблем, решаемых в процессе информатизации предприятия, не сводится лишь к задачам внедрения информационной системы. Кроме выполнения и контролирования оперативных функций по вводу в эксплуатацию аппаратных комплексов и программных средств, должны решаться и стратегические управленческие задачи, включающие, в том числе, и организационные вопросы, и привлечение методов инновационного, инвестиционного и проектного менеджмента, экономического анализа.

Одной из главных проблем для российских предприятий является то, что в отечественной практике управление информатизацией исторически осуществлялось как вспомогательная функция производства. В настоящее время происходит процесс интеграции российских предприятий в мировую экономику, что неизбежно влечет заимствование и унификацию стандартов управления в области промышленности в целом и управления информатизацией, в частности.

Практика создания и эксплуатации информационных систем на отечественных предприятиях выявила проблемы и противоречия. Расходы на проектирование и внедрение информационных систем обычно существенно превышали запланированные суммы. Качество разработки оказывалось неудовлетворительным, имели место противоречия между техническим и программным обеспечением при эксплуатации, рост расходов на обслуживании систем и т.д. [4].

На российских предприятиях, как правило, отсутствуют программы и комплексные методики оптимизации затрат и анализа экономической эффективности информатизации, что было бы наиболее актуально в условиях жесткой конкуренции и ограниченности финансирования [5].

### **Результаты исследования**

Управление информационно-технологической средой предприятия перестало быть исключительно технической задачей и все в большей степени становится неотъемлемой частью бизнеса, интегрированной в бизнес-процессы компании.

Система управления информатизацией должна обеспечивать реализацию не только базовых функций общей теории менеджмента, но и специфических функций, отображающих особенности обработки информации, а именно: принципы предоставления сервисов ИТ, принцип обеспечения непрерывности, целостности и доступности информационных ресурсов, принципы обеспечения инфраструктуры, принципы управления персоналом, текущими и инвестиционными расходами, принципы обеспечения полноценного взаимодействия между функциональными подразделениями.

Система управления информационной средой должна, с одной стороны, обеспечивать функционирование информационно-технологической среды предприятия, а с другой стороны, предоставлять высшему руководству возможность оценки и планирования уровня развития информационной среды. Должен быть определен стандарт внутренней отчетной, проектной и нормативной документации.

Управление информатизацией предприятия должно обеспечивать достижение не только оперативных, но и стратегических целей путем формирования и реализации стратегий в области управления информационной средой.

При этом крайне важны вопросы стратегического планирования. Политика стратегического планирования ИТ создается для достижения следующих основных целей:

- эффективное управление дорогостоящего и критического для бизнеса имущества компании;
- улучшение коммуникаций между бизнес-подразделениями и службой ИТ;
- обеспечение единого направления развития бизнес-подразделений и служб ИТ в рамках общего вектора развития предприятия;
- планирование потоков информации и развитие бизнес-процессов;
- эффективное и результативное размещение и использование ИТ-ресурсов.

Целесообразно выделять базовые и дискретные стратегии.

Базовая стратегия, которая образуется из общей стратегии предприятия, охватывает планирование, реализацию и поддержку корпоративных информационных систем, а также создание инфраструктуры и фундаментальной системы коммуникаций компании.

Дискретные стратегии охватывают следующие области:

- поддержку бизнес-подразделений предприятия;
- обеспечение работы персонала;
- документооборот.

Таким образом, система управления информатизацией должна охватывать различные сферы деятельности департамента ИТ, включая выбор и закупку технической и программной базы, поддержку работоспособности и модернизацию информационно-технологической инфраструктуры, подготовку и переподготовку персонала, обеспечение бизнес-процессов предприятия, коммуникацию с функциональными департаментами, обеспечение информационной безопасности, проведение внутреннего контроля и аудита.

Департамент ИТ предприятия не должен рассматриваться как центр затрат, не дающий непосредственной финансовой отдачи. Оптимизация процессов в области информатизации, прозрачность управления, использование элементов проектного подхода, разработка и применение инструментов анализа рисков и определения эффективности работы должны способствовать формированию отношения к информатизации как привлекательной инвестиционной среде и конкурентному преимуществу.

Необходимо выработать организационное обеспечение создания и внедрения системы управления информационной средой промышленного предприятия.

### **Предполагаемые исследования**

Для формирования концепции управления информатизацией предприятия требуются следующие действия.

- Проанализировать состояние развития информационной среды на действующих отечественных предприятиях.

Необходимо учитывать при этом такие параметры, как масштаб предприятия, его положение на рынке, критичность полноценного функционирования информационных систем для бизнеса, а также степень автоматизации процессов производства и управления на предприятии, степень интегрированности учетных и управленческих информационных систем.

- Изучить опыт управления информатизацией в России и за рубежом.

В последнее время на российских предприятиях все более широко внедряются системы качества, сертифицированные по стандарту ISO 9000, помогая открыть дорогу российским поставщикам на западный рынок и потеснить конкурентов в России [6]. Хотя задачи, структура и полномочия подразделения, отвечающего за информатизацию, во многом определяются спецификой организации, существуют типовые подходы и методики построения эксплуатационных служб.

Таким образом, за последние 10–15 лет в России накоплены не только большие массивы информации, программных средств, ноу-хау в области применения аппаратного и программного обеспечения, но и достаточно большой опыт управления прикладными информационными технологиями в сложных экономических условиях. Специфика функционирования предприятия, в том числе и служб ИТ, а также законодательные различия не позволяют применять наработки западных специалистов в данной области без предварительной адаптации.

Тем не менее, существует достаточно большое количество методик и даже комплексов управления ИТ, которые неоднократно были освещены в зарубежных публикациях. В качестве примера можно привести общеизвестный подход ITSM.

Существуют также и программные продукты, распространяемые крупными ИТ-фирмами-производителями, которые позволяют реализовывать и контролировать применение принципов данного подхода к управлению ИТ.

- Обосновать концепцию управления информационной средой предприятия.
- Выявить существенные факторы, определяющие состав и структуру системы управления.

### **Заключение**

Таким образом, сделан вывод о том, что необходимо определить состав и структуру системы управления информатизацией промышленного предприятия, сформулировав актуальную концепцию. Детализация концепции, определение набора управленческих методов и решение организационных вопросов позволит в дальнейшем не только полноправно участвовать в мировых экономических процессах, но и повысить рентабельность отдельно взятого промышленного предприятия.

### **Литература**

1. Автоматизированные информационные технологии в экономике: Учебник / Под ред. Г.А. Титоренко. – М.: Компьютер, ЮНИТИ, 2004. – 400 с.
2. Коротков А.В., Кристальный Б.В., Курносоев И.Н. Государственная политика Российской Федерации в области развития информационного общества. – М.: Трейн, 2007. – 472 с.
3. Российская Федерация. Законы. Федеральный закон РФ от 27.07.2006 г. № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и защите информации» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2006. – № 8.

4. Кригер А.Б. Информационный менеджмент. – Владивосток: ТИДОТ ДВГУ, 2004. – 126 с.
5. Граматчиков А. IT в условиях кризиса // Эксперт. – 2008. – № 50 (639).
6. Лопарев С., Шелупанов А. Анализ инструментальных средств оценки рисков утечки информации в компьютерной сети предприятия // Вопросы защиты информации. – 2003. – № 7.

*Литвиненко Ольга Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, litvinenkoa@yandex.ru

УДК 658.5:339.3

## **РАЗВИТИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СФЕРЕ ТОРГОВЛИ**

**Р.А. Луговской**

Проведен анализ структуры органов государственной власти, ответственных за разработку политики в сфере торговли. Предложено совершенствование системы мониторинга и оценки сферы торговли для дальнейшего определения государственной политики развития предпринимательства в данной сфере.

**Ключевые слова:** предпринимательство, торговля, государственное регулирование.

### **Введение**

Разработка стратегии бизнеса в сфере торговли невозможно без четкого представления о стратегии развития региона, без программы социально-экономического развития и развития потребительского рынка. Понимание механизма воздействия органов власти на развитие региона поможет руководителям разрабатывать обоснованные прогнозы развития рынка. Адекватное же представление о методах государственного регулирования будет способствовать своевременному устранению преград в развитии фирмы.

Государственное регулирование в сфере торговли представляет собой систему методов прямого и косвенного воздействия на процессы, обеспечивающие функционирование предприятий торговли и организаций, создающих условия для эффективного функционирования бизнеса. Организационная структура государственного регулирования в сфере торговли представляет собой многоуровневую систему взаимодействия органов власти с соответствующим распределением федеральных и региональных полномочий и ответственности.

Таким образом, целью данной работы является изучение организационной структуры государственного управления и механизмов, заложенных в основу принятия стратегических решений на федеральном и региональном уровнях, а также механизмов государственного регулирования. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить и выявить структуры, ответственные за разработку политики в области регулирования торговой деятельности на различных уровнях;
- определить существующие механизмы государственного регулирования;
- провести анализ организационной структуры органов государственной власти.

Принятый Федеральный закон РФ «Об основах государственного регулирования торговой деятельности в Российской Федерации» [1] нуждается в доработке. Решение поставленных задач поможет сформировать конструктивный подход к дальнейшему изучению существующих механизмов воздействия органов государственной власти на федеральном и региональном уровнях на предпринимательские структуры, занятые в сфере торговли.

### **Структура органов государственной власти в области развития предпринимательской деятельности в сфере торговли**

Решения Президента Российской Федерации определяют основные направления внешней и внутренней политики государства, а, следовательно, и развитие бизнеса по ключевым аспектам. Через Полномочных представителей Президента РФ обеспечивается реализация конституционных полномочий главы государства на территории каждого из семи федеральных округов. При каждом Представителе Президента функционирует специальный Совет с совещательной функцией, рассматривающий важнейшие вопросы федерального и регионального значения [2, 3].

В составе высшего органа исполнительной власти – Правительства РФ – функционирует ряд структур, в той или иной степени осуществляющих регулирующие функции. Среди них:

– *Совет по конкурентоспособности и предпринимательству* [3, 4], который является совещательным органом, образованным для обеспечения практического взаимодействия федеральных органов исполнительной власти, предпринимательского сообщества и научной общественности в целях выработки предложений по созданию эффективных механизмов повышения конкурентоспособности экономики и развития предпринимательства в Российской Федерации. В состав Совета входят представители различных органов власти и крупных компаний;

– *Правительственные комиссии по вопросам экономической интеграции и по вопросам Всемирной торговой организации и взаимодействия Российской Федерации с Организацией экономического сотрудничества и развития* [4, 5], рассматривающие вопросы международного сотрудничества, от решений которых в существенной степени зависит конъюнктура на внутреннем рынке;

– *Правительственная комиссия по развитию малого и среднего предпринимательства* [6, 7], осуществляющая координацию деятельности органов исполнительной власти и взаимодействие с представителями бизнеса по выработке предложений, связанных с реализацией государственной политики в сфере развития малого и среднего предпринимательства.

Правительство РФ руководит 13 министерствами, 5 федеральными службами и 3 федеральными агентствами, из которых 5 органов влияют на предпринимательскую деятельность в сфере торговли на уровне страны. К ним относятся:

– *Министерство промышленности и торговли* Российской Федерации (Минпромторг РФ), в функции которого входит выработка государственной политики и нормативно-правовое регулирование в сфере внешней и внутренней торговли;

– *Министерство регионального развития*, одна из функций которого – выработка государственной политики и нормативно-правовое регулирование в сфере социально-экономического развития субъектов Российской Федерации и муниципальных образований;

– *Министерство финансов*, регулирующее, в частности, таможенную, бюджетную и налоговую сферы. Решения по выделению денежных средств на развитие предпринимательства и изменению налоговой политики принимаются по согласованию с органами, непосредственно отвечающими за данное направление;

– *Министерство экономического развития*, в число функций которого входит выработка государственной политики и нормативно-правовое регулирование в сфере анализа и прогнозирования социально-экономического развития, развития предпринимательской деятельности, инвестиционная деятельность и формирование федеральных и ведомственных целевых программ;

– *Федеральная антимонопольная служба*, осуществляющая, главным образом, контроль над деятельностью естественных монополий и над соблюдением законодательства о рекламе. Она курирует ряд вопросов продовольственной безопасности страны, в том числе связанных с деятельностью торговых сетей.

Следует отметить, что социально-экономическим развитием занимаются два Министерства – Министерство экономического развития и Министерство регионального развития. Минэкономразвития занимается этим вопросом на федеральном уровне, а Минрегионразвития – на уровне субъектов РФ (региональном). При этом наличие двух органов исполнительной власти федерального уровня, занимающихся одними и теми же вопросами, приводит к тому, что во многом пересекающиеся решения, несогласованно принимаемые каждой структурой, могут вступать в противоречие друг с другом.

Комитеты и постоянные комиссии Совета Федерации осуществляют подготовку заключений по принятым Государственной Думой федеральным законам, разрабатывают и предварительно рассматривают законопроекты и проекты иных нормативных правовых актов. При Совете Федерации Федерального собрания РФ имеются 2 постоянно действующих комитета, отвечающих за сферу предпринимательства:

– *Комитет Совета Федерации по делам Федерации, Федеративному договору и региональной политике*, в ведении которого находятся основные вопросы федеративных отношений, региональной политики и местного самоуправления;

– *Комитет Совета Федерации по экономической политике, предпринимательству и собственности* – сюда относятся вопросы законодательного обеспечения, в том числе прогнозирования и индикативного регулирования экономики.

В состав Государственной Думы РФ входит ряд комитетов, из числа которых участие в регулировании экономической деятельности принимают:

– Комитет Государственной Думы по экономической политике и предпринимательству;

– Комитет Государственной Думы по делам Федерации и региональной политике.

В регионах России высшие законодательные органы и губернатор формируют и утверждают планы и программы социально-экономического развития региона в рамках федерального законодательства. В исполнительных и законодательных органах также существуют профильные комитеты, комиссии и специальные советы с совещательной функцией, отвечающие за социально-экономическое развитие регионов, в том числе предпринимательской деятельности и сферы торговли.

Например, в Санкт-Петербурге губернатор формирует исполнительные органы власти. Один из вице-губернаторов Санкт-Петербурга отвечает за решение вопросов экономического развития, налоговой, финансовой, промышленной и научно-технической политики, развития потребительского рынка, бюджетным вопросам, а также обеспечивает взаимодействие Правительства Санкт-Петербурга с органами и организациями, осуществляющими деятельность в данной сфере. На развитие предпринимательства

в торговле непосредственно влияет деятельность Комитета экономического развития, промышленной политики и торговли (КЭРППиТ).

КЭРППиТ образован для разработки и реализации государственной социально-экономической политики в Санкт-Петербурге, определения методов государственного регулирования экономики, организации и межотраслевой координации деятельности исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга по вопросам функционирования государственного сектора экономики Санкт-Петербурга, внутренней торговли, сферы услуг и тарифной политики.

Основными задачами КЭРППиТа, прямо или косвенно связанными с предпринимательской деятельностью в сфере торговли, являются:

1. разработка предложений, определяющих направления стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга, в том числе в промышленной, аграрной, финансовой, тарифной, инвестиционной и научно-технической политике, политике в области внутренней торговли, потребительского рынка и сферы услуг;
2. анализ социально-экономического положения и тенденций развития Санкт-Петербурга;
3. организация и координация деятельности по разработке комплексных планов, прогнозов и программ социально-экономического развития Санкт-Петербурга, включая вопросы развития инфраструктуры и транспортного комплекса Санкт-Петербурга;
4. разработка целевых программ Санкт-Петербурга по основным направлениям экономической политики;
5. экономическое обоснование государственных нужд и расходов Санкт-Петербурга;
6. подготовка адресных программ капитальных вложений;
7. организация системы государственного заказа Санкт-Петербурга;
8. мониторинг, анализ и оценка экономической эффективности государственного сектора экономики, включая использование объектов недвижимости, разработка и реализация программ и мероприятий по его оптимизации и развитию, формирование планов развития государственного сектора экономики Санкт-Петербурга;
9. разработка комплекса мер по оптимизации участия исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга в сфере регулирования экономической деятельности;
10. содействие развитию предпринимательства в Санкт-Петербурге, создание условий для развития конкуренции и потребительского рынка;
11. организация межрегионального и международного сотрудничества в экономической сфере;
12. разработка мероприятий и координация действий исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга во внешнеэкономической, межрегиональной и выставочно-ярмарочной деятельности, содействие привлечению инвестиций;
13. участие в формировании программ развития муниципальных образований, формировании и реализации программ развития территорий Санкт-Петербурга, разработка экономических основ взаимоотношений с органами местного самоуправления в Санкт-Петербурге;
14. осуществление полномочий исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга в сфере государственного регулирования производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции в соответствии с действующим законодательством;
15. участие в разработке мероприятий по организации транспортировки, обезвреживания и захоронения опасных отходов производства и потребления;
16. обеспечение формирования регионального продовольственного фонда Санкт-Петербурга;
17. анализ, прогнозирование и координация деятельности, связанной с развитием трудовых ресурсов Санкт-Петербурга и миграционных процессов;
18. осуществление иных задач в области экономического развития, промышленной политики и торговли.

В Законодательном Собрании Санкт-Петербурга образована Постоянная комиссия по промышленности, экономике и собственности. Важнейшими направлениями ее деятельности, непосредственно затрагивающими интересы торговли, являются:

- поддержка городской промышленности, агропромышленного комплекса, антимонопольная деятельность и вопросы банкротства;
- рассмотрение региональных проблем экономической реформы в сфере предпринимательства, включая налоговую, инвестиционную деятельность;
- рассмотрение вопросов по торговле, транспортному комплексу, собственности, таможенной политике, среднему и малому бизнесу;
- защита субъектов отечественного рынка.

В 2004 г. был создан Общественный совет по развитию малого предпринимательства при Губернаторе Санкт-Петербурга, что явилось важным шагом в диалоге бизнеса и власти. В него входят представители различных общественных организаций, поддерживающих и отстаивающих интересы предпринимателей. В 2005 г. были созданы структурные подразделения Общественного совета при главах адми-

нистраций районов для координации действий в области предпринимательства. В связи с отсутствием закона Санкт-Петербурга о разработках программ социально-экономического развития все концепции, программы и планы социально-экономического развития региона, в том числе торговли, разрабатываются КЭРППиТом и утверждаются Правительством Санкт-Петербурга на основании соответствующих постановлений Правительства Санкт-Петербурга с учетом федерального законодательства.

В данном разделе были выявлены органы государственной власти федерального и регионального уровней, в компетенции которых находится регулирование сферы торговли. Для всестороннего понимания и дальнейшего изучения вопросов государственного регулирования торговой деятельности необходимо рассмотреть существующие механизмы государственного регулирования.

### **Механизмы государственного регулирования**

К основным механизмам государственного регулирования торговли можно отнести [8]:

– *Формирование правовой базы предпринимательской деятельности.* Включает в себя гарантирование государством права частной собственности, регламентирование организационно-правовых форм субъектов предпринимательской деятельности, регулирование договорных отношений между субъектами рынка, выполнение государством роли арбитра при разрешении хозяйственных споров;

– *Защита конкуренции и ограничение монополистической деятельности.* Предполагает контроль государственных органов за деятельностью естественных монополий путем регламентирования цен, тарифов, качества предоставляемых услуг и введение запретительных мер в отношении действий любых монополий, направленных на ограничение конкуренции или злоупотребление доминирующим положением;

– *Защита прав потребителей.* Осуществляется через систему нормативно-правовых актов, в том числе лицензирование некоторых видов деятельности (например, алкогольной), определяющих минимально необходимые требования для торговли (ГОСТы и т.п.), порядок защиты прав потребителей, ответственность предпринимателей, систему государственной и общественной защиты потребителей;

– *Регламентирование трудовых отношений и поддержание социального партнерства.* Предусматривает формирование трудового законодательства, системы социального партнерства представителей работников и работодателей, охрану труда и систему мер по разрешению трудовых споров;

– *Формирование налоговой системы и перераспределение доходов.* Осуществляется посредством бюджетного планирования, принятия ставок подоходного налога, налога на прибыль и других налоговых изъятий, а также установления системы социального обеспечения;

– *Перераспределение ресурсов.* Реализуется в целях финансирования природоохранных мероприятий, содержания органов государственного управления, обеспечения внутренней и внешней безопасности страны;

– *Регулирование цен и тарифов.* Осуществляется государством в основном в отношении продукции и услуг естественных монополий. Цены и тарифы регулируются с целью защиты интересов потребителей и пресечения использования монопольного положения в целях извлечения необоснованной прибыли;

– *Государственная поддержка отдельных видов бизнеса.* Осуществляется в зависимости от целей, которые государство ставит при поддержке того или иного вида бизнеса;

– *Государственное регламентирование внешнеторговой деятельности.* Реализуется через таможенно-тарифную систему и систему мер по содействию и стимулированию внешнеторговой деятельности;

– *Регулирование валютного курса.* Осуществляется с целью защиты отечественных товаропроизводителей от действий, которые могут привести к негативному изменению платежеспособного баланса.

Участие в разработке механизмов регулирования торговли на уровне региона также принимают представители объединений торговых предприятий, общественные организации. Их деятельность, на взгляд автора, может способствовать решению следующих вопросов:

- повышение качества товаров и услуг сверх требований действующего законодательства;
- поддержка отечественных производителей путем принятия обязательств по продаже производимых ими товаров;
- внесение предложений в соответствующие органы по изменениям и дополнениям в законодательные и нормативные акты для улучшения деятельности торговых предприятий на уровне региона;
- создание обществ, отстаивающих интересы предприятий торговли.

Несмотря на наличие различных механизмов государственного регулирования, в том числе и торговой деятельности, на практике ситуация несколько иная. Органы государственной власти стараются переложить максимальное количество функций на рынок как наиболее эффективный механизм, способный саморегулироваться [9]. В то же время в развитых странах значительную ответственность за регулирование рынка берет на себя именно государство, так как практика показала желание предпринимателей в сфере торговли обогащаться, даже если это приведет к значительным негативным социальным последствиям.

### **Необходимые направления государственной политики в дальнейшем развитии предпринимательской деятельности в сфере торговли**

На сегодняшний день действующая организационная структура государственного управления и механизмы, заложенные в основу принятия стратегических решений на государственном и региональном уровнях, требуют определенных корректировок. Анализ действующей системы формирования и реализации механизмов регулирования торговли показал следующее.

- Отсутствие в совещательных органах достаточного представительства торговых предприятий и их объединений (особенно представителей малого и среднего бизнеса). В результате ощущается острый недостаток объективной информации, необходимой для эффективного регулирования сферы торговли и дальнейшего развития предпринимательства.
- Важно отметить, что функционируют Совет с совещательной функцией при Председателе Правительства РФ и Правительственная постоянная комиссия по вопросам предпринимательства, возглавляемая одним из заместителей Председателя Правительства РФ. На наш взгляд, эти два органа следует объединить в Постоянную комиссию по вопросам предпринимательства. При этом участники новой комиссии из Совета остаются с совещательным голосом. Эта мера поможет сконцентрировать все вопросы развития предпринимательства в одном общественном органе федерального значения, что существенно ускорит процесс принятия решений.
- Важнейшим условием совершенствования механизмов государственного регулирования в сфере торговли является разработка эффективных форм прямого диалога между руководителями торговых организаций и органами государственной власти. Проблемы, с которыми сталкивается торговый бизнес, и его непосредственное видение путей решения этих проблем не всегда своевременно анализируются. Общественные организации, объединяющие несколько десятков предприятий торговли, имеют больше шансов быть услышанными органами власти. Направляемые ими во властные структуры обращения не следует рассматривать как попытку предприятий торговли лоббировать свои интересы. Часто они содержат ценную информацию о назревших в отрасли переменах.
- Большое значение в развитии любой страны и региона играет малый и средний бизнес. Можно назвать несколько факторов, обуславливающих существенную роль малого бизнеса в развитии экономики. Он более гибок, не подвержен картельному сговору, не способен играть на повышении цен. Малый бизнес в торговле формирует спрос на продукцию мелких товаропроизводителей, например, фермерских хозяйств, пользуется услугами небольших фирм, что стимулирует развитие рынка. Зачастую это семейный бизнес, не имеющий возрастных ограничений, что является положительным социальным фактором. В условиях кризиса и посткризисного периода как никогда важна государственная поддержка развития малого и среднего бизнеса, необходимо использование действенных инструментов государственного регулирования. Однако несовершенство законов, регулирующих деятельность малого бизнеса, приводит к возникновению комплекса проблем, приводящих к его неспособности выполнять свои социальные функции [10].
- Необходима разработка эффективной региональной стратегии развития торговли, но не менее важным является и наличие обоснованной методико-технологической базы в области стратегического планирования. Кроме этого, важным вопросом является организация оценки и мониторинга развития сферы торговли, методика которых может быть как единой на территории всей страны, так и отдельной в каждом регионе. Например, в Санкт-Петербурге имеются Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 11.12.2007 № 1586 «О плане мероприятий по развитию потребительского рынка Санкт-Петербурга на 2008–2011 годы» и Постановление Правительства Санкт-Петербурга от 25.12.2007 № 1659 «О мерах по организации деятельности исполнительных органов государственной власти Санкт-Петербурга в сфере государственного планирования социально-экономического развития Санкт-Петербурга». Только в Постановлении № 1659 имеется Положение о мониторинге программ социально-экономического развития Санкт-Петербурга, задач социально-экономического развития Санкт-Петербурга и стандартов проживания в Санкт-Петербурге, но в нем не предусмотрены мониторинг и оценка состояния именно сферы торговли.

### **Заключение**

Несмотря на наличие органов власти федерального и регионального значения, их структурных подразделений, отвечающих за развитие предпринимательства и торговли, можно констатировать только лишь начало работы в направлении развития сферы торговли. Главным образом, начало было положено принятием Государственной Думой РФ Федерального закона РФ «Об основах государственного регулирования торговой деятельности в Российской Федерации». Президент РФ 30 января 2010 года подписал Указ № 120 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». 10 июня 2010 года в Законодательное собрание Санкт-Петербурга был внесен проект закона Санкт-Петербурга № 6672 «О государственном регулировании торговой деятельности в Санкт-Петербурге».

также планируется доработка и принятие проекта закона «О продовольственной безопасности в Санкт-Петербурге». К сожалению, пока отсутствуют мониторинг и оценка состояния развития сферы торговли.

По мнению автора, целесообразно продолжить работу над разработкой научно обоснованных показателей мониторинга и специального коэффициента, позволяющих оценить состояние сферы торговли, а также определить оптимальный механизм государственного регулирования в данной сфере. Кроме этого, необходимо разработать механизм, позволяющий определить оптимальное соотношение крупного, среднего и малого бизнеса в сфере торговли. Данная мера позволит выявлять необходимость в малом бизнесе и максимально эффективно реализовывать его важные функции в сфере торговли, например, формировать необходимую конкурентную среду в экономике, увеличивать занятость населения, самозанятость и реальную возможность самореализации. Полученные данные должны позволить объективно и однозначно:

- производить оценку качества развития торговли в регионе;
- определять нехватку торговых площадей как в регионе в целом, так и в районах региона, в том числе их оптимальное расположение;
- выявлять оптимальное соотношение малого, среднего и крупного торгового бизнеса и необходимость развития того или иного вида бизнеса для эффективного развития экономики региона;
- своевременно устранять возникающие недостатки, развивая предпринимательство в сфере торговли;
- далее совершенствовать нормативно-правовую базу в России и регионах и пр.

#### **Литература**

1. Федеральный закон РФ от 28 декабря 2009 г. № 381-ФЗ «Об основах государственного регулирования торговой деятельности в Российской Федерации».
2. Федеральные органы исполнительной власти РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gov.ru/main/ministry/isp-vlast44.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 01.10.2010).
3. Федеральное собрание РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gov.ru/main/page7.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 01.10.2010).
4. Распоряжение Правительства РФ от 16.07.2008 года № 865-р «О составе Совета по конкурентоспособности и предпринимательству при Правительстве Российской Федерации».
5. Постановление Правительства РФ 5.12.2006 г. № 741 «О внесении изменения в Положение о Комиссии Правительства Российской Федерации по вопросам Всемирной торговой организации и взаимодействия Российской Федерации с Организацией экономического сотрудничества и развития».
6. Постановление Правительства РФ от 17.03.2008 г. № 178 «О Правительственной комиссии по развитию малого и среднего предпринимательства».
7. Постановление Правительства РФ от 25.08.2006 г. № 521 «О внесении изменений в Положение о Правительственной комиссии по вопросам экономической интеграции».
8. Прудников В.М. Государственное регулирование предпринимательской деятельности: Учебное пособие. – 2-е изд. – М.: РИОР, 2008. – 241 с.
9. Федоров. Е. Евгений Федоров комментирует принятие закона «Об основах государственного регулирования торговой деятельности в РФ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.efedorov.ru/node/886>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 18.12.2009).
10. Федеральный закон РФ от 24 июля 2007 г. № 209-ФЗ «О развитии малого и среднего предпринимательства в Российской Федерации».

*Луговской Роман Андреевич* – Санкт-Петербургский торгово-экономический институт, кандидат экономических наук, ассистент, [rlugovskoy@yandex.ru](mailto:rlugovskoy@yandex.ru)

УДК 681.51.015

## КАСКАДНАЯ СХЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА

С.В. Арановский, А.А. Бобцов, А.В. Горин

Рассматривается каскадная схема идентификации зашумленного гармонического сигнала, состоящая из последовательно включенных устройств идентификации и полосно-пропускающих фильтров.

**Ключевые слова:** идентификация частоты, автоподстройка фильтров, каскадная схема.

Как и в [Л], рассмотрим сигнал  $y(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + \delta(t)$ , где  $y(t)$  – измеряемый сигнал,  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – амплитуда, частота и фаза гармонического сигнала соответственно,  $\delta(t)$  – нерегулярная составляющая, например, шум измерений. Основной задачей идентификации параметров такого сигнала является получение оценки частоты  $\hat{\omega}$ . На данный момент разработаны различные алгоритмы решения поставленной задачи (например, [Л]), но большинству из них присущ недостаток – при прохождении через идентификатор составляющая  $\delta(t)$  может усилиться, что приведет к существенным колебаниям в оценке частоты и снизит точность идентификации. Для снижения влияния  $\delta(t)$  разработчику приходится снижать настраиваемые коэффициенты алгоритмов, что, в свою очередь, также ухудшает точность. Для устранения указанного недостатка предлагается каскадная схема идентификации с настраиваемыми полосно-пропускающими фильтрами для последовательного уточнения оценки частоты идентифицируемого сигнала.

На рисунке приведена структурная схема предлагаемой каскадной идентификации. Сигнал  $y(t)$  поступает на вход первого идентификатора (И1), где вырабатывается предварительная оценка частоты  $\hat{\omega}_1$ . На основе этой оценки в непрерывном времени настраивается полосно-пропускающий фильтр (ППФ1) так, чтобы середина полосы пропускания приходилась на частоту  $\hat{\omega}_1$ . На вход ППФ1 поступает сигнал  $y(t)$ , а полученный в результате сигнал  $y_1(t)$  поступает на вход следующего устройства идентификации (И2). Поскольку после фильтрации нерегулярная составляющая в сигнале  $y_1(t)$  меньше, чем в сигнале  $y(t)$ , то получаемая на выходе И2 оценка частоты  $\hat{\omega}_2$  будет более точной, нежели  $\hat{\omega}_1$ . Аналогичным образом функционируют ППФ2 и И3, формируя сигналы  $y_2(t)$  и  $\hat{\omega}_3$ .

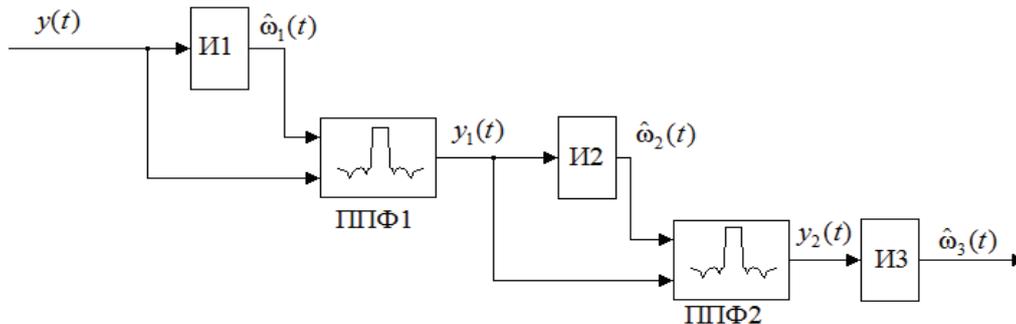


Рисунок. Структурная схема каскадной идентификации для трех идентификаторов

Таким образом, полоса пропускания каждого последующего фильтра в непрерывном времени подстраивается в соответствии с текущей оценкой частоты сигнала. Применение такой схемы позволяет на каждом следующем уровне каскада получать более точную оценку.

Л. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. – 2010. – № 2. – P. 129–139.

**Арановский Станислав Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, s.aranovskiy@gmail.com

**Бобцов Алексей Алексеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ru

**Горин Алексей Владимирович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, the\_gorin\_alexey@mail.ru

УДК 681.7.06; 681.7.068.4

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА В-СПЛАЙНОВ ДЛЯ РАСЧЕТА Х-РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ДИФфуЗИИ ТИТАНА В ПОДЛОЖКАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

В.С. Серебрякова, Г.Б. Дейнека

Предложен численный метод расчета параметров интегрально-оптических элементов с применением эрмитового набора В-сплайнов. Метод использован для определения технологических параметров изготовления Ti:LiNbO<sub>3</sub> разветвителей Х-типа с заданным коэффициентом деления. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** канальный оптический волновод, Х-разветвитель, метод конечных элементов, В-сплайны, коэффициент деления.

Важнейшей характеристикой интегрально-оптического разветвителя является коэффициент деления мощности излучения. Коэффициент деления зависит от профиля моды канальных оптических волноводов (КОВ), от технологических параметров изготовления и от геометрии волноводов и обычно подбирается экспериментально. Проведенный анализ литературы в области методов расчета волноводов и интегрально-оптических разветвителей не дает исчерпывающей информации о процессе получения заданных характеристик волноводов и направленных ответвителей на их основе. На сегодняшний день существуют различные методы численного моделирования распространения излучения в КОВ. Эти методы используют трудоемкую и неоднозначную практику разбиения пространства на неравномерную сетку с триангулярными элементами [1, 2]. Поэтому важно иметь метод, который теоретически описывает зависимость оптических свойств интегрально-оптического элемента (ИОЭ) от технологических параметров его изготовления и геометрии шаблона.

Цель работы заключается в разработке численного метода определения характеристик интегрально-оптических Х-разветвителей с заданным коэффициентом деления на основе моделирования распространения излучения в КОВ с учетом физических процессов формирования волноводов.

Предложен метод расчета канальных КОВ и ИОЭ на равномерной сетке финитных элементов [2]. На его основе разработан программный продукт с окном визуализации для вывода графической информации и возможностью ввода и корректировки параметров. Основным достоинством метода является применение в качестве базиса эрмитового набора гладких В-сплайнов [3], что избавляет от необходимости построения на каждом узле индивидуальной базисной функции и сводится к построению равномерной сетки, в каждом узле которой находится произведение одномерных базисных функций. Математическая модель, положенная в основу предлагаемого метода, заключается в решении уравнения Гельмгольца в приближении малых изменений показателя преломления в направлении распространения [4] и позволяет решать частные задачи из фундаментальных соотношений. Метод, изложенный авторами в работе [2], который сводит решение уравнения Гельмгольца к матричной задаче, распространен на трехмерный случай. Пересчет поля в направлении распространения излучения осуществляется с помощью приближения Кранка–Никольсона [4], модифицированного для работы с матричными уравнениями.

Поставлена задача – добиться заданного коэффициента деления  $K_{division} = 50:50\%$  Х-разветвителей, эскизы шаблонов которых приведены на рис. 1, а, б. Для расчетов выбрана технология диффузии титана в подложки ниобата лития х-среза. В качестве варьируемых параметров для расчетов были выбраны время диффузии  $t$ , расстояние между каналами  $d$  и длина взаимодействия  $L$ . Температура диффузии ( $T=1000^\circ\text{C}$ ), ширина каналов ( $W=8$  мкм) и толщина титановой полоски ( $H=89$  нм) приняты неизменными. Распределение показателя преломления в области диффузии принято в соответствии с формулами, полученными путем математической обработки экспериментальных результатов для диффузии титана в ниобат лития х-среза [1].

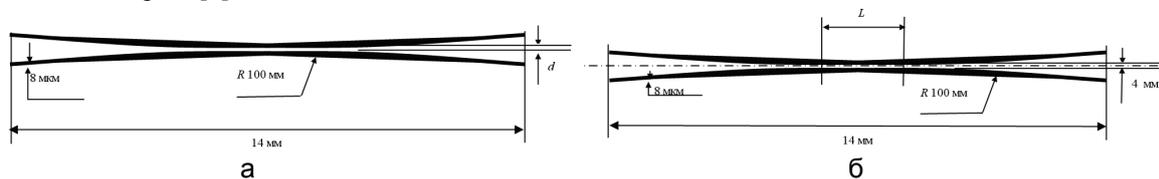


Рис. 1. Эскиз шаблона центральной части Х-разветвителя: без прямого участка связи, но с варьируемым расстоянием между каналами  $d$ , мкм (а); с прямым участком взаимодействия  $L$ , мм (б)

На первом этапе моделирования рассчитывается эффективное время диффузии (фиксированная температура диффузии  $T=1000^\circ\text{C}$ ), при котором параметры созданных каналов таковы, что энергия излучения с минимальными потерями из одного канала переходит в противоположный вводу канал (при  $L=0$ ,  $d=4$  мкм). При коэффициенте деления  $K_{division} = 8,2\%:91,8\%$  эффективное время диффузии составляет  $t_{eff}=45$  час. В качестве исходного распределения поля выбирается основная мода одного канала, вычисленная как решение уравнения Гельмгольца [2]. Разработанная программа позволяет визуализировать двумерное распределение интенсивности в любом сечении  $z$  в относительных единицах при прохождении излучения вдоль направления распространения [2].

На следующем этапе моделирования рассматриваются два способа получения заданного коэффициента деления (температура диффузии  $T=1000^{\circ}\text{C}$  неизменна, а эффективное время диффузии  $t_{eff}=45$  часов). В первом случае заданный коэффициент деления можно получить, изменяя расстояние между волноводами  $d$  (рис. 2, а). Во втором случае добиться заданного значения коэффициента деления можно, увеличивая длину взаимодействия  $L$  (рис. 2, б).

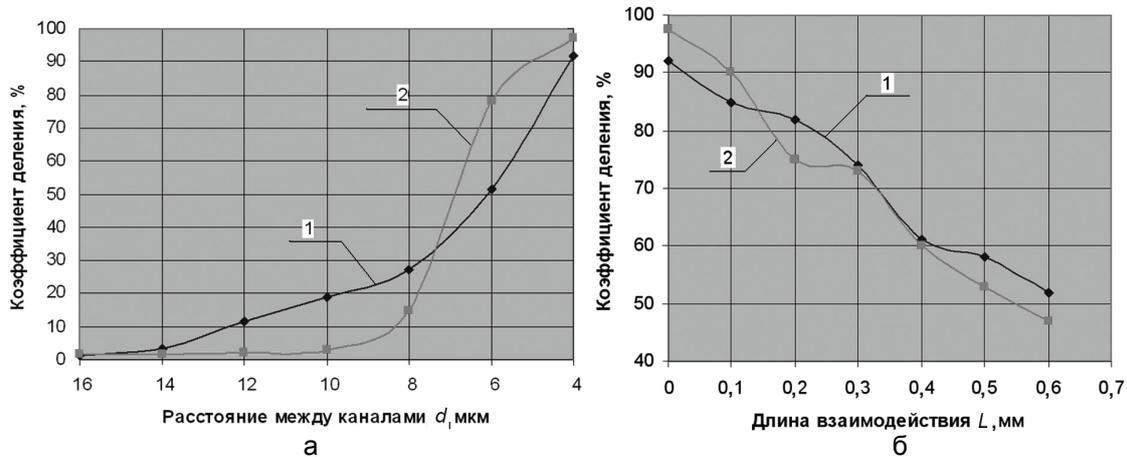


Рис. 2. Зависимость коэффициента деления: от расстояния между каналами  $d$  (а); от длины взаимодействия  $L$  (б) (1 – результаты моделирования, 2 – экспериментальные данные)

В лаборатории квантовой электроники Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе изготовлены опытные образцы X-разветвителей по технологии диффузии титана в подложку ниобата лития x-среза, топология которых показана на рис. 1, а, б. Образцы выполнены в соответствии с техническими условиями ВДАМ.203728.001ТУ и параметрами диффузии, полученными при расчетах. Сравнение оптических характеристик опытных образцов X-разветвителей с результатами моделирования показало, что использованная математическая модель адекватно описывает физические процессы формирования X-разветвителей (рис. 2, а, б).

В ходе работы было проведено моделирование распространения излучения в титан-диффузионных X-разветвителях на подложках из ниобата лития и изготовлены экспериментальные образцы. Представленные результаты расчета таких X-разветвителей показали хорошее соответствие характеристикам экспериментальных образцов для случая изменения длины взаимодействия  $L$ . Среднее значение отклонения от экспериментальных данных в этом случае составило 2,8 %. Предложенный метод позволяет рассчитывать технологические параметры изготовления интегрально-оптических X-разветвителей с заданным коэффициентом деления.

1. Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 49. – С. 42–53.
2. Дейнека Г.Б., Серебрякова В.С. Расчет канального оптического волновода с произвольным распределением показателя преломления с применением эрмитового набора В-сплайнов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 68. – С. 6–10.
3. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
4. Lifante Gin'es. Integrated photonics: Fundamentals. Wiley&Sons Ltd, 2003. – 198 p.

**Серебрякова Владлена Сергеевна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, vlladllena@mail.ru

**Дейнека Геннадий Борисович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, gdeineka@yahoo.com

УДК 004.8:004.9

**МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИННОВАЦИЙ****А.В. Маслобоев, М.Г. Шишаев**

Разработаны научно-методические основы комплексного информационного обеспечения управления инновационным развитием региона. Создан прототип распределенной мультиагентной системы информационной поддержки жизненного цикла инноваций.

**Ключевые слова:** информационные технологии и системы, инновационная деятельность, имитационное моделирование.

Позиции России в сфере наукоемких технологий и инноваций в настоящее время на фоне ведущих мировых держав весьма скромны. Несмотря на большой научный потенциал, доля нашей страны на мировом рынке гражданской наукоемкой продукции не превышает 0,3%, в то время как доля США – 36%, Японии – 30%, Китая – 6%. Одна из причин такого разрыва между научными исследованиями, опытно-конструкторскими разработками и реальным производством заключается в недостатке эффективных рычагов управления инновационным развитием экономики. Директивный подход, заключающийся в жестком планировании экономического, в том числе и инновационного, развития, нереализуем в современных экономических условиях нашей страны. В этой связи представляется более эффективным неявное управление инновационным развитием, которое заключается в создании благоприятных условий для зарождения инновационных идей, их развития и воплощения в виде продуктовых или технологических новаций. Несмотря на отсутствие непосредственных управляющих воздействий на инновационные процессы, такое управление должно быть целенаправленным и методичным. Содержание управления в этом случае заключается в создании инфраструктуры развития инноваций (экономической, правовой, информационной и т.д.) и перманентном поддержании ее в состоянии, адекватном существующим социально-экономическим условиям. Это делает актуальной задачу разработки методов и технологий информационного обеспечения управления инновационным развитием, направленных на формирование информационной среды инновационной деятельности, способной аккумулировать информационную составляющую инновационного потенциала региональной экономики и придать необходимый импульс ее инновационному развитию.

Задача создания информационной инфраструктуры развития инноваций не ограничивается простым накоплением все больших и больших объемов информации. Для реализации потенциала инновационного развития необходимы методы и средства обработки информации, направленные на автоматизацию различных аспектов инновационной деятельности, на облегчение и повышение эффективности анализа результативности инноваций. Средством решения задач подобного типа является представление экспертных знаний о предметной области в виде формализованных концептуальных моделей и онтологий, а также имитационное моделирование инновационных процессов. Для этого необходимо создать соответствующие проблемно-ориентированные модели и информационные технологии.

В ходе исследований предложен комплекс методов и технологий [1] формирования открытой расширяемой информационной среды инновационной деятельности, обеспечивающей неявное управление инновационным развитием региональной экономики через создание благоприятных условий для зарождения и развития инноваций и информационную поддержку инновационных процессов на всех этапах их жизненного цикла. Разработаны методы и технологии создания многофункциональной открытой распределенной расширяемой информационной среды поддержки инновационного развития. Информационная среда обеспечивает логическую интеграцию и автоматизированную децентрализованную обработку информационных ресурсов инноваций.

В рамках решения поставленной в работе задачи получены следующие основные результаты.

1. Разработан метод автоматизированного синтеза и оценки эффективности бизнес-структур на основе разнородных неполных и слабо структурированных исходных данных. Синтез осуществляется на базе формализованной концептуальной модели виртуальной бизнес-среды инноваций и описаний инновационных предложений в рамках единого информационного пространства инноваций. Оценка эффективности структуры осуществляется в два этапа. На первом этапе инновационные структуры оцениваются с точки зрения абстрактного показателя целостности, что позволяет автоматически отсеять заведомо бесперспективные варианты. На втором этапе, после доопределения параметров структуры, осуществляется ее оценка с помощью вычислительных моделей экономической эффективности, сроков реализации, надежности входящих в инновационную структуру бизнес-партнеров. Метод позволяет синтезировать инновационные структуры, в том числе при отсутствии точной формулировки цели их создания. Это обеспечивает его применимость на начальных этапах жизненного цикла инноваций, связанных с генерацией инновационных идей.
2. Разработан метод интеграции онтологий разнородных информационных ресурсов с помощью расширяемого общесистемного тезауруса идентификационных атрибутов. Метод лежит в основе предложенной технологии логического объединения семантически и технологически разнородных распределен-

ных информационных ресурсов инноваций. Пополнение тезауруса осуществляется в автоматизированном режиме на основе составной семантической метрики, включающей три оценки: сходство символических имен терминов; структурное положение понятия в онтологии; степень сходства множеств необходимых и достаточных атрибутов. Для разрешения семантических конфликтов, связанных с неоднозначностью трактовки терминов в интегрируемых онтологиях, используется взвешенное отношение ассоциации, вес которого изменяется в ходе использования тезауруса. При достижении весом заданной верхней границы отношение ассоциации преобразуется в отношение синонимии. Если же вес ассоциации снижается до нижней границы, отношение уничтожается. Таким образом, фаза использования тезауруса совмещается с процессом его формирования, что позволяет избежать привлечения экспертов для разрешения семантических конфликтов. Используя семантические связи между понятиями, определенные в тезаурусе, осуществляется трансляция поискового запроса с сохранением семантики в нескольких его вариантах, ориентированных на различные информационные ресурсы. За счет этого предложенный метод позволяет решать проблему различия в семантических представлениях интегрируемых информационных ресурсах. Проблема технологической неоднородности ресурсов решается в разработанной технологии с помощью программных адаптеров ресурсов, осуществляющих необходимые преобразования данных при выполнении запроса.

3. Разработан комплекс методов и технологий, обеспечивающих создание и поддержание функционирования открытой саморазвивающейся распределенной информационной среды инноваций. К ним относятся:
  - технология формирования и поддержки распределенного адресного реестра в одноранговых агентных распределенных системах с неявной иерархической организацией, обеспечивающая децентрализованную реализацию службы каталога;
  - метод децентрализованного регулирования доступа агентов к информационным ресурсам, основанный на механизме доверительных отношений;
  - метод генерализации инновационных предложений и основанная на нем технология формирования виртуальных бизнес-площадок, обеспечивающие повышение эффективности функционирования распределенной агентной среды за счет уменьшения сетевого трафика и нагрузки на узлы системы.
4. Разработана технология дистанционного формирования и управления системно-динамическими моделями инновационной деятельности на базе шаблонов типовых инновационных процессов. Технология обеспечивает повышение показателей доступности и повторного использования средств методической поддержки инновационных процессов за счет распределенного доступа к средствам имитационного моделирования инновационной деятельности и формирования моделей из повторно используемых компонентов, моделирующих типовые элементы инновационных процессов. Модели используются для исследования динамики инновационных процессов в различных областях хозяйственной деятельности региона.
5. Разработаны проблемно-ориентированные программные системы информационной поддержки инновационного развития: система логической интеграции веб-ресурсов инноваций, мультиагентная распределенная система информационной поддержки инноваций [2], система имитационного моделирования диффузии инновационного продукта на базе комплекса системно-динамических моделей инновационной деятельности.

На основе полученных в работе практических результатов сформирована виртуальная бизнес-среда информационной поддержки инновационного развития Мурманской области, развернутая на базе Мурманского регионального инновационного бизнес-инкубатора и некоммерческого партнерства «Технопарк – Апатиты» при поддержке Министерства экономического развития Мурманской области.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-07-00301-а «Разработка информационной технологии и распределенной информационно-аналитической среды поддержки инновационной деятельности»).

1. 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.
2. Маслобоев А.В., Шишаев М.Г. Одноранговая распределенная мультиагентная система информационно-аналитической поддержки инновационной деятельности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 4 (62). – С. 108–114.

**Маслобоев Андрей Владимирович** – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольский научный центра РАН, кандидат технических наук, доцент, докторант, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

**Шишаев Максим Геннадьевич** – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольский научный центра РАН, заведующий лабораторией региональных информационных систем, доктор технических наук, профессор, shishaev@iimm.kolasc.net.ru

УДК 535.317

ДВУХЛИНЗОВЫЕ СКЛЕЕННЫЕ ОБЪЕКТИВЫ С АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Л.Н. Андреев, В.В. Ежова

Рассмотрена методика расчета двухлинзовых склеенных объективов с асферической поверхностью второго порядка. Приведена принципиальная оптическая схема и результаты абберационных расчетов светосильного двухлинзового объектива.

**Ключевые слова:** объектив, асферика, абберации.

Двухлинзовые склеенные объективы находят широкое применение в различных областях приборостроения благодаря простой оптической схеме и оптимальным коррекционным возможностям.

Большой вклад в решение этой проблемы внес Г.Г. Слюсарев, предложивший методику расчета объективов на основе теории аббераций третьего порядка [1]. В дальнейшем в развитие этой методики были разработаны различные вспомогательные таблицы для оптимизации расчетов [1–3]. Однако рассчитанные двухлинзовые склеенные объективы со сферическими поверхностями имеют относительное отверстие, не превышающее  $D/f' = 1:5; 1:4$ , что в ряде случаев является недостаточным. Целью работы являлись разработка методики проектирования и расчет двухлинзовых склеенных объективов с асферической поверхностью второго порядка с увеличенным относительным отверстием до  $D/f' = 1:2,5; 1:2$ .

У двухлинзовых объективов, как правило, исправлению подлежат сферическая абберация, кома и хроматизм положения. Сущность предлагаемой методики заключается в следующем.

В качестве исходной оптической схемы выбирается плоско-выпуклая линза, склеенная из двояково-выпуклой и плоско-вогнутой линз из «хроматической» пары стекол, например ТК14–Ф1 или СТК9–ТФ4. Это объясняется тем, что у плоско-выпуклой линзы из стекол с показателем преломления  $n = 1,6–1,75$ , обращенной выпуклой поверхностью к плоскости предмета, величина  $W$ , определяющая кому ( $\eta$ ), близка к нулю, а величина  $P$ , определяющая сферическую абберацию ( $\Delta y'$ ), близка к минимуму [5–6]. В дальнейшем, вводя асферизацию выпуклой сферической поверхности, добиваемся необходимой коррекции сферической абберации. В случае необходимости путем прогиба компонента добиваемся исправления комы. Хроматические абберации исправляются за счет введения хроматической поверхности склейки [7].

Из условия ахроматизации  $\Phi_1 + \Phi_2 = 1$ ;  $\frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{\Phi_2}{v_2} = 0$ , где  $\Phi_1, \Phi_2$  – оптические силы линз, определяем радиус хроматической поверхности:

$$r_{xp} = -\frac{(v_1 - v_2)}{v} (n - 1) f'_0,$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – коэффициенты средней дисперсии;  $n$  – показатель преломления для средней длины волны стекол;  $f'_0$  – фокусное расстояние объектива. Следует отметить, что хроматическая поверхность не влияет на коррекцию монохроматических аббераций, в том числе и высшего порядка, благодаря чему и удается существенно повысить относительное отверстие объектива [6].

В отличие от классических двухлинзовых склеенных объективов, объективы, рассчитанные по предложенной методике, обладают следующими отличиями:

1. для линз использована хроматическая пара стекол;
2. первая выпуклая поверхность выполнена асферической с уравнением поверхности

$$y^2 = 2r_0 z - (1 - e^2) z^2, \text{ где } r_0 - \text{ радиус кривизны при вершине поверхности; } e^2 - \text{ квадрат эксцентриситета поверхности; } y, z - \text{ координаты асферической поверхности.}$$

Для иллюстрации методики расчета приведены конструктивные элементы и остаточные абберации объектива со следующими характеристиками:  $f' = 100$  мм;  $D/f' = 1:2,5$ ;  $2\omega = 6^\circ$ . Первая поверхность рассчитанного объектива выполнена асферической с  $e^2 = 0,53$ . Оптическая схема рассчитанного объектива представлена на рисунке, конструктивные параметры – в табл. 1. Абберации для точки на оси и главного луча рассчитанного объектива представлены в табл. 2, 3. Обозначения величин в табл. 1–3 соответствуют приведенным в [4].

Таким образом, введение в оптическую схему двухлинзового объектива с асферической поверхностью второго порядка (эллипсоидальной) и использование хроматической пары стекол позволили увеличить его относительное отверстие до  $D/f' = 1:2,5; 1:2$ . Следует отметить достаточно высокую степень коррекции сферической абберации и комы.

Коррекция кривизны поверхности, астигматизма и вторичного спектра у объективов с асферической поверхностью идентична коррекции классических двухлинзовых объективов с относительным отверстием  $D/f' = 1:5$ .

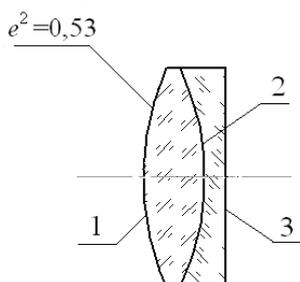


Рисунок. Оптическая схема рассчитанного объектива

Номер поверхности	Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Марки стекол	Показатель преломления	Коэффициенты средней дисперсии
			Воздух	1,0000	
1	68,24	15	СТК9	1,7460	50,00
2	-59,61	5	ТФ4	1,7462	28,00
3	800		Воздух	1,0000	

Таблица 1. Конструктивные параметры объектива

$h$	$\Delta S'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$ , мм	$\text{tg}\sigma' \times 10^2$
20,00	0,003	0,001	0,02	0,19	20,65
17,32	0,006	0,001	0,01	0,09	17,79
14,14	0,006	0,001	0	0	14,45
10,00	0,004	0	0	-0,08	10,16
0	0	0	0	-0,16	0

Таблица 2. Аберрации точки на оси объектива

$\omega$	$y'$ , мм	$z'_m$	$z'_s$	$z'_s - z'_m$	$\frac{\Delta y'}{y'}$ , %	$y'_{F'} - y'_{C'}$ , мм
3°	5,181	-0,46	-0,20	0,25	-0,007	0,003
2°07'	3,663	-0,23	-0,10	0,13	-0,003	0,002

Таблица 3. Аберрации главного луча объектива

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1975. – 639 с.
2. Трубка С.В. Расчет двухлинзовых склеенных объективов. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1984. – 142 с.
3. Русинов М.М. Габаритные расчеты оптических систем. – М.: Госгеолотехиздат, 1979. – 400 с.
4. Вычислительная оптика. Справочник / Под общ. ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.
5. Андреев Л.Н., Громов А.В., Тарасова Л.Г., Олейникова Н.А. Аберрационные свойства тонких линз с асферическими поверхностями второго порядка // Изв. вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 48. – № 5. – С. 55–58.
6. Андреев Л.Н., Стреляева Л.Г. Свойства оптических систем из одинаковых тонких компонентов // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68. – № 7. – С. 27–28.
7. Андреев Л.Н. Прикладная теория аберраций: Учебное пособие. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. – 100 с.

**Андреев Лев Николаевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор.

**Ежова Василиса Викторовна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, [evv\\_foist@mail.ru](mailto:evv_foist@mail.ru)

УДК 621.01

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

В.Л. Ткалич, Р.Я. Лабковская, О.И. Пирожникова

Предложен метод повышения надежности мембранных контактных систем герконов за счет снижения дребезга и динамических шумов, а также увеличения срока службы упругого чувствительного элемента. Предложено конструкторско-технологическое решение мембранного ртутносмачиваемого геркона с модифицируемым регулярным микрорельефом рабочей поверхности мембраны.

**Ключевые слова:** упругий чувствительный элемент, геркон, мембрана, регулярный микрорельеф, магнитный контакт.

Рост требований к датчикам, микросенсорам и коммутационным элементам, в первую очередь – к их метрологическим характеристикам и показателям надежности, делает актуальной проблему повышения качества упругих чувствительных элементов (УЧЭ). Такие важные характеристики микросенсоров и магнитоуправляемых контактов, как быстродействие, механическая устойчивость и вибропрочность, обеспечиваются качеством УЧЭ. Герконы относятся к коммутационным элементам устройств автоматики и находят широкое применение в реле на их основе. Последние широко используются в программных и логических схемах автоматики и телемеханики, в устройствах сигнализации и защиты, взвешивания и управления, в автоматических распределителях в радио-, телефонной и электроаппаратуре [1]. Большой вклад в создание и развитие методов анализа УЧЭ внесли Андреева А.Н., Корсунов В.П., Вольмир А.С., Пановко Я.Г., Рейсснер Э., Хамада М., Фуджита К., Кашима Х. [1]. Однако проблема повышения токов коммутации, а также снижение дребезга контактной системы герконов по-прежнему остается актуальной с точки зрения обеспечения высокой надежности, в том числе увеличения срока службы коммутационных элементов.

Опыт эксплуатации УЧЭ герконов убедительно показывает, что их качество и надежность зависят от характера контактирования сопрягаемых деталей друг с другом или с жидкой фазой (герконы с сухими контактными поверхностями; герконы со смачиваемыми контактными поверхностями, например, ртутью), определяемого состоянием поверхностного слоя контактирующих деталей.

С целью повышения надежности на поверхности УЧЭ магнитоуправляемых контактов (МК) предлагается наносить регулярный микрорельеф (РМР) [2]. Образованный на поверхности УЧЭ РМР создает систему регулярно расположенных зон в поверхностном слое, а зачастую – и во всей толщине УЧЭ. Нанесение частичного РМР II или III вида [2] на поверхности подвижных УЧЭ МК влечет за собой образование непрерывно или дискретно расположенных углублений, между которыми остается нетронутым исходный, чаще всего нерегулярный, микрорельеф обрабатываемой поверхности. С полностью РМР (ПРМР) УЧЭ остаточные напряжения при деформации распределяются равномерно по всему материалу детали, что особенно важно для конструкций мембранных герконов, так как обеспечивается равномерность прогиба мембранного УЧЭ при срабатывании, снимаются напряжения в зонах спая с баллоном МК, возрастает стабильность работы МК. Помимо этого, уменьшается гистерезис, увеличивается жесткость УЧЭ, чувствительность МК, растет число коммутаций в единицу времени и, следовательно, обеспечиваются большой срок службы и повышенное быстродействие МК [1, 3].

В ртутных герконах смачивание контактирующих поверхностей УЧЭ, исключающее вибрацию при замыкании, осуществляется посредством их амальгирования ртутью или периодической подачей ртути на контактирующие поверхности. Применение вибронкатки (ПРМР IV вида) [2] после амальгирования на поверхностях УЧЭ существенно улучшает проникновение и закрепление молекул ртути в толще материала УЧЭ. В случае периодической подачи ртути к месту контакта по полукапиллярам, выполненным на поверхности самих УЧЭ, при замыкании происходит вытеснение ртути из зоны контактирования. Нанесение РМР III вида [2] на поверхности УЧЭ позволит исключить это вредное явление. Особый интерес может представлять абсолютно новый (с точки зрения технологии) геркон, представляющий собой комбинацию конструкций мембранного и ртутного герконов. Предлагается на поверхности мембран для мембранных герконов любого вида сначала наносить ртутную пленку путем амальгирования (центрифугирования), а затем осуществлять вибронкатку, образуя РМР IV вида [2]. В результате, кроме улучшения чувствительности (магнитодвижущая сила срабатывания) и механических характеристик УЧЭ, таких как жесткость, упругость, равномерность прогиба, будет полностью ликвидировано вредное явление дребезга (вибрации) при коммутации МК. Широкие функциональные возможности, повышенная надежность и высокое быстродействие таких герконов делают их весьма перспективными [4].

В мембранных герконах подвижный УЧЭ выполняется в виде мембраны. Эскизы предлагаемых модификаций приведены на рисунке. На рисунке (а) показан мембранный геркон, один из контактов которого выполнен в виде мембраны с перфорацией (подвижный контакт), а другой – в виде ферромагнитного стержня. Магнитная мембрана 1 с круглыми вырезами 2 осуществляет контактирование с магнитным сердечником 3 своим центральным диском под действием магнитного потока в рабочем зазоре 4. Сердечник 3 изолирован от металлического корпуса 5 стеклянным кольцом 6. Мембранный геркон

имеет большую площадь рабочего зазора и, следовательно, меньшее магнитное сопротивление, что увеличивает чувствительность. Мембрана имеет большую площадь контактирования с сердечником, что обеспечивает коммутацию больших токов. Варьированием формы вырезов и размеров можно менять величину прогиба мембраны и чувствительность контакта. Современные технологии позволяют обеспечить величину перемещения мембраны под нагрузкой в упругой зоне на величину порядка  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  м, что обеспечивает очень высокую чувствительность мембранных конструкций. Оба контактных сердечника (КС) имеют полный регулярный микрорельеф рабочей поверхности и в зоне контактирования смазываются ртутью, что существенно улучшает динамические характеристики герконов.

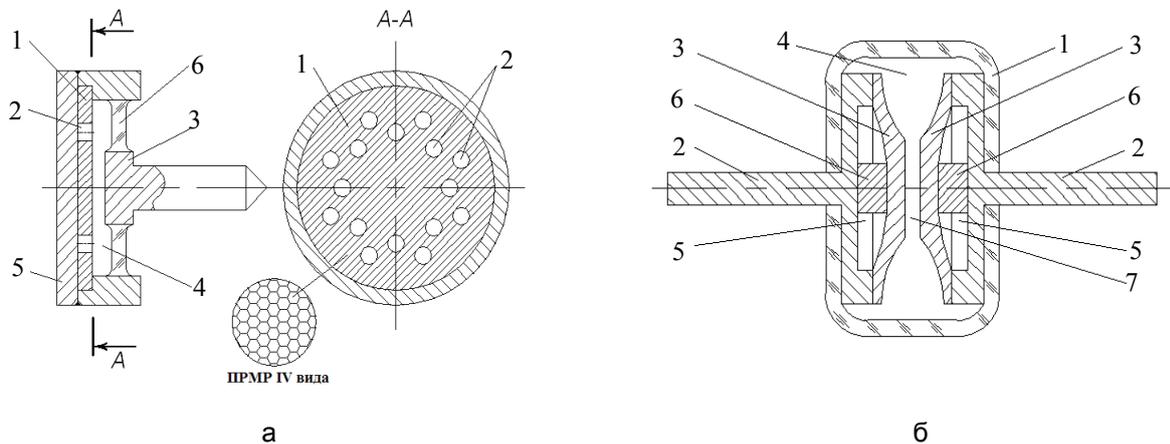


Рисунок. Мембранные герконы: одна мембрана с перфорацией ПРМР IV вида (а); две мембраны с ртутносмазываемыми МК (б)

Вторая модификация мембранного ртутносмазываемого МК, показанная на рисунке (б), предполагает выполнение обоих КС в виде амальгированных ртутью мембран с ПРМР IV вида согласно [4]. На рисунке (б) показаны стеклянный баллон 1 и паянные магнитные сердечники, на которых установлены гофрированные мембраны 3 с РМР рабочей поверхности. Каждая мембрана отделяет от основной полости 4 автономную полость 5, внутри которой установлен немагнитный упор 6. Основная и автономные полости заполнены инертным газом с различным давлением, что способствует, совместно с упором 6, виброустойчивости мембраны 3. Между мембранами 3 задан рабочий зазор 7. Под действием продольного магнитного поля мембраны прогибаются навстречу друг другу и замыкают электрическую цепь. Возможна установка мембраны только на одном магнитном сердечнике, однако чувствительность геркона при этом снижается.

Авторами предлагаются следующие параметры поверхностей с РМР [4]: для поверхностей с ЧРМР – глубина регулярной неровности  $h=16$  мкм; относительная площадь, занимаемая регулярными неровностями,  $F_n=(60-70)\%$ ; угол направления неровностей  $\Theta=50^\circ$ . Для поверхностей с ПРМР – высота элемента поверхности  $R=(10-16)$  мкм, а относительная опорная площадь  $T_p=(60-80)\%$ . При данных параметрах рабочих поверхностей мембранных герконов было достигнуто повышение чувствительности УЧЭ на 5–7% , снижение дребезга, увеличение токов коммутации на 6–8%, что обеспечивает повышение надежности данного вида коммутационных элементов.

1. Ткалич В.Л. Надежность магнитоуправляемых контактов в системах управления. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. – 98 с.
2. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. – Введ.01.07.78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 14 с.
3. Буданова А.Ю., Кокшаров Д.Н. Особенности формирования регулярного микрорельефа на рабочих поверхностях плоских упругих чувствительных элементов электромеханических датчиков // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – Вып. 29. – С. 240–244.
4. Ткалич В.Л., Беккер Я.М., Фролова Е.Г., Шнейдер Ю.Г., Потапов А.И. Магнитоуправляемый контакт. Патент РФ № 2024981. Бюл. № 23, 15.12.94, кл. Н 01 Н 1/66.

**Ткалич Вера Леонидовна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, studsovet\_itmo@mail.ru

**Лабковская Римма Яновна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, studsovet\_itmo@mail.ru

**Пирожникова Ольга Игоревна** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, studsovet\_itmo@mail.ru

# SUMMARY

## OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

### THEORETICAL RESEARCH OF CONCAVE TRANSMISSION HOLOGRAM DIFFRACTION GRATING PROPERTIES

**E. Muslimov**

Theoretical research of novel element properties - transmission concave hologram diffraction grating (TCHDG) is carried out. Possibility of spectrograph construction with flat field on the basis of such grating is shown; expressions for scheme parameters and recording parameters determination are produced. Modeling of a number of such spectrograph schemes is implemented and guidelines for structural parameters choice are worked out on the basis of modeling results.

**Keywords:** transmission concave hologram diffraction grating (TCHDG), aberration function, correction of aberrations, flat field, modeling.

*Eduard Muslimov* – Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, student, ehduard-muslimov@rambler.ru

### DIFFRACTION CONTROL SCHEME OF OBJECT DISPLACEMENTS WITH THE VARIABLE SCALE OF FOURIER SPECTRUM

**V. Nazarov, Yu. Sokolov**

The diffraction control scheme of linear and angular displacements of objects with the variable scale of their Fourier spectrum is investigated. Mathematical model describing amplitude-phase light distribution at the receiving plane is obtained. The experimental results are in agreement with theoretical arguments.

**Keywords:** diffraction, interference, diffraction measurements.

*Viktor Nazarov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, naz\_1946@mail.ru

*Yuri Sokolov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, sokolov-juri@yandex.ru

## PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

### DIFFRACTION OF ONE-PERIOD TERAHERTZ ELECTROMAGNETIC WAVES WITH GAUSSIAN TRANSVERSAL DISTRIBUTION

**A. Ezerskaya, D. Ivanov, V. Bespalov, S. Kozlov**

We obtained new analytic forms for transversal spatial distribution of time spectrum of terahertz waves consisting of only one full cycle of electromagnetic field on the emitter in Fresnel and Fraunhofer diffraction zones and for time-spatial distribution of their field in the Fraunhofer diffraction zone. It is shown that terahertz wave with Gaussian transversal distribution undergoes changes not only in spatial but in time emission structure in the far-field: the wave turns from one-period to one-and-a-half-period near the axe and its spectrum shifts to higher frequencies. The estimates of diffraction zones distances are given.

**Keywords:** terahertz emission, paraxial, Fresnel diffraction, Fraunhofer diffraction.

*Anna Ezerskaya* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, a.a.ezerskaya@gmail.com

*Dmitry Ivanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, dmiry.haxpeha@gmail.com

*Victor Bespalov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Deputy of Department Head for Science, Professor, D.Sc., Professor, victorbepaloff@gmail.com

*Sergey Kozlov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

### ON THE CENTER OF GRAVITY MOVEMENT AND DISPERSIVE SPREADING OF THE INITIAL SINGLE-PERIOD OPTICAL PULSE IN THE TRANSPARENT DIELECTRIC MEDIA

**Yu. Kapoyko, S. Kozlov**

Expressions for the center of gravity movement and dispersive spreading velocities for pulses, consisted of only one full light field oscillation at the wave guiding media input, are obtained. It is shown that for such extremely short regarding to a number of optical pulse oscillations these velocities are directly proportional to dispersive characteristics of a waveguide and inversely proportional to a square of an initial duration of the pulse.

**Keywords** single-period pulses, propagation, dispersion.

*Yury Kapoyko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, kapojko@yandex.ru

*Sergey Kozlov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

### PULSE TERAHERTZ REFLECTOMETER

**V. Bepalov, A. Gorodetsky, Ya. Grachyov, S. Kozlov, Ye. Novosyolov**

Experimental setup and operation principles of pulse terahertz reflectometric spectrograph-intravisor are described. Time forms of reflected THz signal from sandwich medium - CD, diskette and tooth tissue - are received by means of presented setup. Detailed studying possibility of dielectric sandwich medium structure is shown by means of the given method.

**Keywords:** terahertz optics, spectroscopy, holography and tomography, reflectometry.

*Victor Bepalov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-head of a chair, D.Sc., Professor, victorbespaloff@gmail.com

*Andrei Gorodetsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Scientific worker, PhD, gorodetsky@phoi.ifmo.ru

*Yaroslav Grachyov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, grachev\_y@mail.ru

*Sergey Kozlov* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Professor, D.Sc., Professor, kozlov@mail.ifmo.ru

*Yevgeny Novosyolov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, eugene.novoselov@gmail.com

### MECHANICS AND MECHATRONICS

#### WAYS OF INCREASING LOAD CAPACITY AND DURABILITY OF DOMESTIC PLANETARY REDUCERS

**E. Berlova**

The article overviews comparative characteristics of Russian and foreign planetary gear reducers. The paper shows the reasons of low loading capacity of domestic gear reducers; also the article offers the ways and methods for loading capacity increasing and durability.

**Keywords:** gear reducer, loads, precision, satellite, epicycle, stress, torque moment.

*Elena Berlova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, berlova\_@mail.ru

### ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

#### CONDITIONAL CONTROLLED PHASE SHIFT OPERATION FOR QUANTUM STATES OF ELECTROMAGNETIC FIELD

**G. Miroshnichenko, A. Trifanov**

A model of three qubit quantum logical gate of conditional double controlled phase shift is suggested. Quantum unit of information – qubit – is encoded by polarization state of quantum mode of optical cavity. A conditional operator which acts on a field states is obtained. It is shown that this operator works as required phase transformation under the certain conditions with high possibility.

**Keywords:** quantum computations, logical gate, conditional operator, phase transformation, single photon states.

*George Miroshnichenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, gpmirosh@gmail.com

*Alexander Trifanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, alextrifanov@gmail.com

#### OUTPUT CONTROL OF LINEAR PARAMETRICALLY UNCERTAIN OBJECT IN CONDITIONS OF DISTURBANCES AND NEGLECTED DYNAMICS

**A. Bobtsov, S. Shavetov**

The article is a research development published in [1]. In [1] effectiveness analysis of method of consecutive compensator for output stabilization of linear parametric uncertain object working in conditions of neglected dynamics was done. Approach stability of consecutive compensator for disturbances and neglected dynamics is considered.

**Keywords:** output control, neglected dynamics, compensation of disturbances, parametric uncertainty.

*Alexei Bobtsov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Professor, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

*Sergey Shavetov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, r41f.814ck.h4wk@gmail.com

## INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS OF MAGNETIC MEASUREMENTS

**A. Korobeynikov, Yu. Kopytenko, V. Ismagilov**

The intelligent information systems of magnetic measurements developed and applied in Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SPbRC RAS) are considered. The given systems are based on knowledge and represent a complex of program, linguistic and logical-mathematical means for the decision of specific targets in a dialog mode in a natural language.

**Keywords:** intelligent information systems, the forecast of earthquakes, navigation on the magnetic field of the Earth, search of magnetic objects.

*Anatoly Korobeynikov* - Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SPbRC RAS), Deputy director for science, Professor, D.Sc., Professor, Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

*Yuri Kopytenko* – Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SPbRC RAS), Director, D.Sc., Professor, office@izmiran.spb.ru

*Valery Ismagilov* – Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SPbRC RAS), leading scientific employee, PhD, senior scientific employee, IVS@izmiran.spb.ru

## MANY-PARTICLES STATES IN CURVED LAYERED NANOSTRUCTURES

**M. Gavrilov, I. Popov, S. Popov**

Many-particles problem for curved quantum waveguide (layer) is considered. Estimation method of two-particle level in respect to the corresponding one-particle level is described.

**Keywords:** layer, nanostructure, waveguide, hydrogen, particle, eigenfunction.

*Maxim Gavrilov* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, maxim.gavrilov@gmail.com

*Igor Popov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D.Sc., Professor, popov@mail.ifmo.ru

*Sergey Popov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, Serezha.popov@gmail.com

## INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION PORTFOLIO OF ORDERS UNDER EXPERT SYSTEM CONTROL

**S. Gnezdilova**

Correctly balanced portfolio of orders leads to successful development of the enterprise and promotes the terms maintenance fixed by the customer. The article offers an expert system application for portfolio of orders formation of the virtual tool production. Time coefficient of orders performance is the main criterion for portfolio of orders formation.

**Keywords:** tool production, expert system, portfolio of orders, the order execution time, mould cost price.

*Svetlana Gnezdilova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, JSC "TECHPRIBOR", Postgraduate, gnesvetlana@yandex.ru

## SIMULATION MODEL CREATION OF THE ASSEMBLY LINE WITH DELMIA SYSTEM

**E. Alyoshina, A. Salomatina, Ye. Yablochnikov**

Simulation model construction of an assembly line is considered. The importance of functional model working out and its further usage for simulation model creation is shown. The basic advantages of Delmia system are given. Further application of simulation model for computer experiments on operation imitation of a real assembly line is described.

**Keywords:** simulation model, imitating modeling (simulation), functional model, Delmia.

*Ekaterina Alyoshina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, aleshina.ekaterina@gmail.com

*Anna Salomatina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Salomatina.Anna@gmail.com

*Yevgeny Yablochnikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, PhD, Associate professor, eugeniy@bee-pitron.spb.ru

## COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

### REALIZATION OF THE RADIAL BASIC NEURAL NETWORK ON MASSIVE PARALLEL GPU

**N. Matveyeva**

The parallel realization in CUDA technology of the training RBFNN algorithm, based on the sequential correction of centers, widths and weights and on the weights correction using an algorithm for minimizing a quadratic functional of the conjugate gradient method is proposed. Comparison results of the RBFNN training time on different CPU and GPU are given proving parallel realization efficiency.

**Keywords:** Graphics Processing Unit, parallelism, CUDA, massive parallel architecture, radial basic neural network, RBFNN, differential equation.

*Natalya Matveyeva* – Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinsky, Postgraduate, fire\_tger\_705@mail.ru

## NAVIGATION METHOD THROUGH THE TEXT OF THE DOCUMENT BY ITS CONTENT AUTOMATIC PROCESSING

**A. Tabarcha**

This paper describes an approach that can be used as an alternative to automatic text abstracting. The approach is to build representations of the original text and ability to move through its contents with the help of these representations from a broader view to a more concrete representation and vice versa. Submissions are formed on the basis of automatic text processing methods: statistical methods and surface linguistic analysis. This paper gives a formalized approach and considers implementation based on a relational database.

**Keywords:** automatic abstracting, automatic text analysis, automatic terms extraction, statistical methods.

*Alexander Tabarcha* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, a.tabarcha@gmail.com

## CLUSTERS OPTIMISATION WITH THE LIMITED AVAILABILITY OF CLUSTERS GROUPS

**V. Bogatyrev, S. Bogatyrev, A. Bogatyrev**

The structure and number (degree of redundancy) of cluster groups of the various functional bundling providing a minimum system realization cost are defined at given requirements on its reliability.

**Keywords:** cluster, optimization, reliability, server.

*Vladimir Bogatyrev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com

*Stanislav Bogatyrev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, realloc@gmail.com

*Anatoly Bogatyrev* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, ganglion@gmail.com

## PSEUDOREGULAR CODE SCALES FOR DIGITAL ANGULAR TRANSDUCERS

**A. Ozhiganov, P. Pribytkin**

A new type of code scales for digital angular transducers - pseudoregular code scales is suggested. Method for their construction based on the use of composition of nonlinear recurrent sequences and regular binary code scales is considered. An example of pseudoregular code scale construction is given.

**Keywords:** rotary encoder, digital angular transducer, code scale, reading elements, recurrent sequence, pseudoregular code scale, de Bruijn sequence, nonlinear code scale.

*Alexander Ozhiganov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, ojiganov@mail.ifmo.ru

*Pavel Pribytkin* – JSC “Avangard”, Project manager, pavel.pribitkin@gmail.com

## DEVELOPMENT OF INTEGRATED NOISE REDUCTION ALGORITHM IN THE VOICE CHANNEL OF CELL COMMUNICATION SYSTEMS FOR ASIC

**S. Churayev, A. Adamova, T. Paltashev**

The article explores the feasibility of hardware implementation of complex high-speed digital filtering algorithms for voice channel in cell communication systems. For test case we use adaptive noise reduction complex algorithm with embedded discrete fast Fourier transform and Wiener filtering functions.

**Keywords:** Wiener filtering, time domains, frequency domains, clock frequencies, double port RAM, finite state machine.

*Sergey Churayev*– Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, serg\_vhdl@yahoo.com

*Aigul Adamova* – L.N.Gumilev Eurasian National University, doctoral candidate, PhD, aika\_pavl@mail.ru

*Timour Paltashev* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics and Northwestern Polytechnic University, Freemont, California, Professor, D.Sc., Professor, timpal@mail.npu.edu

## MODIFICATION OF AUTOMATA PROGRAMS

**P. Fedotov, O. Stepanov**

The method of automata-based programs modification is described in the paper that allows decreasing the number of changes which may lead to error appearance. The method is based on automata refactoring – sequence of small equivalent modifications keeping behavior. A number of automata refactorings is suggested which extends a list of standard refactorings on automata-based programming case.

**Keywords:** automata-based programming, state machines, modification, refactoring.

*Pavel Fedotov* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, fedotov@rain.ifmo.ru

*Oleg Stepanov* – “IntelliJ Labs”, Ltd., Project manager, PhD, Associate professor, oleg.stepanov@jetbrains.com

## PROBLEMS OF EFFICIENT USE OF NETWORK SERVICES

**A. Dergachev**

We discuss the main problems, which appear on the different steps of using network services such as search, choice and integration. We examine quality parameters, which can be used to compare network services in order

to make the right choice. Finally we present an abstract model that can visually demonstrate interaction of network services.

**Keywords:** network service, problems, model, interaction, service quality.

*Andrei Dergachev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, senior teacher, dam600@gmail.com

#### TECHNIQUE OF DATA ASSEMBLAGE AND PROCESSING, RECEIVED IN 3D SCANNING PROCESS

**V. Tishkin**

Lots of 3D scanning software packages existing for today give wide opportunities for processing data received in the surface registration course. Nevertheless, specificity of the 3D scanning area imposes certain requirements, and all of these programs have number of similar functions which define algorithm of initial work with results of scanning. The general algorithm which is the result of practical long-term author's experience on collection of a "crude" material in a uniform electronic copy and the subsequent processing is offered in the present work.

**Keywords:** scanning, method, surface, copy, 3D model.

*Vitaly Tishkin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, tiviol@gmail.com

### MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

#### MAKING OF PROBES FOR SCANNING PROBE MICROSCOPE FROM GLASS CAPILLARY AND THEIR ATTESTATION

**A. Stovpyaga, G. Frantsuzov**

Scanning probe microscope (SPM) probes based on nanopipettes have been produced. Qualitative characteristics of pipettes have been estimated by test grids scanning and by images from scanning electron microscope.

**Keywords:** scanning probe microscope, nanopipette, micro capillary, scanning electron microscope.

*Alexander Stovpyaga* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, sanja100v@mail.ru

*Grigory Frantsuzov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, grigoryfrants@gmail.com

### INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

#### INFORMATION SECURITY IN CLOUD COMPUTING: PROBLEMS AND PROSPECTS

**M. Becker, Yu. Gatchin, N. Karmanovsky, A. Terentiev, D. Fyodorov**

Common cloud computing model and types of cloud computing services are described. Clouds classification is suggested. Main benefits and security risks of cloud computing use are revealed.

**Keywords:** cloud computing, information security in cloud computing, IaaS, PaaS, SaaS, cloud computing, IT security.

*Michael Becker* – Microsoft Deutschland GmbH, Principal Consultant, mbecker@microsoft.com

*Yuri Gatchin* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, Professor, D.Sc., Professor, gatchin@mail.ifmo.ru

*Nicolay Karmanovsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, karmanov50@mail.ru

*Andrei Terentiev* – Legislative Assembly of Saint Petersburg, Senior Deputy Assistant, 444828@mail.ru

*Dmitry Fyodorov* – Saint Petersburg State University of Engineering and Economics, Assistant, dmitry.yuryevich.fyodorov@gmail.com

### NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

#### LEGO MINDSTORMS NXT FOR TEACHING THE PRINCIPLES OF ADAPTIVE CONTROL THEORY TO STUDENTS

**A. Bobtsov, Yu. Kapitanyuk, A. Kapitonov, S. Kolyubin, A. Pyrkin, S. Chepinskiy, S. Shavetov**

Labware based on Lego Mindstorms NXT technology consisting of several electromechanical systems is described. The units are used both for research and for educational purposes, allowing investigating and comparing different adaptive control and identification algorithms. Some implementation results of theoretical adaptive control algorithms for different mobile robots based on Lego Mindstorms NXT construction set (track-type, wheel and walking robots) and reaction-wheel pendulum-cart systems are presented.

**Keywords:** Lego Mindstorms NXT, adaptive control, mobile robots, mechatronic system, teaching to students.

*Alexei Bobtsov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Professor, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

*Yuri Kapitanyuk* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, yura.kapitanyuk@gmail.com

*Alexander Kapitonov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kap2fox@gmail.ru

*Sergey Kolyubin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research fellow, s.kolyubin@gmail.com

*Anton Pyrkin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research fellow, PhD, a.pyrkin@gmail.com

*Sergey Chepinsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Chepinsky\_S@hotmail.com

*Sergey Shavetov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, r41f.814ck.h4wk@gmail.com

#### METHODOLOGY OF IMMERSIVE LEARNING ENVIRONMENT SIMULATOR DESIGN

**S. Sergeev**

The present article is concerned with certain aspects of complex extreme condition system simulator design. The author presents a new post-classic ergonomic methodology. The learning environment is considered as a special kind of self-organizing autopoietic system in which the user himself is acting as an active creator.

**Keywords:** training simulator, user, ergonomic system, learning environment, autopoietic systems, environment-oriented approach.

*Sergey Sergeev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory Head, PhD, ssfpost@mail.ru

#### ESTIMATION OF THE FINAL OLYMPIC STAGES PARTICIPANTS' NUMBER

**V. Vasilev, T. Kharchenko, V. Klimenko**

Winners' number estimation of the final Olympic stage depending on the pass mark  $p$  is made in the article by means of mathematical statistics methods. Suggested approach can be used by methodical commissions and Olympiad jury while Olympic stages tasks development and the pass mark definition for the final phase. During mathematical approach for mass Olympiad participants' results estimation the data about indexes of task-solving possibility at selection stage, selection stage participants' distribution according the types of the solved problems and taken scores are used.

**Keywords:** mathematical statistics, schoolchildren Olympiads, results estimation criteria.

*Vladimir Vasilev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, Professor, D.Sc., Professor, vasilev@mail.ifmo.ru

*Tatiana Kharchenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, senior teacher, kharchenko@mail.ifmo.ru

*Victor Klimenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, shurup239@gmail.com

#### ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

##### CONCEPTUAL ASPECTS OF BUSINESS INFORMATIZATION CONTROL SYSTEM

**O. Litvinenko**

Modern industrial enterprise in Russia can't work efficiently without active and all-round application of information technologies in business and management. Information technologies adoption, as well as workability of the existing information-technological infrastructure, must be effective. For this reason business informatization control system should be formed. Nowadays there are no complex business informatization control systems taking into account specific character of this branch. This essay observes some conceptual aspects of such system and supposed directions of the further research.

**Keywords:** business informatization, informatization control, IT management, IT control strategy.

*Olga Litvinenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, litvinenkoaa@yandex.ru

##### DEVELOPMENT OF STATE REGULATION OF ENTERPRISE ACTIVITY IN TRADE SPHERE

**R. Lugovskoy**

The structure analysis of the public authorities responsible for policy creation in the sphere of trade is carried out. Perfection of monitoring system and estimation of trade sphere for the further definition of state policy of business development in the given sphere is offered.

**Keywords:** entrepreneurship, trade, governmental regulation.

*Roman Lugovskoy* – Saint Petersburg Institute of Commerce and Economy, Assistant, PhD, rlugovskoy@yandex.ru

#### BRIEF REPORTS

##### CASCADE SCHEME FOR HARMONIC SIGNAL FREQUENCY IDENTIFICATION

**S. Aranovskiy, A. Bobtsov, A. Gorin**

We consider the cascade scheme for the identification of noise disturbed harmonic signal, consisting of in series-connected identifiers and band-pass filters.

**Keywords:** frequency identification, auto tuning of the filter, cascade scheme.

*Stanislav Aranovskiy* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Senior Researcher, PhD, s.aranovskiy@gmail.com

*Alexei Bobtsov* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Professor, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

*Alexey Gorin* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, the\_gorin\_alexey@mail.ru

### **B-SPLINES METHOD APPLICATION FOR CALCULATION OF X-SPLITTERS, MANUFACTURED BY DIFFUSION OF TITANIUM IN THE SUBSTRATE OF LITHIUM NIOBATE**

**V. Serebryakova, G. Deineka**

The numerical method for parameters calculating of the integrated optical elements using a set of Hermitian B-splines is shown. The method is used to determine the technological parameters of manufacturing Ti:LiNbO<sub>3</sub> X-splitters with a given dividing coefficient. A comparison with experimental data is given.

**Keywords:** channel optical waveguide, X-splitter, finite element method, B-splines, dividing coefficient.

*Vladlena Serebryakova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, vladllena@mail.ru

*Gennady Deineka* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, gdeineka@yahoo.com

### **METHODS AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX INFORMATION SUPPORT OF INNOVATION LIFE-CYCLE**

**A. Masloboev, M. Shishaev**

The scientific-methodological foundations for complex information support of regional innovation business management have been developed. A multi-agent peer-to-peer distributed system prototype for information support of innovation life-cycle has been designed.

**Keywords:** information technologies and systems, innovation business, simulation.

*Andrei 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

*Maxim Shishaev* – Establishment of Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Head of Regional Information Systems Laboratory, D. Sc., Professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru

### **TWO-LENS STUCK OBJECTIVES WITH AN ASPHERIC SURFACE OF THE SECOND ORDER**

**L. Andreev, V. Ezhova**

The design procedure of the two-lens stuck objectives with an aspheric surface of the second order is considered. The basic optical scheme and results of aberrational calculations of two-lens objectives, including objectives with the improved correction of aberrations are given.

**Keywords:** objective, aspheric, aberrations.

*Lev Andreev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc.

*Vasilisa Ezhova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, evv\_foist@mail.ru

### **RELIABILITY INCREASE METHOD OF ELASTIC SENSING ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS AND AUTOMATION**

**V. Tkalich, R. Labkovskaya, O. Pirozhnikova**

A method for improving the reliability of membrane contact systems of reeds by reducing the bounce and dynamic noise, as well as increasing the lifetime of the elastic sensing element is proposed. Design and technological solution of the membrane mercury-moisten reed with modifiable regular microrelief of the membrane working surface is suggested.

**Keywords:** elastic sensor, reed switch, membrane, regular microrelief, magnetically controlled contact.

*Vera Tkalich* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, studsovet\_itmo@mail.ru

*Rimma Labkovskaya* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, studsovet\_itmo@mail.ru

*Olga Pirozhnikova* - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, studsovet\_itmo@mail.ru