

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Синтез оптических покрытий с применением генетических алгоритмов

Котликов Е.Н., Шалин В.Б., Тропин А.Н. 1

Математическое моделирование полей деформаций и напряжений в дисковых оптических элементах

Новак А.Г., Трофимов В.А., Шванова М.Л. 5

Оптико-электронная автоколлимационная система инвариантного измерения угла скручивания

Коняхин И.А., Копылова Т.В. 11

Обработка дискретных спектров с помощью алгоритма интегральной аппроксимации

Кривых А.В., Сизиков В.С. 14

Интерференционные металлодиэлектрические светофильтры

До Тан Тай, Губанова Л.А. 19

ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

Особенности синтеза стекол с нанокристаллами хлорида меди

Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширишев П.С. 23

Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски

Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А., 27

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Обеспечение контроля загрязнения атмосферного воздуха несимметричным диметилгидразином

Рогова А.А., Конопелько Л.А. 31

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Построение карт изолиний аномального гравитационного поля Земли на основе метода точечных масс

Яшикова О.М. 35

Прецизионная гироскопическая система подземной навигации

Гордеев Ю.М., Падерина Т.В., Соколов Д.А. 39

для работы в высоких широтах. Основные схемно-конструктивные решения

Коротков А.В. 44

Частотно-временной анализ сигналов малозаметных радиолокационных станций с использованием вейвлет-преобразования

Рыбачек С.Т., Белянский М.А. 48

Основные особенности структуры электромагнитных полей, создаваемых в нижней ионосфере низкочастотными приземными антеннами

Толмачёв В.А., Субботин Д.А. 53

Синтез системы управления электропривода оси сканирования

инфракрасного телескопа

Система и алгоритмы стабилизации болбота

Боргуль А.С., Громов В.С., Зименко К.А., 58

Маклашевич С.Ю.

Бобцов А.А., Боргуль А.С., Зименко К.А., 63

Пыркин А.А.

Алгоритм управления автономным двухколесным мобильным роботом «Мотобот»

КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Повышение быстродействия алгоритма оценки наблюдаемой последовательности

Пинский М.Я., Сироткин А.В., Тулупьев А.Л., 69

в скрытых марковских моделях на основе алгебраических байесовских сетей

Фильченков А.А.

Система мониторинга сигнализации на цифровых сетях телефонной связи

Павловский Е.А. 74

Применение потоковых вычислительных моделей в проектировании

Попов Р.И. 77

специализированных процессоров

Метод исправления ошибок в наборе чтений нуклеотидной последовательности

Александров А.В., Казаков С.В., Мельников С.В., 81

Сергушичев А.А., Царев Ф.Н., Шалыто А.А.

ЛАЗЕРНЫЕ И МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания положений опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме

Жаринов О.О., Жаринов И.О. 85

ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Анализ химических взаимодействий при лазерном маркировании раструба рисунка на узлах гироскопов

Юльметова О.С., Щербак А.Г., Юльметова Р.Ф. 91

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Исследование влияния режимов термообработки на структурно-фазовое состояние сплава 40ХНЮ-ВИ

Яковлева С.А., Щербак А.Г. 96

Организация управления технологической системой автоматизированной линии сборки микрообъектива

Падун Б.С., Рябов М.А. 100

Применение многоагентных технологий для реализации системы управления виртуальным предприятием

Афанасьев М.Я., Саломатина А.А., 105

Технологические методы обеспечения качества изделий

Алёшина Е.Е., Яблочников Е.И. 111

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Модернизация и анализ результатов испытаний сепараторов-пароперегревателей на Ленинградской атомной электростанции

Егоров М.Ю. 115

ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ

Модель региональной экономики на основе социальной стратификации

Фетинина А.И. 120

Интеллектуальный капитал – средство повышения конкурентоспособности в условиях инновационной экономики

Чернышева О.В. 124

Системный кризис экономики и новый методологический подход

Подлесных В.И. 127

к развитию предпринимательских структур

Особенности стратегического управления строительными предприятиями

Цуканова О.А., Егорова А.С. 130

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Вопросы дистанционного преподавания естественнонаучных дисциплин на факультете открытого образования

Калачев Н.В., Ланских А.Н. 135

Автоматизированная система формирования и управления кадровым резервом университета

Горлушкина Н.Н., Колесников Ю.Л., 139

Куркин А.В., Щербакова И.Ю., Филиппова Е.И.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

SUMMARY

145

149



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. Лешикова

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

Телефон / факс (812) 233 45 51

[http: //books.ifmo.ru/ntv/](http://books.ifmo.ru/ntv/)

E-mail: 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 преимуществ (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 полусторонней 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 15.08.2011 Тираж 350 экз. Заказ № 23(75)

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

Optical coatings design by genetic algorithms
Deformation and tension fields mathematical modeling in disk optical elements
Optical-electronic autocollimating system for invariant measurement of the twist angle
Discrete spectra processing by an integral approximation algorithm
Metal-dielectric interference light filters

E. Kotlikov, V. Shalin, A. Tropin 1
A. Novak, V. Trofimov, M. Shvanova 5
I. Konyakhin, T. Kopylova 11
A. Krivykh, V. Sizikov 14
Tan Tai Do, L. Gubanova 19

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

Glass synthesis features with copper chloride nanocrystals
Single excimer laser pulse writing of narrow-band fiber Bragg reflectors by phase mask method

N. Nikonov, V. Tsekhomsky, P. Shirshnev 23
S. Varzhel, A. Kulikov, V. Aseev, V. Brunov, V. Kal'ko, V. Arteev 27

COMPONENTRY AND APPLIANCES OF TECHNICAL SYSTEMS

Control ensuring of air pollution by asymmetrical dimethylhydrazine

A. Rogova, L. Konopelko 31

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

Isoline maps creation of the Earth anomalous gravity field by point masses method
Precision gyroscopic system of underground navigation for work in high latitudes.
The main scheme-constructive solutions
Time-frequency analysis of signals from noticeable radar stations by wavelet transform
Main features of the electromagnetic fields structure generated in the lower ionosphere by low-frequency ground-level sources
Control system synthesis of infrared telescope scanning axis electric drive
System and algorithms of Ballbot stabilization

O. Yashnikova 35
Yu. Gordeev, T. Paderina, D. Sokolov 39
A. Korotkov 44
S. Rybachek, M. Belyansky 48

V. Tolmachev, D. Subbotin 53
A. Borgul, V. Gromov, K. Zimenko, S. Maklashevich 58
A. Bobtsov, A. Borgul, K. Zimenko, A. Pyrkin 63

Control algorithm for autonomous two-wheeled mobile robot «Motobot»

M. Pinsky, A. Sirotkin, A. Tulupyev, A. Filchenkov 69

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

Performance improvement of the estimation algorithm for an observed sequence in hidden Markov models on the basis of algebraic Bayesian networks
Signaling monitoring system for digital telephone networks
Application of data-flow computing models in special-purpose processor design
Errors correction method in the readings set of nucleotide sequence

E. Pavlovskiy 74
R. Popov 77
A. Alexandrov, S. Kazakov, S. Melnikov, A. Sergushichev, F. Tsarev, A. Shalyto 81

O. Zharinov, I. Zharinov 85

LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES

Correlation-extreme method for detection tasks solution and time points estimation of QRS-complexes in an electrocardiogram

O. Yulmetova, A. Scherbak, R. Yulmetova 91

LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES

Chemical reactions analysis in laser marking of raster picture on the surface of gyroscopic details

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION

Research of heat treatment condition influence on Cr-Ni-Al alloy microstructure
Control system structure for microscope automated assembly line
Multiagent technologies application for implementation of virtual enterprise control system

S. Yakovleva, A. Scherbak 96
B. Padun, M. Ryabov 100
M. Afanasiev, A. Salomatina, E. Alyoshina, E. Iablochnikov 105
A. Ivanov, D. Leonov 111

M. Egorov 115

Technological methods of product quality guarantee

THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

Testing results modernization and analysis of separators-superheaters at Leningrad Nuclear Power Plant

A. Fetinina 120
O. Tchernysheva 124
V. Podlesnykh 127
O. Tsukanova, A. Egorova 130

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

Regional economic model based on social stratification
Intellectual capital - a means of competitiveness increasing in the conditions of innovative economy
System crisis of economy and new methodological approach to enterprising structures development
Strategic management features of the building enterprises

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

Remote teaching aspects of natural-science disciplines in the open education department
Automated system for forming and managing of the University personnel reserve

N. Kalachev, A. Lanskikh 135
N. Gorlushkina, Yu. Kolesnikov, A. Kurkin, I. Shcherbakova, E. Filippova 139

BRIEF REPORTS

SUMMARY

145

149

УДК 004.021:535.345.673

**СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

Е.Н. Котликов, В.Б. Шалин, А.Н. Тропин

Представлен новый подход к решению задач проектирования многослойных оптических покрытий с использованием эволюционных стратегий на основе генетических алгоритмов. Предложен способ кодирования альтернативных решений, а также разработаны генетические операторы для реализации простого генетического алгоритма. На примере проектирования 3-, 5- и 7-слойных ахроматических просветляющих покрытий показаны возможности предложенного метода синтеза. Исследованы скорости сходимости процедур от входных функциональных параметров.

Ключевые слова: генетический алгоритм, генетические операторы, оптические покрытия, метод синтеза.

Введение

Функционирование подавляющего большинства современных оптических и оптико-электронных систем невозможно без использования оптических покрытий. Для проектирования многослойных оптических покрытий в основном используется подход, основанный на минимизации оценочной функции – функции качества [1]. Основные трудности при такой постановке задачи конструирования оптических покрытий связаны с многоэкстремальностью функции качества, подлежащей минимизации.

Детальный анализ современного состояния задач, связанных с проектированием многослойных оптических покрытий, показывает, что в настоящее время прослеживается тенденция к разработке таких алгоритмов проектирования, которые не дают единственное квазиоптимальное решение, а находят набор альтернативных решений, с заданной точностью удовлетворяющих требованиям [2]. Затем из полученного набора решений с применением того или иного критерия пригодности выбирается наиболее подходящая структура покрытия. Такими критериями, например, могут служить результаты исследования воспроизводимости спектральных характеристик покрытий [3], анализ устойчивости [4] или результаты так называемого предпроизводственного анализа [5].

Получившие развитие в последнее время генетические алгоритмы (ГА) применяются в задачах многопараметрической оптимизации и проектирования в различных областях науки и техники. Применительно к задачам оптимизации и проектирования, в том числе и оптических покрытий, основное отличие этих методов заключается в том, что в процессе нахождения оптимального решения нет необходимости вычислять производные функции качества, что существенно сказывается на быстродействии и эффективности алгоритмов. Кроме этого, отличительной чертой алгоритмов, в основе функционирования которых лежат эволюционные стратегии и генетические алгоритмы, является то обстоятельство, что на каждом шаге (итерации) уже используется набор (популяция) альтернативных решений. В основе работы генетических алгоритмов лежит моделирование некоторых механизмов популяционной генетики: манипулирование хромосомным набором при формировании генотипа новой особи путем наследования участков хромосомных наборов родителей (кроссинговер), случайное изменение генотипа, известное в природе как мутация. Важным механизмом, заимствованным у природы, является процедура естественного отбора, направленная на улучшение от поколения к поколению приспособленности членов популяции путем большей способности к «выживанию» особей, обладающих определенными признаками.

Задачи исследования заключались в адаптации генетических алгоритмов многопараметрической оптимизации, а также в разработке и исследовании эффективных генетических операторов для решения задач проектирования многослойных оптических покрытий.

Особенности использования генетических операторов при проектировании оптических покрытий

Обычно в структуре данных генетического алгоритма альтернативное решение выражается в виде символического представления – хромосомы. Как правило, хромосома – это битовая строка, однозначно определяющая соответствующее ей альтернативное решение. Каждая хромосома представляет собой набор подкомпонентов, называемых генами. Гены располагаются в различных позициях или локусах хромосомы и принимают значения, называемые аллелями. В представлениях с бинарными строками ген – бит, локус – его позиция в строке, аллель – его значение (0 или 1).

Совокупность хромосом на каждом шаге итерационного процесса представляет собой популяцию (набор) особей – альтернативных решений. Работа ГА представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не сформируется заданное число поколений или какой-либо иной

критерий остановки. На каждой итерации ГА популяция решений подвергается действию построенных специальным образом генетических операторов – селекции, одноточечного кроссинговера и мутации.

В качестве оператора селекции наиболее приспособленных решений был выбран отбор на основе колеса рулетки [6]. Его работа организована следующим образом. Для каждого элемента популяции альтернативных решений вычисляется значение функции пригодности. Для случая проектирования оптических покрытий за численное значение функции пригодности в работе принималась величина функции качества [1]. Затем колесо рулетки разбивается на секторы, количество которых равно числу элементов популяции альтернативных решений. Площадь каждого сектора пропорциональна отношению величины функции пригодности данного элемента к суммарному значению функций пригодности всех элементов популяции. Очевидно, что чем больше величина этого отношения, тем больше площадь соответствующего ему сектора на колесе рулетки.

В работе использовался одноточечный оператор кроссинговера (скрещивания) для последовательной системы кодирования альтернативных решений. Одноточечный кроссинговер работает следующим образом. Сначала у пары родительских хромосом случайным образом выбирается одна из $l-1$ точек разрыва, где l – количество бит в строке, а точка разрыва – это участок между соседними битами в строке. Обе родительские структуры разрываются на два сегмента по этой точке. Затем соответствующие сегменты различных родителей склеиваются, и получаются два генотипа потомков. Так, например, если один из родителей состоит из 10 нулей, а другой – из 10 единиц, то процесс формирования потомков выглядит следующим образом:

Родитель 1	0000000000	000~0000000	→	111~0000000	1110000000	Потомок 1
Родитель 2	1111111111	111~1111111	→	000~1111111	0001111111	Потомок 2

Оператор мутации с некоторой вероятностью изменяет значение гена в хромосоме на любое другое возможное значение. Например, если в хромосоме 1001101010 мутации подвергается ген на позиции 7, то его значение, равное 1, изменяется на 0, что приводит к образованию хромосомы 1001100010. Вероятность мутации обычно очень мала, и именно от нее зависит, будет данный ген мутировать или нет.

Алгоритм и результаты проектирования

Схема предлагаемого алгоритма для проектирования оптических покрытий показана на рис. 1.

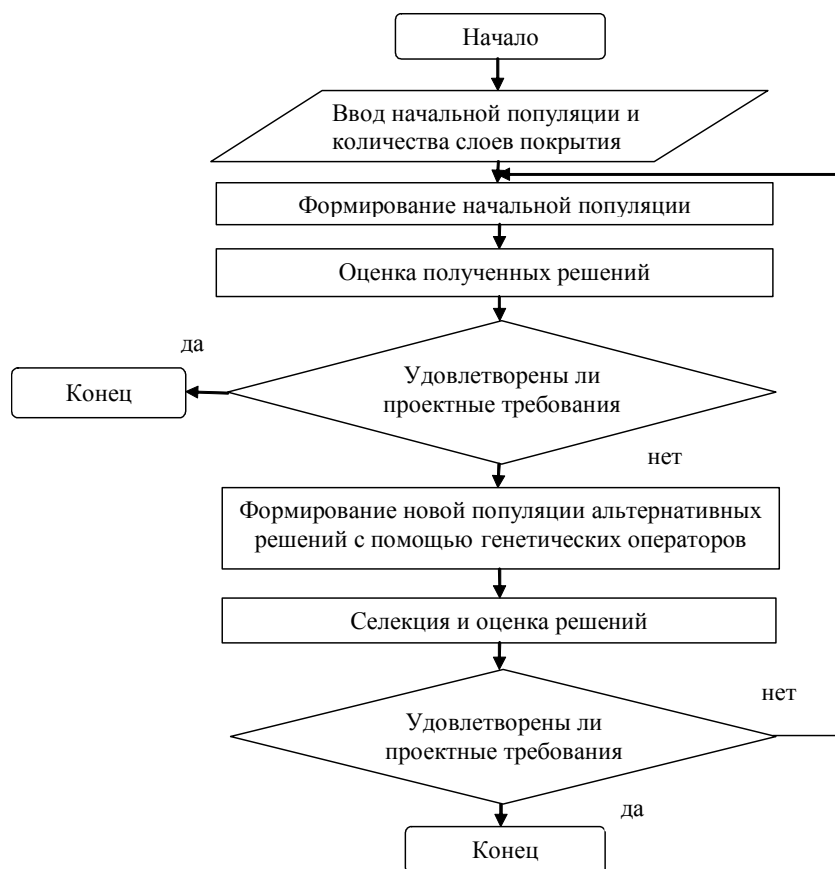


Рис. 1. Алгоритм эволюционного проектирования оптических покрытий

При проектировании оптических покрытий с использованием генетических алгоритмов в работе в качестве переменных величин использовались количества слоев покрытия и толщины для каждого слоя. Количество слоев ограничивается требованиями, предъявляемыми к оптическому покрытию.

Для удобства представления информации об альтернативных решениях пронумеруем слои и соответствующие им толщины слоев, начиная от подложки. Обозначим толщину n -го слоя как d_n . Таким образом, для описания альтернативного решения необходимо кодировать, например, для 5-слойного оптического покрытия 5 чисел.

В последовательной системе кодирования альтернативных решений числа, характеризующие конструкцию оптического покрытия, группируются. Структура хромосомы, описывающей альтернативное решение в последовательной системе кодирования, может быть представлена следующим образом: $d_1 d_2 d_3 d_4 d_5$. Для применения генетических алгоритмов с бинарным кодированием необходимо преобразовать значения параметров в двоичные коды и записать их в соответствующие места хромосомы. Переход из пространства объектов в пространство представлений в работе осуществлялся следующим образом. В зависимости от максимально возможного значения толщина каждого слоя в структуре покрытия кодировалась двоичной строкой – геном длиной 8 бит. Гены последовательно добавлялись друг к другу справа. Таким образом, длина хромосомы альтернативных решений, например, для 3-, 5- и 7-слойных структур составляет 24, 40 или 56 бит соответственно.

Для математического моделирования была выбрана задача проектирования ахроматического просветляющего покрытия. Проектировались 3-, 5- и 7-слойные покрытия с чередующимися слоями с показателями преломления $n_H=1,80$ и $n_B=4,0$ на кремниевой подложке с показателем преломления $n_S=3,50$. При этом требование к спектральной характеристике структуры заключалось в достижении максимального пропускания в спектральном диапазоне от $0,8 \lambda_0$ до $1,2 \lambda_0$, где λ_0 – любая требуемая длина волны в спектральной области прозрачности кремния от 1,3 мкм до приблизительно 8 мкм.

Для реализации простого генетического алгоритма была составлена программа в среде MatLab, реализующая алгоритм, представленный на рис. 1, с использованием которой были спроектированы 3-, 5- и 7-слойные просветляющие покрытия. Поглощение в слоях покрытия и в подложке в рассмотрение не принималось. Толщины слоев покрытий в единицах $\lambda_0 / 4$ представлены в таблице, а их спектральные характеристики отражения, соответствующие случаю полубесконечной подложки, приведены на рис. 2.

№ слоя	n	3	5	7
1	1,8	0,17	0,09	0,22
2	4,0	0,37	0,92	0,33
3	1,8	1,07	0,17	2,11
4	4,0	–	0,64	0,59
5	1,8	–	1,07	0,11
6	4,0	–	–	1,08
7	1,8	–	–	0,98
Функция качества		0,019	0,015	0,012

Таблица. Структуры просветляющих покрытий

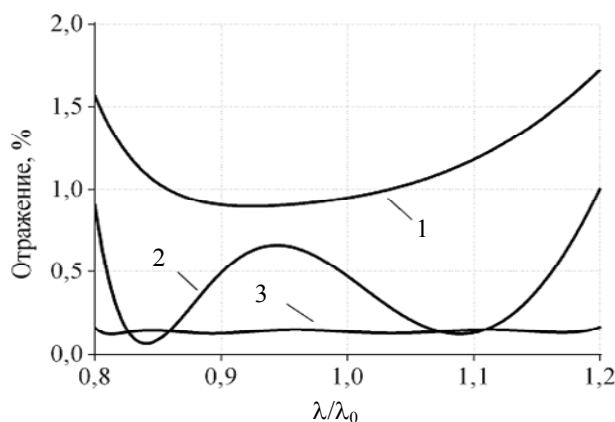


Рис. 2. Спектры отражения покрытий: 1 – 3-слойного; 2 – 5-слойного; 3 – 7-слойного

В работе были исследованы зависимости усредненной функции качества от размера начальной популяции при постоянном количестве итераций, равном 10 (рис. 3), и усредненной функции качества от количества итераций при постоянном размере начальной популяции, равном 20 (рис. 4).

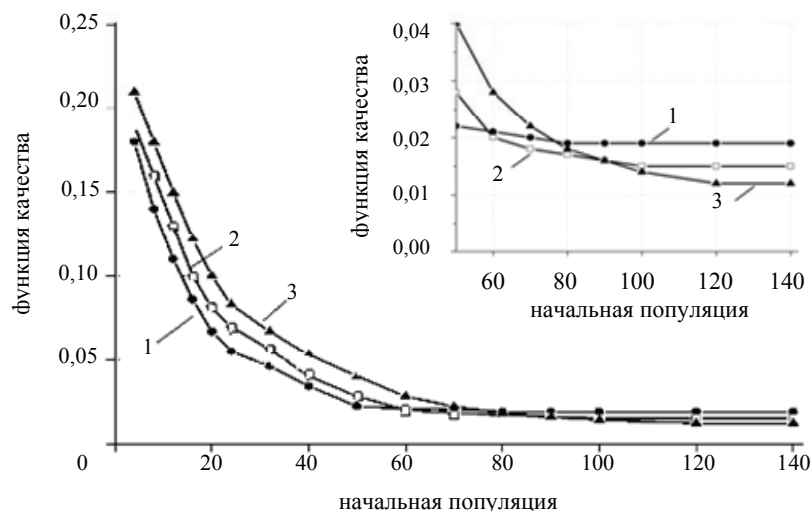


Рис. 3. Зависимость функции качества от размера начальной популяции при постоянном количестве итераций (10 итераций): 1 – 3-слойное покрытие; 2 – 5-слойное покрытие; 3 – 7-слойное покрытие. Вставка на графике показывает в увеличенном масштабе значение функции качества при размерах начальной популяции 50–140

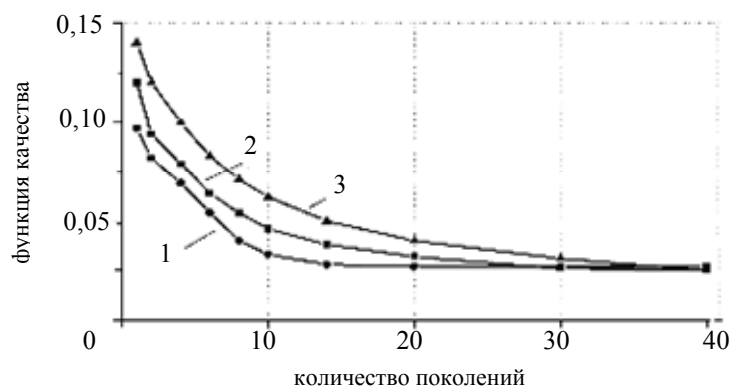


Рис. 4. Зависимость усредненной функции качества от количества поколений (итераций) при постоянном размере начальной популяции (начальная популяция – 20 особей): 1 – 3-слойное покрытие; 2 – 5-слойное покрытие; 3 – 7-слойное покрытие

Анализ зависимости функции качества от размера начальной популяции (рис. 2) показывает, что увеличение размера популяции приводит к уменьшению среднего значения функции пригодности. Это означает, что увеличение размера популяции альтернативных решений при неизменном количестве итераций сопровождается увеличением вероятности отыскания оптимального решения. Для 3-слойного покрытия скорость сходимости алгоритма выше, чем для 5- и 7-слойных покрытий. Это обстоятельство обусловлено наличием меньшего количества локальных экстремумов и, как следствие, большей вероятностью отыскания глобального экстремума. Однако сама величина функции качества оптимального решения тем больше, чем меньше количество слоев в покрытии. В то же время полученные зависимости функции качества от количества итераций показывают (рис. 3), что увеличение количества итераций генетического алгоритма также приводит к уменьшению среднего значения функции качества. При этом видно, что для каждого покрытия есть свое оптимальное количество итераций. Так, например, для 3-слойного просветляющего покрытия достаточно 15 повторений алгоритма, чтобы функция пригодности достигла насыщения, т.е. было найдено оптимальное решение.

Заключение

В работе на примерах конструирования 3-, 5- и 7-слойных ахроматических просветляющих покрытий с применением простого генетического алгоритма продемонстрированы возможности использования эволюционных стратегий поиска и генетических алгоритмов для решения задач проектирования многослойных оптических покрытий. Исследованы зависимости скорости сходимости процедур от размера популяции альтернативных решений и количества итераций. Проведение подобных исследований сходимости рассмотренной поисковой стратегии позволит в дальнейшем построить оптимальным образом соответствующие эволюционные алгоритмы проектирования оптических покрытий.

Дальнейшие изыскания по тематике работы, по всей видимости, будут связаны с разработкой и исследованием новых эффективных генетических операторов кроссинговера и мутации, а также с исследованием символьных моделей отличных от традиционной, например, кодировки на основе рефлексивного кода Грея, позволяющих манипулировать более короткими хромосомными наборами.

Литература

1. Baumeister P. Design of Multilayer Filters by Successive Approximations // J. Opt. Soc. Amer. – 1958. – V. 48. – P. 955–957.
2. Тихонравов А.В., Трубецков М.К. Современное состояние и перспективы развития методов проектирования многослойных оптических покрытий // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 12. – С. 66–73.
3. Балышев К.В., Путилин Э.С., Старовойтов С.Ф. Исследование воспроизводимости выходных параметров многослойных диэлектрических систем во время изготовления // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – № 3. – С. 39–43.
4. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных оптических покрытий // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 3. – С. 60–64.
5. Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K. Computational manufacturing as a bridge between design and production // Applied Optics. – 2005. – V. 44. – № 32. – P. 6877–6884.
6. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1998. – 242 с.

Котликов Евгений Николаевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, ekotlikov@mail.ru
Шалин Валентин Борисович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент, midgard_m11@yahoo.com
Тропин Алексей Николаевич – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат физ.-мат. наук, старший преподаватель, tropal@mail.ru

УДК 535.551

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В ДИСКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

А.Г. Новак, В.А. Трофимов, М.Л. Шванова

Разработана математическая модель полей деформации и напряжений в дисковых оптических элементах, которая позволяет прогнозировать картины интерференции и распределений показателя преломления в плоском элементе оптического диска при механическом воздействии на диск.

Ключевые слова: математическое моделирование, фотоупругость, действие сил, механическое напряжение, картина интерференции.

Введение

Совершенствование оптических прецизионных измерительных приборов и систем связано с учетом особо сложных и тонких эффектов, оказывающих влияние на характер их эксплуатации и результаты измерения. В связи с этим представляет интерес исследование влияния оптической анизотропии, вызванной эффектом фотоупругости, в различных оптических средах. Такого рода проблемы могут возникать, например, в условиях большого диапазона изменения температур в условиях космоса либо в присутствии высоких давлений на больших глубинах океанов. Кроме очевидных экстремальных примеров, эффект фотоупругости может проявить себя при нормальных лабораторных условиях в биологических объектах и в оптических элементах, выполненных из полимеров. Такие разнородные объекты объединяет зависимость их оптических свойств от характера внутренних механических напряжений.

Известно, что наблюдаемый в оптических средах эффект фотоупругости может быть использован как для оценки свойств оптической среды, так и для оценки внешних факторов, влияющих на ее состояние. Зачастую оптические среды обладают значительной чувствительностью к такому эффекту, что объясняет интерес к возможности использования этого свойства для разработки методов исследования оптических сред на основе эффекта фотоупругости.

Локальное неразрушающее определение механических и оптических характеристик оптических элементов способствует качественному изготовлению и оптимальным эксплуатационным характеристикам оптико-электронных приборов различного назначения. Эффект фотоупругости традиционно применяется для нахождения полей деформаций и напряжений в детали или узле конструкции на плоских или объемных прозрачных моделях [1].

Математическое моделирование

В рамках компьютерного моделирования предоставляется возможность экспериментировать с моделями, которые обладают формой и свойствами исследуемых объектов и на которые действуют возможные механические нагрузки. Математическое моделирование особенно предпочтительно при исследовании объектов, натурные испытания которых сложны и дорогостоящи или невозможны. Численное моделирование позволяет установить соответствие между экспериментально наблюдаемым распределением интенсивности света в картине интерференции, полей изоклин и изохром, вызванным наведенной оптической анизотропией при наличии напряженно-деформированного состояния объекта, и факторами, определяющими это напряженное состояние [2].

Не изменяя физическую сущность задачи, для упрощения описания разрабатываемой методики в качестве объекта исследования выберем плоскопараллельный однородный изотропный диск. Поместим диск в декартовой системе координат (рис. 1) таким образом, чтобы его срединная плоскость совпала с плоскостью $z = 0$, а начало системы координат совместилось с центром кругового сечения диска срединной плоскостью. Пусть на пластинку действует n контактных нагрузок с радиальным распределением напряжений. Каждая из сил сосредоточена вдоль одной из образующих цилиндрической поверхности диска. Сила P_i приложена вдоль цилиндрической образующей, которая пересекает срединную плоскость в точке (x_i, y_i) . Для решения задачи моделирования удобно представить пространственное положение точки (x_i, y_i) как в декартовых, так и в полярных координатах. Начало полярных координат совмещено с точкой срединной плоскости O , а полярным углом является угол β_i , отсчитываемый от положительного направления оси O_x против часовой стрелки. В рассматриваемом примере обязательным условием является выполнение требования равенства нулю векторной суммы всех внешних сил и вращательных моментов [3].

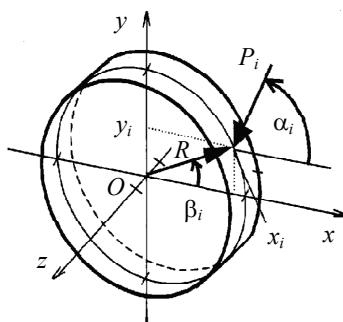


Рис. 1. Представление диска в декартовой и полярной системе координат

Для каждой точки срединной плоскости диска можно определить составляющие напряжений при действии n контактных радиальных нагрузок в результате суммирования (суперпозиции) по i .

Анализ действия одной силы

Пусть сила P_i приложена к диску вдоль цилиндрической образующей, пересекающей срединную плоскость в точке с координатами (x_i, y_i) (рис. 1) [1]. Если полюс (начало) полярных координат поместить в центр кругового сечения диска срединной плоскостью (точка O), а в качестве полярной оси принять положительное направление оси O_x , то полярным радиусом точки (x_i, y_i) будет $R=D/2$, где D – диаметр диска, и полярный угол β_i можно определять следующим образом:

$$\beta_i = \arctg \frac{y_i}{x_i} \quad \text{при} \quad y_i \geq 0;$$

$$\beta_i = \arctg \frac{y_i}{x_i} + \pi \quad \text{при} \quad y_i < 0.$$

Для определения механических напряжений в точке (x, y) необходимо задаться расстоянием d_i между точкой приложения нагрузки в срединной плоскости и исследуемой точкой

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2},$$

а также углом θ_i , который образует направление действия силы и отрезок, соединяющий точку (x_i, y_i) с точкой (x, y) . В этом случае напряжение в точке срединной плоскости диска (x, y) равно

$$\sigma_{ri} = -\frac{2P_i \cos \theta_i}{\pi d_i},$$

где p_i – интенсивность силы в расчете на единицу толщины диска. Представив угол θ_i в качестве полярного и выполнив ряд преобразований систем координат, можно показать, что с каждой внешней силой можно связать локальную систему координат $\eta'_i O'_i \xi'_i$ (рис. 2).

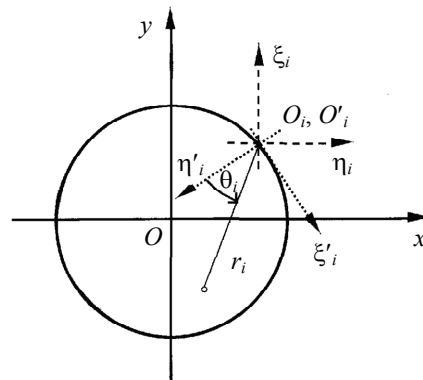


Рис. 2. Локальная система координат

Приложим к диску радиальное распределение нагрузки в виде равномерного растяжения

$$S_i = \frac{P_i}{\pi D} \sin(\psi_{i1} + \psi_{i2}) .$$

Введем в рассмотрение отрезок AB , пересекающий линию действия силы и являющийся диаметром диска, а также второй конец хорды, вдоль которой действует сила, (x'_i, y'_i) . Угол ψ_{i1} – полярный угол θ_i для точки A на круге диска, а угол ψ_{i2} – угол с вершиной в точке (x'_i, y'_i) между линией, вдоль которой действует сила, и отрезком, соединяющим (x'_i, y'_i) с A (рис. 3). Из рис. 3 следует, что для кругового контура действует равенство

$$\psi_{i1} + \psi_{i2} = \frac{\pi}{2} \pm \gamma_i .$$

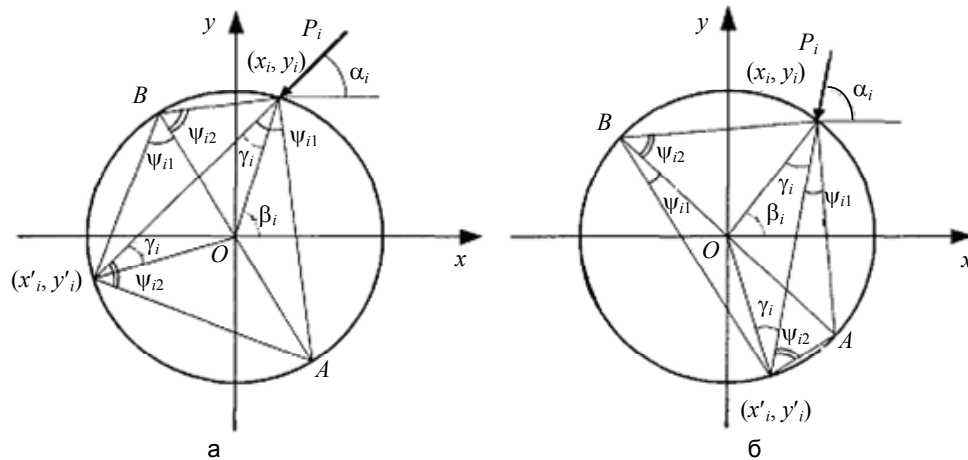


Рис. 3. Равномерное сжатие диска по контуру: а – для случая $\beta_i \geq \alpha_i$; б – для случая $\beta_i \leq \alpha_i$

Равномерное растяжение в каждой точке контура можно привести к виду

$$S_i = \frac{P_i}{\pi D} \cos \gamma_i .$$

Напряженное состояние в точках срединной плоскости диска для случая $x^2 + y^2 < R^2$ будет определяться компонентами напряжений в декартовой системе координат xOy

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xi} &= \sigma_n \cos^2 \theta_i + s_i \\ \sigma_{yi} &= \sigma_n \sin^2 \theta_i + s_i \\ \sigma_{xyi} &= \sigma_n \cos \theta_i \sin \theta_i \end{aligned} \right\} . \quad (1)$$

Анализ действия n сил

Если на контур диска действует n сосредоточенных сил с радиальным распределением напряжений у каждой, то напряжения в любой точке срединной плоскости диска для случая $x^2 + y^2 < R^2$ определяются наложением (суперпозицией) напряжений, которые создала бы каждая из сил:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xi} &= -\frac{2p_i}{\pi d_i} \cos^3 \theta_i + \frac{p_i}{\pi D} \cos \gamma_i; \\ \sigma_{yi} &= -\frac{2p_i}{\pi d_i} \cos \theta_i \sin^2 \theta_i + \frac{p_i}{\pi D} \cos \gamma_i; \\ \tau_{xyi} &= -\frac{2p_i}{\pi d_i} \cos^2 \theta_i \sin \theta_i. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнение (1) может быть преобразовано к виду (2). Таким образом, к сумме радиальных напряжений

$$-\sum_{i=1}^n \frac{2p_i}{\pi} \frac{\cos \theta_i}{d_i}$$

необходимо прибавить равномерное растяжение на контуре

$$\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\pi D} \cos \gamma_i.$$

Для сохранения положения диска необходимо соблюдение условий:

- равенство нулю момента всех внешних сил

$$\sum_{i=1}^n p_i R \sin(\beta_i - \alpha_i) = \sum_{i=1}^n p_i \frac{D}{2} \sin \gamma_i = 0,$$

что равносильно условиям

$$\sum_{i=1}^n M_x = 0; \quad \sum_{i=1}^n M_y = 0,$$

где M_x и M_y – моменты относительно осей O_x и O_y соответственно;

- равенство нулю сумм проекций всех сил

$$\sum_{i=1}^n p_x = 0; \quad \sum_{i=1}^n p_y = 0$$

или

$$\sum_{i=1}^n p_i \cos \alpha_i = 0; \quad \sum_{i=1}^n p_i \sin \alpha_i = 0.$$

Напряженное состояние в точках срединной плоскости диска будет определяться компонентами напряжений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\sum_{i=1}^n \frac{2p_i}{\pi d_i} \cos^3 \theta_i + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\pi D_i} \cos^3 \gamma_i, \\ \sigma_y &= -\sum_{i=1}^n \frac{2p_i}{\pi d_i} \cos \theta_i \sin^2 \theta_i + \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\pi d_i} \cos^3 \gamma_i, \\ \sigma_y &= -\sum_{i=1}^n \frac{2p_i}{\pi d_i} \cos \theta_i \sin^2 \theta_i, \end{aligned} \right\}.$$

Картина интерференции

Уравнение полосы в картине интерференции может быть определено на основании закона Вертгейма, в котором используются значения главных напряжений напряженного состояния. Для случая плоского напряженного состояния геометрическая разность хода определяется в зависимости от главных напряжений σ_1 и σ_2

$$\delta = Ct(\sigma_1 - \sigma_2) = Ct\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}. \quad (3)$$

Здесь C – относительный оптический коэффициент напряжений (коэффициент фотоупругости материала диска); t – толщина пластинки.

Для расчета картины интерференции используем Λ – постоянную, параметр полосы [3]

$$\Lambda = \frac{\delta}{Ct} = \sigma_1 - \sigma_2.$$

Согласно приведенным выше выкладкам получаем выражение

$$\left(\frac{\delta^2}{C^2 t^2} \right) = \left[\sum_{i=1}^n \frac{2p_i}{\pi d_i} \cos \theta_i (-\cos 2\theta_i) \right]^2 + 4 \left[\sum_{i=1}^n \frac{2p_i}{\pi d_i} \sin \theta_i \cos^2 \theta_i \right]^2.$$

Разность фаз равна

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} Ct(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{2\pi}{\lambda} Ct \sqrt{\left(\frac{\delta^2}{C^2 t^2}\right)}, \quad (4)$$

где λ – длина волны света. Интенсивность света на выходе полярископа I в каждой точке экрана будет равна для скрещенного кругового полярископа

$$I_{++} = I_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2} = I_0 \sin^2 \frac{\pi Ct}{\lambda} Ct \sqrt{\left(\frac{\delta^2}{C^2 t^2}\right)}, \quad (5)$$

а для плоского скрещенного полярископа

$$I_{+} = I_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2} \sin^2 2B. \quad (6)$$

В уравнениях (5), (6) I_0 – интенсивность света на входе полярископа (поглощение элементов полярископа не учитываем), а B – угол наклона главных площадок (параметр изоклины).

Изменение показателя преломления по сечению диска на основании формул (3), (4) определяется зависимостью

$$\Delta n = C(\sigma_1 - \sigma_2).$$

Углы наклона главных площадок могут быть определены из равенства

$$\operatorname{tg} 2B = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = 2 \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi d_i} \sin \theta_i \cos^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi d_i} \sin \theta_i \cos 2\theta_i}.$$

Выкладки, аналогичные выводу биполярного уравнения полос (изохром) для диска, сжатого по диаметру двумя сосредоточенными силами, приводят к полному совпадению.

Пространственное распределение анизотропии пластины может быть представлено в виде пространственного распределения разности фаз ортогональных компонент поляризации света, в виде пространственного распределения интенсивности света, компонент напряжений, главных напряжений, изменения показателя преломления.

Результаты математического моделирования

Математическое моделирование осуществлено в системе компьютерной математики Mathcad 2000 PRO. В качестве объекта исследования рассматривается диск, выполненный из полиметилметакрилата ($\sigma_0^{(1,0)} = 20$ МПа), радиусом $R = 20$ мм, высотой $t = 5$ мм. Длина волны зондирующего излучения $\lambda = 546,1$ нм. Шаг расчетных точек – 0,01 диаметра диска.

Математическое моделирование картины интерференции излучения, прошедшего исследуемый образец, выполнено для случаев приложения внешнего механического воздействия, представленных на рис. 4.

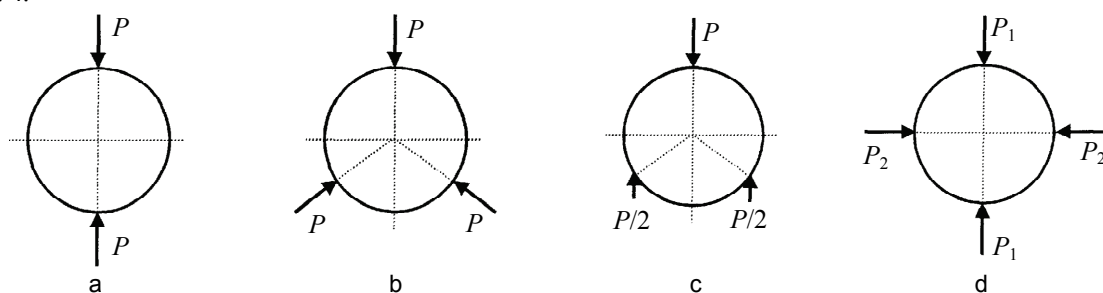


Рис. 4. Схемы приложения к диску внешних нагрузок

На рис. 5 представлен пример расчета для случая приложения двух нагрузок по варианту рис. 3, а, по $P = 100$ МПа каждая. Распределение относительной интенсивности прошедшего образца излучения на выходе скрещенного полярископа (рис. 5, а, б), показывает, что при таком варианте распределения нагрузки в картине интерференции присутствуют четкие полосы до второго порядка включительно. Увеличение нагрузки до $P = 700$ МПа показывает, что в картине интерференции присутствуют четкие полосы до четвертого порядка включительно и наглядно могут быть проанализированы изоклины с параметрами от 0° до 50° с шагом 10° . Количественной оценкой наблюдаемых процессов наведенного двулучепреломления может служить зависимость распределения относительной интенсивности излучения в интерференционной картине вдоль горизонтальной O_x или вертикальной O_y осей, как это показано на рис. 5, в, г, вычисленных для случая рис. 5, а.

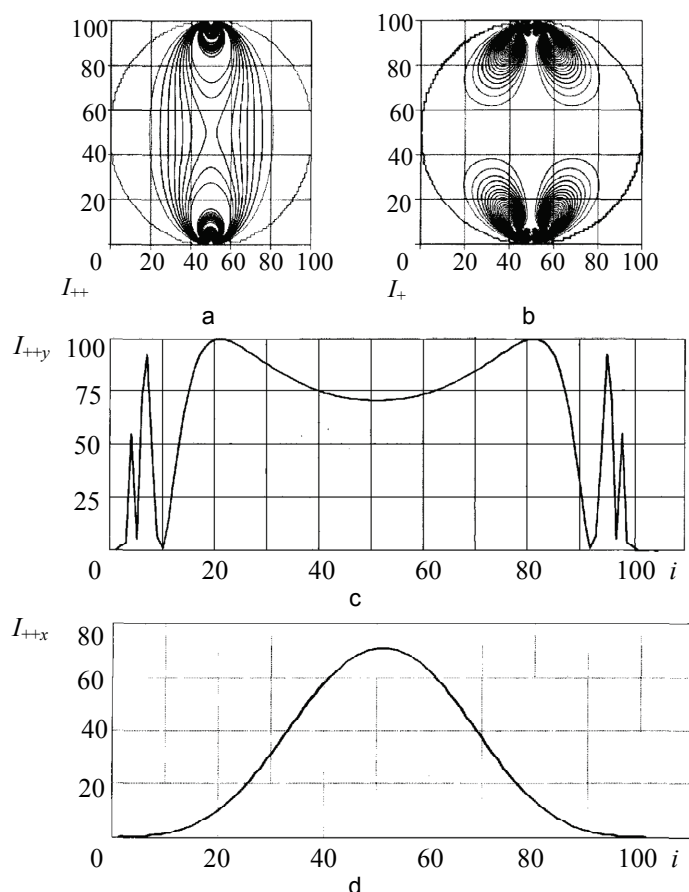


Рис. 5. Распределение относительной интенсивности излучения на выходе поляризатора: кругового (а); плоского (б). Распределение относительной интенсивности в наблюдаемой интерференционной картине вдоль горизонтального диаметра (с), вдоль вертикального диаметра (д)

Заключение

На основе сравнения результатов математического моделирования и регистрации интерференционных картин, полученных экспериментально, можно утверждать, что рассматриваемая математическая модель может быть успешно использована для прогнозирования картин интерференции и распределений показателя преломления в плоском элементе оптического диска.

От классических описаний действия радиальных контактных напряжений на торцы диска приведенная выше методика отличается тем, что она позволяет рассмотреть действие любого количества сил, приложенных вдоль любых образующих цилиндрической поверхности диска и действующих вдоль всех возможных направлений.

Авторы выражают благодарность О.А. Шеломовой за участие в рассматриваемых исследованиях.

Литература

1. Бауэр С.М., Смирнов А.Л., Товстик П.Е., Филиппов С.Б. Асимптотические методы в механике твердого тела: Учебное пособие. – СПбГУ, 2005. – 350 с.
2. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М., 2004. – 272 с.
3. Мостовой Е.Н., Шмырева В.Ф., Никитин А.К. Математическое моделирование изменения величины прогиба решетчатой пластинки после декомпрессионных операций на зрительном нерве // Биомеханика глаза. Сб. трудов конф. – М., 2007. – С. 143–147.

Новак Алексей Григорьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, aleksnovak1987@mail.ru

Трофимов Владимир Анатольевич

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

Шванова Мария Леонидовна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студентка, shvanova@bk.ru

УДК 681.786

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ИНВАРИАНТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ

И.А. Коняхин, Т.В. Копылова

Рассмотрена оптико-электронная автоколлимационная система с тетраэдрическим отражателем, два двугранных угла между гранями которого имеют малое отступление от 90° . Установлено, что такая система, построенная по симметричной относительно оси скручивания схеме хода пучка с дополнительным переотражением, реализует инвариантное измерение угла скручивания к поворотам на коллимационные углы.

Ключевые слова: автоколлиматор, инвариант, угол скручивания, тетраэдрический отражатель, чувствительность измерения угла скручивания.

Введение

Основным направлением развития оптико-электронных автоколлимационных систем измерения углового положения контролируемого объекта является обеспечение инвариантности измерения отдельных угловых координат [1]. Наиболее интересно (перспективно) исследование автоколлимационных систем инвариантного измерения угла скручивания, задаваемого относительно оптической оси объектива автоколлиматора (оси скручивания).

В рассмотренной ранее схеме трехкоординатного автоколлиматора с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания [2] в качестве контрольного элемента используется тетраэдрический отражатель (ТО), у которого два из двугранных углов между отражающими гранями имеют заданное отступление δ от 90° . При отражении такой ТО разделяет падающий по оси пучок автоколлиматора на две пары пучков, одна из которых может использоваться для измерения угла скручивания. Каждый из пучков пары для измерения угла скручивания Θ_3 составляет с осью объектива автоколлиматора угол Δ , который численно равен коэффициенту передачи между углом поворота ТО на угол скручивания и отклонением отраженного пучка от первоначального направления и, соответственно, определяет чувствительность измерения скручивания. Увеличение чувствительности Δ при использовании типового автоколлиматора с малым угловым полем обеспечивается переотражением пучка, реализуемым дополнительным плоским зеркалом. Коллимационные углы измеряются по части пучка, отраженной от фронтальной грани ТО как от автоколлимационного зеркала.

Отраженные ТО пучки строят в фокальной плоскости объектива автоколлиматора изображения марки. При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 относительно осей OX , OY , OZ изображения марки сместятся на величину, пропорциональную углам поворота. Анализ точных выражений для ортов отраженного пучка показал, что практически не обеспечивается инвариантность измерения угла скручивания от одного из коллимационных углов [2]. Таким образом, необходимы исследования путей обеспечения инвариантности измерения угла скручивания при одновременном увеличении чувствительности измерения этой угловой координаты.

Основные положения

Для реализации инвариантного измерения угла скручивания предлагается использовать схему автоколлиматора с переотражением пучка, но при симметричном относительно оси скручивания расположении ортов падающего и отраженного ТО пучков (рисунок) [3].

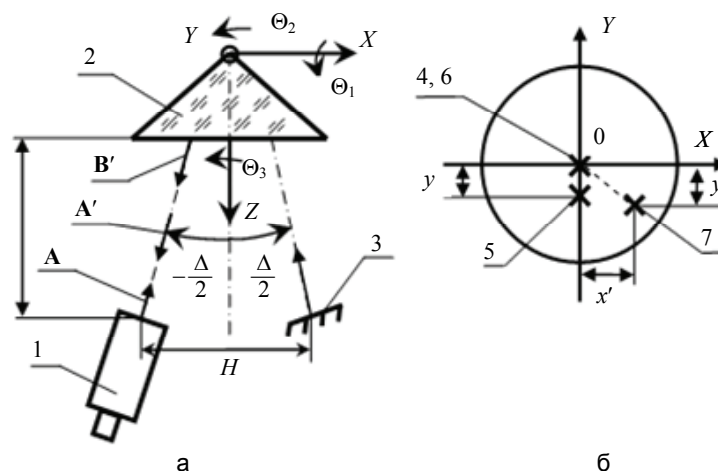


Рисунок. Схема автоколлиматора инвариантного измерения угла скручивания (а): 1 – автоколлиматор; 2 – тетраэдрический отражатель; 3 – плоское зеркало. Изображение марки автоколлиматора в фокальной плоскости приемного объектива (б): 4, 6 – изображения при $\Theta_3=0$, $\Theta_1=\Theta_2=0$; 5 – при $\Theta_3 \neq 0$; 7 – при $\Theta_1 \neq 0$, $\Theta_2 \neq 0$

В такой схеме (рисунок, а) орты падающего и отраженного ТО пучков располагаются по разные стороны от оси скручивания и составляют с ней угол, равный $\frac{\Delta}{2}$. В результате отраженный ТО пучок для измерения угла скручивания минует приемный объектив и после отражения от зеркала 3 направляется вновь на ТО. После повторного отражения от ТО 2 этим пучком на анализаторе автоколлиматора в центре поля зрения формируется изображение 4 марки (рисунок, б). Пройдя аналогичный путь, пучок, отраженный от передней грани ТО как от автоколлимационного зеркала, формирует на анализаторе второе изображение 6.

Величина выноса дополнительного плоского зеркала относительно центра объектива составляет (рисунок, а):

$$H = 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2},$$

где L – дистанция измерений; $\frac{\Delta}{2}$ – угол между нормалью к плоскому зеркалу и осью OZ .

При повороте объекта, с которым связан ТО, на малые углы $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ (рисунок, а) относительно осей OX, OY, OZ изображение 4 сместится на величину $-y$ (относительно центра анализатора), пропорциональную углу Θ_3 (изображение 5 на рисунке, б). Другое изображение 6 сместится на величины $-y', x'$, пропорционально углам Θ_1, Θ_2 (изображение 7). Для представленной схемы (рисунок) орт $\mathbf{B}'$ отраженного пучка по углу скручивания определяется по выражению [4]:

$$\mathbf{B}' = \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

где $\mathbf{M}_\Theta = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{M}_r^{-1}$ – матрица действия ТО, $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -1 + \frac{\Delta^2}{2} & 0 & \mp \Delta \\ 0 & -1 & 0 \\ \pm \Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix}$ – матрица действия ТО при

отсутствии измеряемого угла поворота,

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 - \frac{\Delta^2}{2} & 0 & -\Delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\Delta & 0 & -1 + \frac{\Delta^2}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

– матрица действия плоского зеркала [5]; $\mathbf{M}_r = \begin{bmatrix} 1 & -\Theta_3 & \Theta_2 \\ \Theta_3 & 1 & -\Theta_1 \\ -\Theta_2 & \Theta_1 & 1 \end{bmatrix}$; $\mathbf{M}_r^{-1}$ – матрицы прямого и обрат-

ного преобразований координат, описывающих поворот ТО из исходного в текущее положение и выра-

женных через измеряемые параметры угловой ориентации $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{2} \\ 0 \\ -1 + \frac{\Delta^2}{4} \end{bmatrix}$ – орт падающего

пучка. Орт $\mathbf{A}'$ (рисунок) отраженного пучка от фронтальной грани ТО (измеряются коллимационные углы) определяется по выражению, аналогичному выражению (1), где $\mathbf{M}$ – матрица действия передней грани ТО как плоского зеркала (см. (2) для $\mathbf{M}_3$ при $\Delta = 0$).

Анализ результатов

Для симметричного хода пучка с переотражением по выражению (1) орт $\mathbf{B}'$ (рисунок) отраженного пучка с учетом величин второго порядка малости будет равен

$$\mathbf{B}' = \begin{bmatrix} \Delta \cdot \Theta_1^2 - \frac{3 \cdot \Delta \cdot \Theta_2^2}{2} + \Delta \cdot \Theta_3^2 - \frac{\Delta}{2} \\ -2 \cdot \Delta \cdot \Theta_3 \\ 1 - \frac{\Delta^2}{8} + 2 \cdot \Theta_2^2 - 2 \cdot \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Как следует из выражения (3), по величине составляющей орта B_y , пропорциональной смещению y изображения марки, рассматриваемый отражатель реализует независимое измерение угла скручивания Θ_3 в соответствии с алгоритмом [2]:

$$\Theta_3 = -\frac{B_y}{2 \cdot \Delta} = -\frac{y}{2 \cdot \Delta \cdot f'}, \quad (4)$$

где f' – фокусное расстояние приемного объектива автоколлиматора. В результате анализа выражений (3), (4) для орта регистрируемого пучка установлена инвариантность измерения скручивания от двух коллимационных углов. В соответствии с выражением (1) орт A' отраженного пучка, с учетом величин второго порядка малости равен

$$A' = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta}{2} + 4 \cdot \Theta_2 - \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_2}{2} + 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_1^2 + 3 \cdot \Delta \cdot \Theta_2^2 + \Delta \cdot \Theta_3^2 \\ -4 \cdot \Theta_1 + \frac{\Delta^2 \cdot \Theta_1}{2} - 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_1 \cdot \Theta_2 \\ 1 - \frac{\Delta^2}{8} + 2 \cdot \Delta \cdot \Theta_2 - 8 \cdot \Theta_1^2 - 6 \cdot \Theta_2^2 - 2 \cdot \Theta_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_{x'} \\ A'_{y'} \\ A'_{z'} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Из выражения (5) по величинам составляющих орта $A'_{x'}$ и $A'_{y'}$, пропорциональным смещениям x' и y' изображения марки, рассматриваемый отражатель реализует измерения коллимационных углов Θ_1 и Θ_2 по аналогии с алгоритмом (4):

$$\Theta_1 = \frac{A'_{y'}}{-4} = -\frac{y'}{4 \cdot f'}, \quad \Theta_2 = \frac{A'_{x'}}{4} = \frac{x'}{4 \cdot f'}. \quad (6)$$

Анализ выражений (5), (6) показывает, что в предлагаемой схеме хода лучей измерения коллимационных углов осуществляются с погрешностью, величина которой составляет не более $1,3 \cdot 10^{-5}$ рад при диапазоне измерений в 10 угл. мин ($\Delta = 0,1$ рад), что вполне допустимо для большинства практических применений.

Заключение

В ходе проведенного анализа было установлено, что при автоколлимационных измерениях симметричная относительно оси скручивания схема хода пучка с дополнительным переотражением позволяет обеспечить условия инвариантного измерения угла скручивания при одновременном увеличении чувствительности измерения этой угловой координаты.

Исследования по рассмотренной тематике выполнены при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Коняхин И.А., Тимофеев А.Н., Панков Э.Д., Син Сянмин. Анализ частных инвариантных преобразований в оптико-электронных системах контроля пространственного положения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 5–9.
2. Коняхин И.А., Копылова Т.В. Трехкоординатный оптико-электронный автоколлиматор с увеличенной чувствительностью измерения угла скручивания // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 6 (70). – С. 9–11.
3. Коняхин И.А., Копылова Т.В., Коняхин А.И., Мерсон А.Д. Определение условий соблюдения инвариантности измерения угла скручивания в оптико-электронных автоколлимационных системах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 129.
4. Джабиев А.Н., Коняхин И.А., Панков Э.Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 197 с.
5. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1982. – 237 с.

Коняхин Игорь Алексеевич

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

Копылова Татьяна Валерьевна

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

УДК 535.33+517.615.5

ОБРАБОТКА ДИСКРЕТНЫХ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ
АЛГОРИТМА ИНТЕГРАЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

А.В. Кривых, В.С. Сизиков

Рассматривается обратная задача спектроскопии – восстановление дискретных спектров по измеренному спектру и аппаратной функции спектрометра путем решения системы линейно-нелинейных уравнений алгоритмом интегральной аппроксимации. Приведен численный пример, показывающий, что эффективное решение данной задачи позволяет повысить разрешающую способность спектрометра.

Ключевые слова: обратная задача спектроскопии, система линейно-нелинейных уравнений, алгоритм интегральной аппроксимации, разрешающая способность спектрометра, дискретные спектры.

Введение

Спектральный анализ широко используется для качественного и количественного исследования веществ [1–7]. Он основан на изучении спектров излучения, поглощения, отражения, комбинационного рассеяния света и люминесценции. Области его применения являются физика, астрофизика, томография, металлургия, химия и т.д.

Под спектром $u(\nu)$ подразумевается зависимость интенсивности излучения u от частоты ν . Спектры бывают непрерывные, дискретные, полосатые и комбинированные. Для разложения излучения в спектр и его регистрации используются оптические спектральные приборы [2, С. 703].

Чтобы повысить разрешающую способность спектрометра, а значит, и качество спектрального анализа, можно использовать физико-техничко-коммерческий путь (использовать более совершенный и дорогой спектрометр) или более экономичный математико-компьютерный путь (выполнить обработку результатов измерений).

Целью данной работы является разработка методики и программного обеспечения для обработки дискретных спектров (решения обратной задачи спектроскопии) – восстановления истинного дискретного спектра по измеренному спектру и известной аппаратной функции спектрометра путем решения системы линейно-нелинейных уравнений (часть неизвестных входит в систему линейно, а часть – нелинейно) алгоритмом интегральной аппроксимации в рамках системы MatLab.

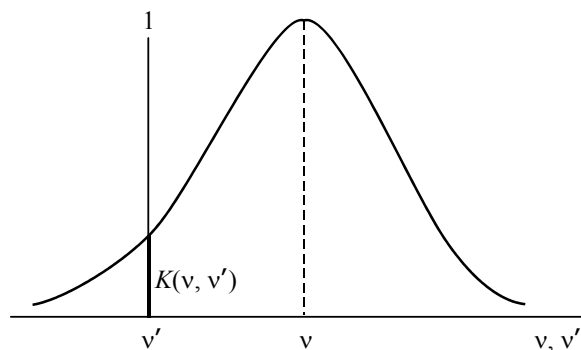
Задача восстановления спектра называется обратной задачей спектроскопии [1, 3, 4, 6, 7] или задачей редукции к идеальному спектру [1, 4, 7] и является одним из вариантов редукционной проблемы Рэлея [4, 7].

Постановка задачи

Измеренный спектрометром (например, интерферометром Фабри–Перо [2, 5]) спектр $u(\nu)$ обычно отличается от истинного спектра $z(\nu)$, во-первых, большей сглаженностью (не разрешены близкие линии – результат воздействия аппаратной функции спектрального прибора $K(\nu, \nu')$ [3–5, 7]), а, во-вторых, зашумленностью (слабые линии «тонут» в шуме – результат случайных погрешностей измерений [1, 3, 4, 7]).

Можно дать следующее определение аппаратной функции [1; 2, С. 704; 4–7]. Аппаратной функцией, АФ (спектральной чувствительностью, функцией пропускания, частотной характеристикой), спектрометра $K(\nu, \nu')$ называется реакция спектрометра (в виде измеренной интенсивности) на дискретную линию единичной интенсивности и частоты ν' при настройке спектрометра на частоту ν .

Фиксируя ν и изменяя ν' , получим некоторую зависимость $K(\nu, \nu')$ в виде кривой (рис. 1). Аналогичные кривые получим для других значений ν . В результате получим двухмерную функцию $K(\nu, \nu')$.

Рис. 1. Зависимость $K(\nu, \nu')$ при некотором фиксированном ν

Чем шире $K(v, v')$, тем более заглаженным будет измеренный спектр $u(v)$ по сравнению с истинным спектром $z(v)$. В случае дискретного спектра, когда искомым спектр $z(v)$ состоит из отдельных почти монохроматических спектральных линий, характеризующихся их частотами и интенсивностями, задача восстановления истинного спектра описывается следующими соотношениями:

$$\sum_{j=1}^n K(v_i, v'_j) z_j + F = \tilde{u}(v_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad c \leq v_i \leq d, \quad (1)$$

где z_j – амплитуда (интенсивность) j -й линии; v'_j – ее частота; n – число линий; v_i – дискретный отсчет частоты настройки спектрометра v ; m – число отсчетов; $[c, d]$ – диапазон частот; $\tilde{u}(v_i) = u(v_i) + \delta u(v_i)$, δu – случайная компонента шума измерений; F – детерминированная компонента шума (фон).

В (1) известны $\tilde{u}(v_i)$, $K(v, v')$, v_i , c , d , m , а искомыми являются z_j , v'_j , n , F . Соотношения (1) образуют систему линейно-нелинейных уравнений (СЛНУ), поскольку часть неизвестных (z_j и F) входит линейно, а часть (v'_j) – нелинейно.

Система (1) может рассматриваться и как система нелинейных уравнений (СНУ) и в этом случае ее можно решать известными методами решения СНУ – методом Ньютона–Канторовича, градиента, хорд, проекций градиента, оврагов и др. [8, 9]. Однако эти методы не учитывают специфику системы (в результате потребуется повышенное компьютерное время и память для ее решения, повысится вероятность появления ложных линий – корней нелинейной системы и т.д.) и оставляют открытым вопрос о числе спектральных линий n .

Для решения системы (1) можно воспользоваться методами, предназначенными для решения СЛНУ, например, методом Прони [10], алгоритмом Пиблза–Берковича [11], алгоритмом Фальковича–Коновалова [12], но они либо ориентированы на специальный тип СЛНУ, либо оказываются весьма неточными, либо являются слишком громоздкими.

Можно использовать так называемый метод переменных проекций (the variable projection method) Голуба–Хегланда–Муллена [13], в котором также решается СЛНУ, однако для отыскания частот используется нелинейный метод (типа Гаусса–Ньютона).

Алгоритм интегральной аппроксимации

Для эффективного решения СЛНУ (1), учитывающего ее специфику, воспользуемся алгоритмом интегральной аппроксимации [4, 7, 14–16], который учитывает особенности этой системы и который уже продемонстрировал свою эффективность в обработке сигналов [15]. Согласно данному алгоритму, реализуется следующая последовательность действий.

1. Решается интегральное уравнение (ИУ) Фредгольма I рода

$$\int_a^b K(v, v') z(v') dv' = \tilde{u}(v), \quad c \leq v \leq d \quad (2)$$

методом регуляризации Тихонова [4, 17] с заниженным значением параметра регуляризации α (это необходимо для разрешения близких линий). В результате будет получено решение $z_\alpha(v')$, в котором могут разрешиться близкие линии, но из-за пониженности α также возникнут ложные флуктуации–линии.

2. В полученном решении $z_\alpha(v')$ на основе дополнительной информации выделяется ограниченное количество ($L \leq N$) наиболее мощных максимумов, причем N задается так, чтобы $N \geq n$, где n – предполагаемое число линий. Фиксируются частоты наиболее мощных максимумов $\tilde{v}'_j$, $j = \overline{1, L}$.

3. Решается уточняющая система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\sum_{j=1}^L K(v_i, \tilde{v}'_j) \tilde{z}_j + \tilde{F} = \tilde{u}(v_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad c \leq v_i \leq d, \quad (3)$$

методом наименьших квадратов Гаусса относительно L , интенсивностей $\tilde{z}_j$ и фона $\tilde{F}$.

4. Оставляются лишь те линии, значения интенсивностей $\tilde{z}_j$ которых преодолели некоторый априори заданный барьер Z (обычно ложные максимумы принимают отрицательные значения или значения, близкие к нулю).

Достоинством алгоритма является то, что наиболее сложная часть задачи – определение значений нелинейно входящих параметров (частот спектральных линий $\tilde{v}'_j$) – решается линейно, а именно, путем решения линейного ИУ (2).

Метод регуляризации Тихонова

Задача решения уравнения (2) является некорректной [3, 4, 7, 17] (если решать уравнение (2), например, методом квадратур, то в качестве решения получим так называемую «пилу» [4, С. 182; 7, С. 205] – крайне неустойчивое решение). Исходя из этого, для его устойчивого решения необходимо применение устойчивых методов, например, метода регуляризации Тихонова [3, 4, 7, 9, 17].

Применительно к интегральному уравнению Фредгольма I рода (типа (2))

$$Ay \equiv \int_a^b K(x, s) y(s) ds = f(x), \quad c \leq x \leq d,$$

метод регуляризации Тихонова сводится к решению интегрального уравнения

$$\alpha y_\alpha(t) + \int_a^b R(t, s) y_\alpha(s) ds = F(t), \quad a \leq t \leq b,$$

где $\alpha > 0$ – параметр регуляризации, а новое ядро и новая правая часть равны

$$R(t, s) = R(s, t) = \int_c^d K(x, t) K(x, s) dx, \quad F(t) = \int_c^d K(x, t) f(x) dx.$$

Численный пример

В рамках системы MatLab7 разработано программное обеспечение для восстановления дискретных спектров, реализующее алгоритм интегральной аппроксимации, а также решен модельный пример [4, С. 89; 7, С. 220].

В нем истинный спектр задавался в виде семи дискретных спектральных линий с амплитудами (в условных единицах) $z_1 = 4,4$, $z_2 = 4,6$, $z_3 = 1,1$, $z_4 = 3,2$, $z_5 = 3,2$, $z_6 = 2,8$, $z_7 = 3,6$ и частотами (также в условных единицах) $v'_1 = 2,28$, $v'_2 = 2,36$, $v'_3 = 2,95$, $v'_4 = 3,02$, $v'_5 = 3,56$, $v'_6 = 3,64$, $v'_7 = 3,69$.

АФ спектрометра задавалась частотно-неинвариантной (ширина K уменьшается с увеличением частоты настройки спектрометра v) функцией

$$K(v, v') = 0,9 \sqrt{\frac{v}{\pi}} \exp\left(-\frac{(v - v')^2}{2\sigma^2(1 - 0,16v)}\right),$$

где $\sigma = 0,05$. Значение детерминированной компоненты шума (фона) было взято $F = 0,2$, а случайная компонента шума измерений имела среднеквадратическое отклонение (СКО) [18], равное 0,05 (2%).

На рис. 2 представлены истинный дискретный (линейчатый) спектр $z(v)$, состоящий из 7 линий, измеренный (экспериментальный) спектр без шума $u(v)$ и с шумом $\tilde{u}(v)$, а также АФ спектрометра $K(v, v')$ на низкой и высокой частотах. Видим, что истинный спектр $z(v)$ содержит близкие линии (две слева, две посередине и три справа), которые в измеренном спектре $u(v)$ не разрешаются.

Применив алгоритм интегральной аппроксимации для восстановления истинного спектра, сначала решаем ИУ (2) методом регуляризации Тихонова при $\alpha = 10^{-6}$. Полученное регуляризованное решение $z_\alpha(v)$ приведено на рис. 3. В нем разрешились все истинные спектральные линии, однако появилось много ложных линий (максимумов).

Взяв в регуляризованном решении $z_\alpha(v)$ первые $L = 12$ наиболее мощных максимумов, решаем уточняющую СЛАУ (3) относительно $L + 1 = 13$ неизвестных (12 амплитуд $\tilde{z}_j$ и фона F) методом наименьших квадратов Гаусса. На рис. 3 отмечены полученные значения $\tilde{z}_j$. Видим, что все ложные максимумы получили отрицательные значения или значения, близкие к нулю (в качестве барьера для отфильтровывания ложных линий использовался порог Z , равный 20% от полученного значения фона F , т.е. $Z = 0,2F$), а истинные максимумы получили значения $\tilde{z}_j$, весьма близкие к точным значениям амплитуд z_j .

В результате можно констатировать, что в модельном примере все 7 спектральных линий разрешились и с приемлемой точностью определились их частоты $\tilde{v}'_j$ и интенсивности $\tilde{z}_j$, причем ни одна линия не потерялась и ни одна ложная линия не появилась, хотя помехо-сигнальная ситуация была выбрана специально сложной, чтобы продемонстрировать возможности алгоритма интегральной аппроксимации.

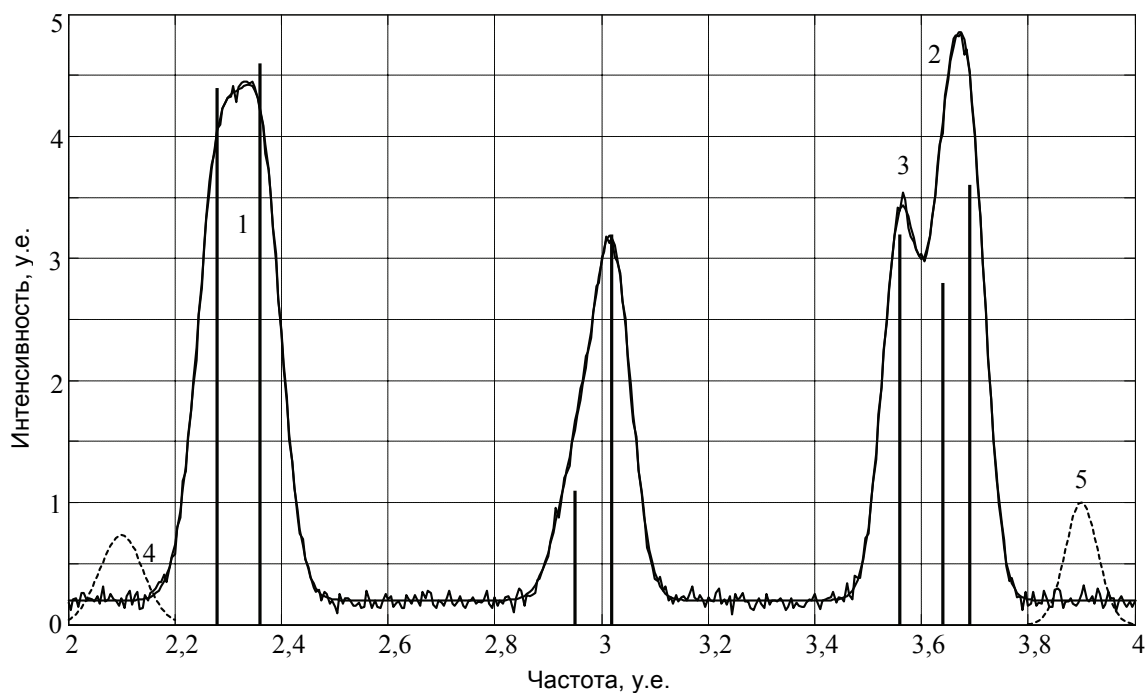


Рис. 2. Численный пример. Прямая задача. По оси абсцисс – частота ν , по оси ординат – z , u , $\tilde{u}$ и K (в условных единицах): 1 – истинный дискретный спектр $z(\nu)$; 2 – заглаженный спектр $u(\nu)$; 3 – заглаженный и зашумленный спектр $\tilde{u}(\nu)$; 4 – $K(2,1,\nu')$ – АФ на низкой частоте; 5 – $K(3,9,\nu')$ – АФ на высокой частоте

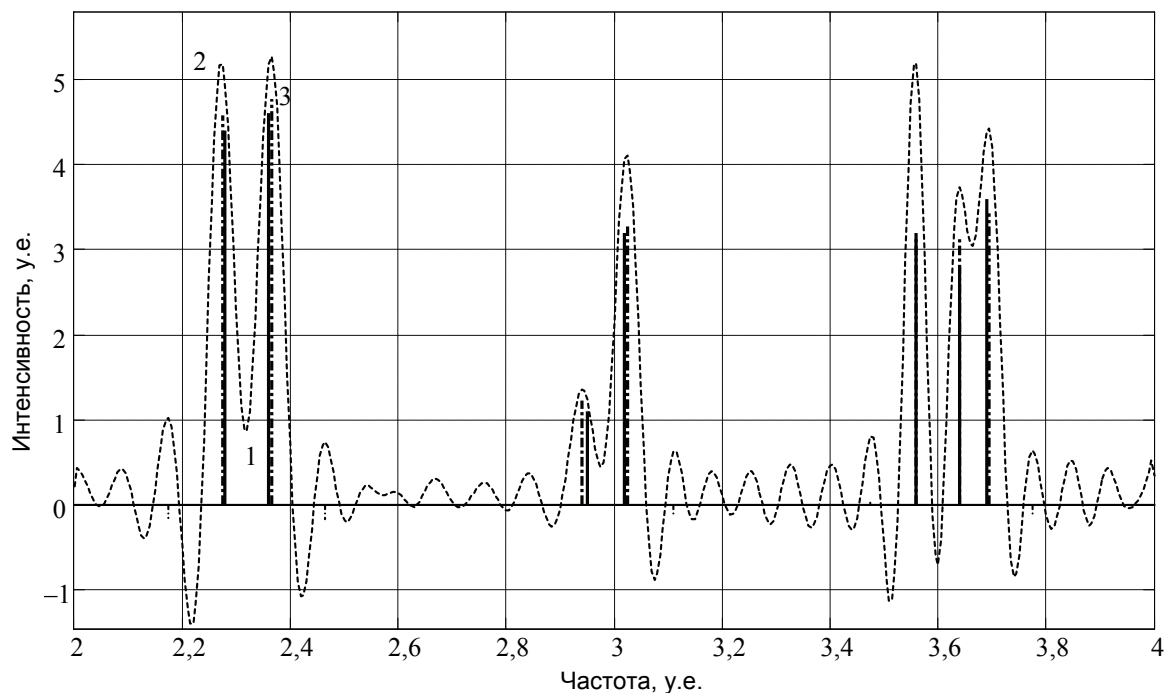


Рис. 3. Численный пример. Обратная задача. По оси абсцисс – частота ν , по оси ординат – z (в условных единицах): 1 – истинный спектр $z(\nu)$ (вертикальные сплошные линии); 2 – регуляризованное решение $z_\alpha(\nu)$ (пунктир); 3 – восстановленный спектр $z_j(\nu)$ (вертикальные штрих-пунктирные линии)

Заключение

Решение модельных примеров демонстрирует большие возможности и высокую эффективность примененной методики. В результате имеет место повышение разрешающей способности спектрометра, а, значит, и качества спектрального анализа (разрешение близких линий, выделение слабых линий из шума и т.д.) путем математико-компьютерной обработки спектров. Спектрометр может быть состыкован

с компьютером с заложенным в него программным обеспечением или дополнен специализированным вычислительным устройством, реализующим рассмотренный алгоритм обработки спектров. При этом можно использовать несовершенный (и недорогой) спектрометр, но за счет математико-компьютерной обработки получить практически столь же качественные результаты, как с помощью более совершенного (и более дорогого). Под термином «более совершенный» подразумевается спектрометр с более узкой аппаратной функцией, что позволяет разрешать близкие и (или) слабые линии в спектре без его математической обработки.

Следует отметить, что примененный алгоритм решения обратной задачи спектроскопии в случае дискретных спектров является универсальным и может быть использован для восстановления заглаженных и зашумленных спектров в различных областях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 09-08-00034).

Литература

1. Раутиан С.Г. Реальные спектральные приборы // Успехи физических наук. – 1958. – Т. 66. – Вып. 3. – С. 475–517.
2. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 944 с.
3. Кочкиков И.В., Курамшина Г.М., Пентин Ю.А., Ягола А.Г. Обратные задачи колебательной спектроскопии. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 204 с.
4. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. – СПб: Политехника, 2001. – 240 с.
5. Ландсберг Г.С. Оптика: Учебное пособие для вузов. – 6-е изд. – М.: Физматлит, 2006. – 848 с.
6. Сизиков В.С., Кривых А.В. Использование способа моделирования при решении обратной задачи спектроскопии методом регуляризации // Изв. вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – № 9. – С. 44–51.
7. Сизиков В.С. Обратные прикладные задачи и MatLab. – СПб: Лань, 2011. – 247 с.
8. Химельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.
9. Гончарский А.В., Черепашук А.М., Ягола А.Г. Численные методы решения обратных задач астрофизики. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
10. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа (обзор) // Труды Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон. – 1981. – Т. 69. – № 11. – С. 5–51.
11. Пиблз, Беркович. Многолучевой моноимпульсный радиолокатор // Зарубежн. радиоэлектроника. – 1969. – № 10.
12. Фалькович С.Е., Коновалов Л.Н. Разрешение неизвестного числа сигналов // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27. – № 1. – С. 92–97.
13. Mullen K.M., van Stokkum I.H.M. The variable projection algorithm in time-resolved spectroscopy, microscopy and mass spectrometry applications // Numerical Algorithms. – 2009. – V. 51. – № 3. – P. 319–340.
14. Сизиков В.С. О моделировании некоторых некорректных задач с использованием принципов подобия // Электрон. моделирование. – 1981. – № 6. – С. 3–8.
15. Сизиков В.С. Обобщенный метод редукции измерений. I, III // Электрон. моделирование. – 1991. – Т. 13. – № 4. – С. 7–14; № 6. – С. 3–9.
16. Верлань А.Ф., Сизиков В.С., Мосенцова Л.В. Метод вычислительных экспериментов для решения интегральных уравнений в обратной задаче спектроскопии // Электрон. моделирование. – 2011. – Т. 33. – № 2. – С. 3–12.
17. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. – Киев: Наукова думка, 1986. – 544 с.
18. Дайнеко М.В., Сизиков В.С. Восстановление смазанных под углом и зашумленных изображений без учета граничных условий // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 28–32.

Кривых Александр Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, krivykh1987@mail.ru
Сизиков Валерий Сергеевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, sizikov2000@mail.ru

УДК 621.383.4

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВЕТОФИЛЬТРЫ

Тан Тай До, Л.А. Губанова

Представлена методика поиска оптимальной конструкции металлодиэлектрического интерференционного светофильтра и факторы, влияющие на спектральные характеристики металлодиэлектрического интерференционного светофильтра.

Ключевые слова: светофильтр, фильтр Фабри–Перо, металлодиэлектрический фильтр.

Введение

Узкополосные металлодиэлектрические светофильтры находят свое применение в различных отраслях науки и техники: в медицинских приборах, принцип действия которых основан на анализе структуры биологического материала на заданной длине волны; в экологических устройствах, оценивающих состав атмосферы по пропусканию одной или нескольких длин волн, в пищевой промышленности, когда анализ качества продукции основывается на анализе спектра отраженного излучения; в точном приборостроении; в фотолитографии; в приборах наблюдения; и т.д.

Основная проблема разработки конструкции и изготовления металлодиэлектрических светофильтров заключается в том, что в литературе:

- практически отсутствует методика выбора конструкций светофильтров, которая позволила бы создавать светофильтры с заданными характеристиками (максимальным коэффициентом пропускания на заданной длине волны, полушириной и контрастностью);
- нет данных о влиянии отклонений в параметрах слоев, формирующих светофильтр, на его эксплуатационные характеристики.

В работе рассмотрена возможность создания программы проектирования структуры металлодиэлектрических светофильтров с оптимальной конструкцией, а также анализ влияния конструкции металлодиэлектрического фильтра (толщины слоев металла и диэлектрика, показатели преломления и коэффициенты поглощения, формирующих светофильтр) на его выходные характеристики (полуширину, значения максимального пропускания, положения длины волны в максимуме).

Теоретический анализ

Узкополосные металлодиэлектрические светофильтры строятся на основе интерферометра Фабри–Перо, схематически их конструкции можно изобразить в следующем виде (рис. 1): зеркало – разделительный слой – зеркало – подложка (З – Р – З – П). В качестве зеркала чаще всего используются тонкие слои одного из двух металлов – серебра для видимой и инфракрасной области и алюминия для ультрафиолетовой области [1] спектра, разделительный слой формируется из диэлектрического материала, прозрачного в рабочей области спектра. Иногда, для защиты фильтра от воздействия окружающей его среды, он заклеивается между двумя стеклянными пластинами.

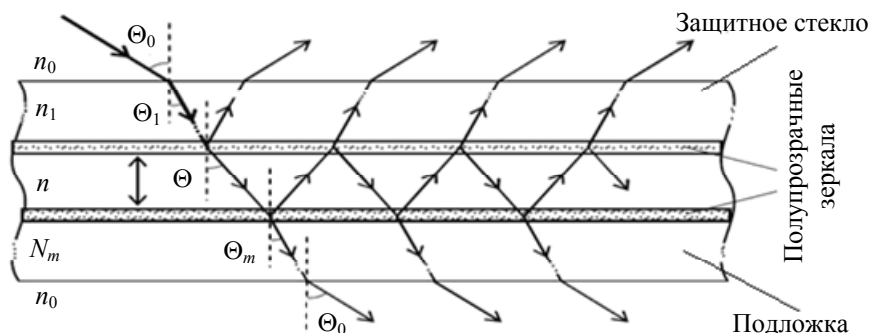


Рис. 1. Схема узкополосного интерференционного фильтра

Длина волны в максимуме, согласно [2], определяется следующим выражением:

$$\lambda_{\max} = \frac{2nd \cdot \cos \theta}{k - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\pi}},$$

где k – порядок фильтра; n и d – показатель преломления и геометрическая толщина разделительного слоя; ρ_1 и ρ_2 – скачки между падающим и отражающим пучками на границах между первым и вторым зеркалами с разделительным слоем; θ – угол преломления в разделительном слое, если свет падает на фильтр нормально к ее поверхностям, то $\theta = 0$. Максимальное пропускание равно [2]

$$T_{\max} = \frac{T_p \cdot T^2}{(1 - T_p \cdot R)^2},$$

где T_p – коэффициент пропускания разделительного слоя $T_p \approx 1$; T, R – коэффициенты пропускания и отражения зеркала.

$$T_{\max} = \frac{T^2}{(1 - R)^2}.$$

Минимальное пропускание равно [2]:

$$T_{\min} = \frac{T^2}{(1 + R)^2}.$$

Контрастность фильтра равна

$$C = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \left(\frac{1 + R}{1 - R} \right)^2.$$

Когда в зеркале присутствуют потери, что вызывается наличием поглощения в металле, $T + R \neq 1$. Величина, которая определяется выражением $A = 1 - (T + R)$, называется коэффициентом поглощения.

$$T_{\max} = \left(1 + \frac{A}{T} \right)^{-2}.$$

Существенной характеристикой фильтра является полуширина, которая определяется следующим образом [2]:

$$\delta\lambda_{0,5} = \frac{\lambda_{\max} \cdot (1 - R)}{[k\pi - (\rho_1 + \rho_2)] \cdot \sqrt{R}}.$$

Анализируя последнее выражение, можно сделать вывод, что полуширина фильтра тем уже, чем выше коэффициент отражения зеркал, формирующих фильтр (R), порядок фильтра (k), чем больше скачки фаз между падающим и отражающим пучками при отражении от зеркальных покрытий.

Более подробную информацию о терминологии, используемой в определении узкополосных фильтров можно найти в [1–5]. В настоящей работе для определения толщины металлического слоя зеркала используется «метод подбора». Суть метода состоит в том, что необходимо выбрать такую толщину металлического слоя, формирующего зеркало, при которой коэффициент отражения зеркала стремится к максимальному значению, а коэффициент пропускания зеркала стремится к минимальному значению, но не равен нулю.

Факторы, влияющие на характеристики интерференционных фильтров

В работе представлено несколько разработанных авторами методов поиска оптимальной толщины металлических слоев, формирующих светофильтр, толщины разделительного слоя и его химического состава. Особое внимание при поиске оптимальной конструкции светофильтра отводилось учету влияния скачка фаз на границе металл–диэлектрик. Все поиски осуществлялись при наличии дисперсии пленкообразующих материалов.

Поиск указанных величин базировался на анализе и обобщении данных по использованию различных структур фильтрующих покрытий, характерных для приборостроения, численных методах определения выходных параметров интерференционных металлодиэлектрических светофильтров, методах оптимизации конструктивных параметров металлодиэлектрических светофильтров по структуре и выходным параметрам.

Влияние толщины металлического слоя зеркала на характеристики фильтра. Из рис. 2 видно, что увеличение толщины металлического слоя зеркала приводит к увеличению максимального коэффициента пропускания и к сужению полуширины. Положение длины волны в максимуме почти не изменяется.

Влияние показателя преломления подложки на характеристики фильтра. На рис. 3 представлены спектральные зависимости коэффициента пропускания фильтра одной конструкции при их формировании на подложках с разным показателем преломления. Как видно из рисунка, с увеличением показателя преломления подложки коэффициент максимального пропускания уменьшается, полуширина незначительно сужается, положение длины волны в максимуме не изменяется.

Влияние показателя преломления разделительного слоя на характеристики фильтра. На рис. 4, 5 показано влияние на максимальное пропускание (рис. 4, а), полуширину (рис. 4, б) и положение $\lambda_{\max}$ (рис. 5) показателя преломления разделительного слоя (n_p) фильтра. С увеличением показателя преломления разделительного слоя максимальное пропускание падает, полуширина сужается, положение длины волны в максимуме смещается в длинноволновую область спектра при следующих параметрах

конструкции фильтра: $d_{Ag} = 48$ нм; показатель преломления подложки $n = 1,45$; толщина разделительного слоя $d_p = 305$ нм.

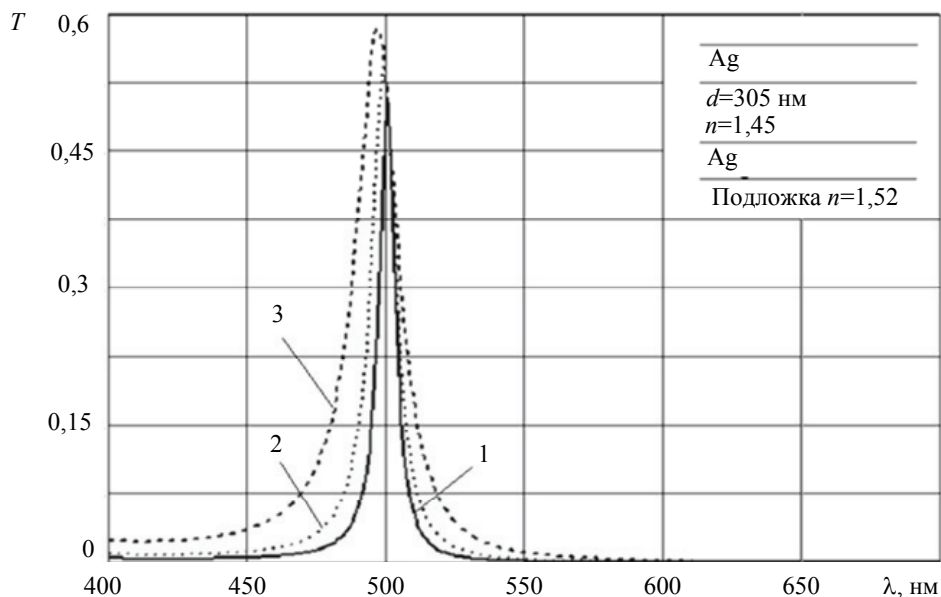


Рис. 2. Спектральные характеристики фильтров при различных толщинах металлического слоя, формирующего зеркало: 1 – 54 нм; 2 – 48 нм; 3 – 40 нм

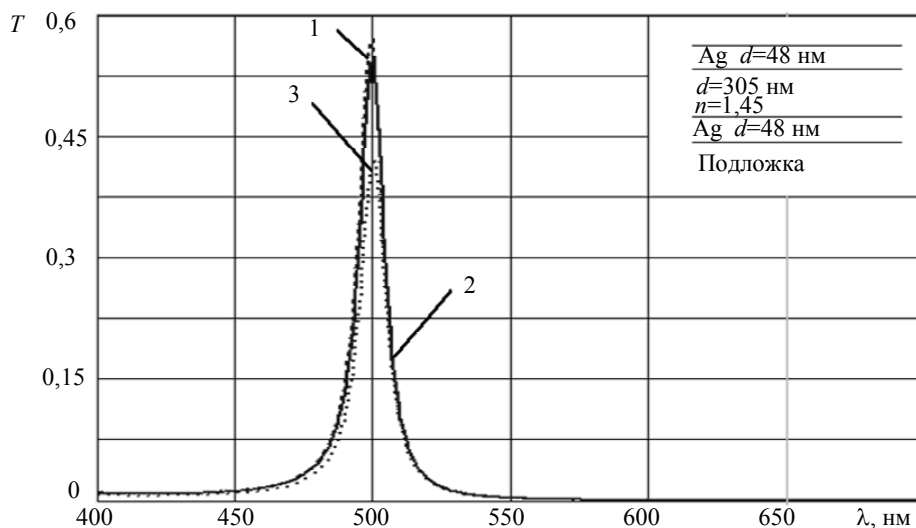


Рис. 3. Спектральные характеристики фильтров, сформированных на подложках с разным показателем преломления: 1 – $n_{подл}=1,45$; 2 – $n_{подл}=1,52$; 3 – $n_{подл}=1,95$

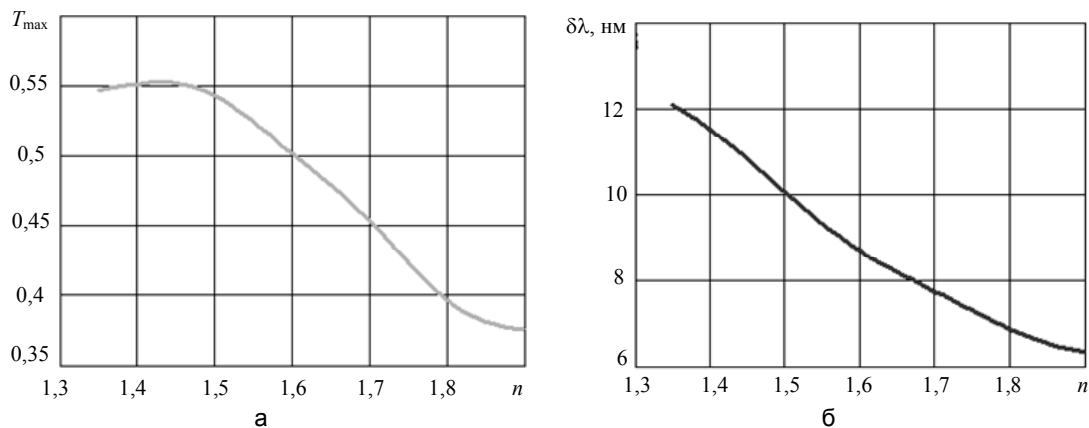


Рис. 4. Зависимости максимального пропускания (а) и полуширины (б) от показателя преломления разделительного слоя

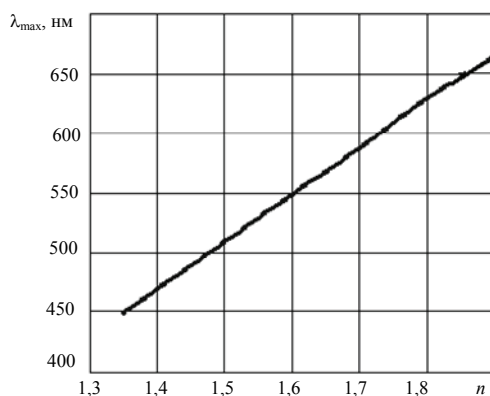


Рис. 5. Зависимость $\lambda_{\max}$ от показателя преломления разделительного слоя

Результат исследований

В результате проведенных исследований была выбрана конструкция светофильтра ($d_{\text{Ag}}=48$ нм, подложки с $n=1,45$, толщина разделительного слоя $d_p=305$ нм, $n_p=1,45$), которая обеспечивает $T_{\max}=58\%$ на $\lambda_{\max}=500$ нм с полушириной $\delta\lambda=10$ нм. Спектральная характеристика такого фильтра представлена на рис. 6.

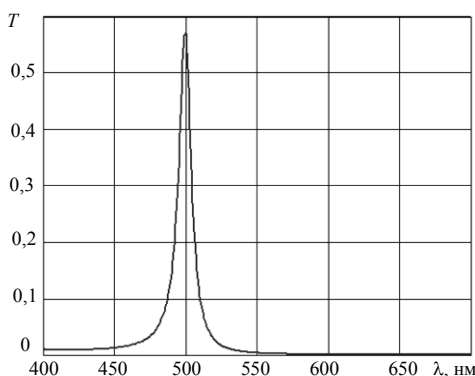


Рис. 6. Спектральная характеристика узкополосного фильтра на основе серебра

Заключение

Представленный в работе анализ влияния конструкций металлодиэлектрических светофильтров на его выходные параметры показал, что определяющим параметром является коэффициент отражения зеркал, формирующих светофильтр, т.е. толщина слоя металла и его природа. Структура подложки, состав разделительного слоя менее критичны при формировании металлодиэлектрического узкополосного фильтра. Отклонения толщин слоев, формирующих светофильтр, и их показателей преломления от расчетных в процессе формирования покрытий существенно искажают спектральное распределение коэффициента пропускания получаемого покрытия. Разработка методики корректировки толщины слоев в процессе изготовления светофильтров с целью получения заданных выходных параметров позволит получать светофильтры с заданными характеристиками.

Литература

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 223 с.
2. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. – М.: Высшая школа, 1966. – 555 с.
3. Путилин Э.С. Оптические покрытия. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 199 с.
4. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
5. Macleod H.A. Thin Film Optical Filters. – 4th ed. – Tucson: CRC, 2010. – 772 p.

До Тан Тай

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, tantaido@yahoo.com

Губанова Людмила Александровна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, la7777@mail.ru

УДК 666.221.6

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА СТЕКОЛ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ
ХЛОРИДА МЕДИ

Н.В. Никоноров, В.А. Цехомский, П.С. Ширшнев

Рассмотрены основные проблемы технологии получения нанокристаллов хлоридов меди в стеклах и способы их решения. Найдены оптимальные технологические режимы и составы для выделения кристаллической фазы CuCl в стеклах с калиево-алюмооборатной матрицей. Полученные стекла не обладают фотохромизмом и имеют высокое пропускание в видимой области спектра.

Ключевые слова: фотохромизм, термообработка, нанофаза, CuCl .

Введение

Известно, что излучение УФ диапазона даже при относительно малых интенсивностях является вредным для органов зрения человека. Материал, имеющий высокое оптическое поглощение в ближней УФ области спектра и не имеющий полос поглощения в видимом диапазоне, являлся бы оптимальной защитой от УФ излучения. На сегодняшний день такой материал может быть полезен в системах защиты органов зрения людей, работающих в горах, на обширных водных пространствах, в аэропортах, оптических лабораториях, в военно-полевых условиях и т.д.

Сегодня для защиты от воздействия излучения ближнего УФ диапазона на органы зрения существует широкий набор оптических фильтров. Большинство этих фильтров, в том числе стекла с нанокристаллами CdS и CdSe (стекла серии ЖС [1]), имеют окраску в видимой области спектра (рис. 1), что связано с большой дисперсией по размерам этих кристаллов при термической обработке, а также экситонной природой их полос поглощения.

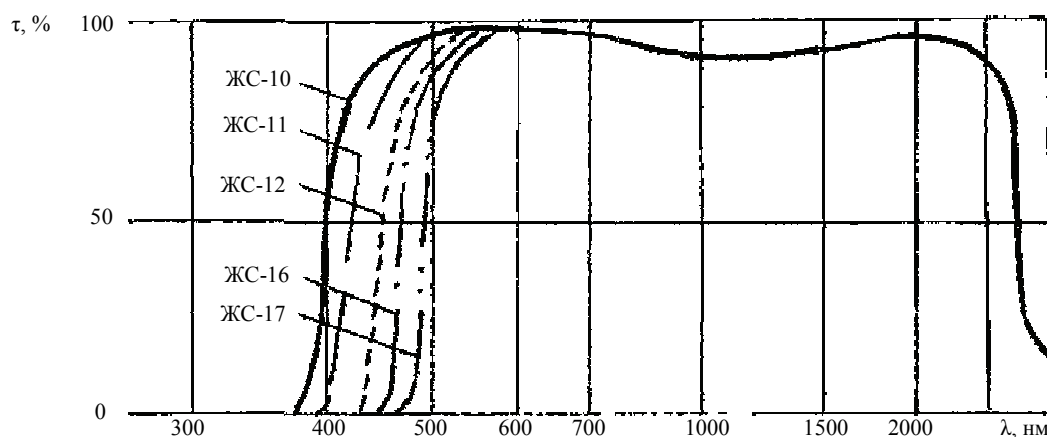


Рис. 1. Спектры пропускания УФ фильтров

Следует отметить, что материалом, обладающим большим поглощением в ближней УФ области спектра и при этом не имеющим полос поглощения в видимом диапазоне, является кристалл CuCl .

Стекла с нанокристаллами CuCl на основе натриевоборосиликатной стеклообразной матрицы были разработаны в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (промышленная марка ФХС-7) [2]. Эти стекла расширили линейку сереброросодержащих фотохромных стекол (ФХС-2, ФХС-4, ФХС-6). Следует отметить, что стекло марки ФХС-7, как и серия сереброросодержащих стекол, обладает фотохромизмом, т.е. при воздействии излучения ближнего УФ и видимого диапазона, в зависимости от интенсивности, в нем наводятся центры окраски, которые снижают оптическое пропускание в видимом диапазоне. Причины эффекта фотохромизма объясняются реакцией «диспропорционирования» соединения CuCl [3, 4]. Этот эффект сильно зависит от температуры обработки, при которой происходит выделение фазы, обогащенной CuCl , а следовательно, от температуры стеклования T_g матричного натриевоборосиликатного стекла. Также следует отметить, что встречаются задачи, когда надо защитить органы зрения или зрительные приборы только от УФ излучения, при этом в видимом диапазоне наведение УФ излучением центров окраски в таких фильтрах не желательно.

При переходе от натриевоборосиликатной к калиево-алюмооборатной матрице можно ожидать исключения эффекта фотохромизма [3–5]. Известно, что в калиево-алюмооборатной матрице существует

благоприятная для выделения нанофазы область составов в стекле, в частности, в этой матрице выделены нанокристаллы ферритов [5]. В связи с этим целью настоящей работы явилось исследование возможности выделения нанокристаллов CuCl в калиево-алюмооборатной матрице и изучение спектральных свойств медьсодержащего стекла, в котором эффект фотохромизма не проявляется.

Методика эксперимента

Для получения нанокристаллов CuCl в стекле необходимо решить несколько ключевых технологических задач. Естественно, что в исходном стекле до термообработки уже должны содержаться компоненты кристалла CuCl – ионы одновалентной меди и хлора. Известно, что ионы меди могут существовать в трех различных состояниях – в металлическом виде (степень окисления 0), в одновалентном и двухвалентном. Достаточно легко получить в расплаве стекла металлическую форму или двухвалентную форму. В первом случае необходимо сместить редокс-потенциал системы в сторону восстановления, во втором – в сторону жестких окислительных условий. Одновалентная медь является промежуточным состоянием и требует создания мягких восстановительных условий в расплаве.

Исходя из вышесказанного, первой технологической задачей является оптимизация и поиск путей создания необходимых мягких восстановительных условий в расплаве стекла при варке. При термообработке стекла возможно, чтобы при оптимальных условиях выделялась нанофаза, содержащая CuCl. Исходя из вышесказанного, второй технологической задачей является поиск оптимальных режимов термической обработки.

Синтез стекол проводился в корундовых тиглях при температуре в 1350°C. Мешка проводилась кварцевой мешалкой в течение 2 ч со скоростью 1–2 оборота в секунду. Выработка осуществлялась в металлические формы с последующим инерционным охлаждением в муфельной печи от 400°C. Нижняя температурная граница термической обработки определялась с помощью измерений температуры стеклования на дифференциальном сканирующем анализаторе PerkinElmer STA 6000. Термообработки проводились в программируемых муфельных печах. Идентификация кристаллов CuCl в стекле проводилась с помощью измерения спектров экситонного поглощения на спектрофотометре Cary Varian 500 для образцов толщиной 1 мм.

Результаты и обсуждение

Составы стекол, в которых была получена фаза CuCl, приведены в таблице. Помимо основных компонентов матрицы, все остальные составляющие вводились сверх 100%.

При увеличении содержания калия уменьшалась химическая устойчивость стекла, что визуально наблюдалось как появление налета спустя 2–3 часа после контакта стекла с водой. Содержание алюминия по возможности не увеличивалось, так как известно, что чем выше процент алюминия, тем выше температуры варок и стеклования.

Номер состава	1	2	3
K ₂ O	20 мол%	20 мол%	20 мол%
Al ₂ O ₃	25 мол%	25 мол%	25 мол%
H ₃ BO ₃	55 мол%	55 мол%	55 мол%
Cu ₂ O	5 вес %	5 вес %	5 вес %
NaCl	7,5 вес %	7,5 вес %	7,5 вес %
SnO ₂	0,5 вес %	0,5 вес %	0,5 вес %
Sb ₂ O ₃	1 вес %	1 вес %	1 вес %
Na ₃ AlF ₆	2,5 вес %	2,5 вес %	2,5 вес %
NH ₄ H ₂ PO ₄	5 вес %	10 вес %	15 вес %

Таблица. Составы синтезированных стекол

Ключевым в создании необходимых окислительно-восстановительных условий в расплаве являлось наличие восстановителя в составе стекла дигидрофосфата аммония NH₄H₂PO₄. При вводе других восстановителей, таких как сахар, кристаллическая фаза CuCl не выделялась.

В стеклах указанного выше состава при варьировании NH₄H₂PO₄ от 10 до 15 вес.% сверх 100% при термообработке было получено выделение кристаллической фазы CuCl. При 5 вес.% NH₄H₂PO₄ фаза CuCl не выделялась (рис. 2).

Температура термообработки была определена, исходя из данных термообработки стекла с идентичным составом без добавок оксида меди и NaCl. Измеренная температура стеклования составила 400°C с погрешностью 10°C. Соответственно, оптимальный интервал термообработки был принят от 400°C до 420°C. Как известно из [2], характеристические пики CuCl расположены на длинах волн 384 нм

и 365 нм, что отчетливо видно в спектрах поглощения для стекол с концентрацией восстановителя в 10 и 15 вес.% (рис. 2). При концентрации восстановителя в 5 вес. % (стекло 1) фаза CuCl не выделялась.

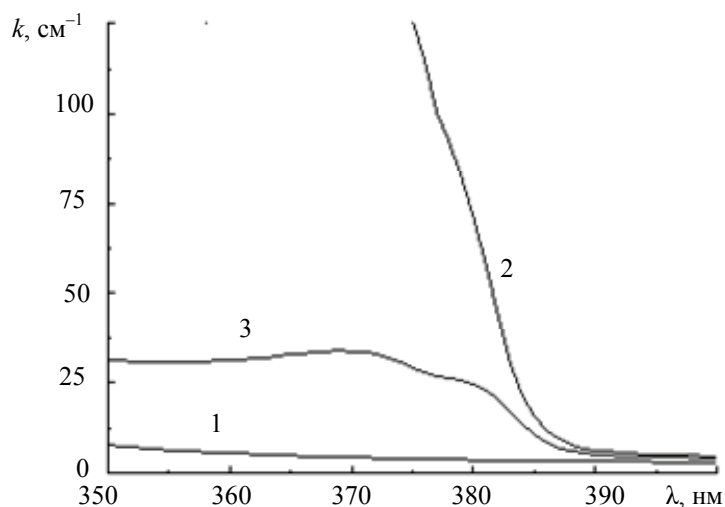


Рис. 2. Зависимость интенсивности экситонного поглощения CuCl от концентрации дигидрофосфата аммония в составе стекла. Режим термообработки - 412° в течение 10 час

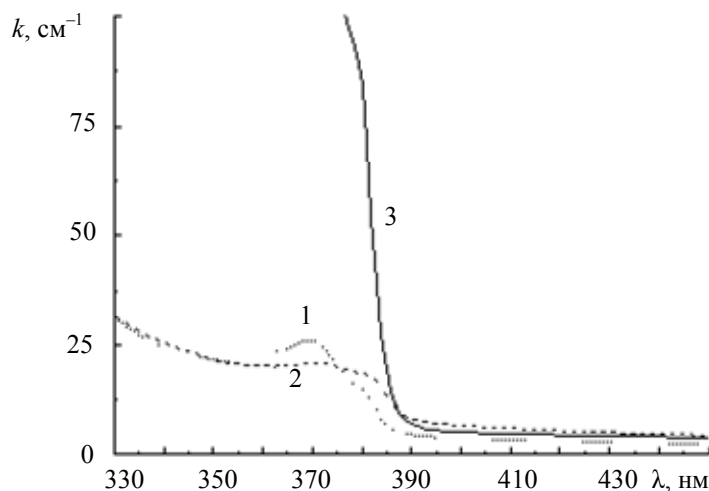


Рис. 3. Зависимость интенсивности экситонного поглощения CuCl (длина волны – 384 нм) от различных режимов термообработки: 1 – 412°С в течение 10 час, 2 – 412°С в течение 10 час, затем 422°С в течение 10 час; 3 – 412°С в течение 50 час

Также была проведена дополнительная оптимизация по температурам термообработки. Проводилось сравнение влияния температур термообработки в 412°С и в 422°С на выделение фазы CuCl. При 422°С уже идет растворение фазы CuCl в стекле, в то время как при 412°С – наоборот, рост (рис. 3). Соответственно температура 412°С является оптимальной с точки зрения получения максимальной концентрации кристаллической фазы CuCl.

Для стекла 3 был проведен эксперимент по выявлению фотохромных свойств. Для этого стекло с предварительно измеренным спектром поглощения было облучено в течение 30 мин лампой ближнего УФ диапазона. Затем спектр образца был измерен еще раз. Полученные результаты представлены на рис. 4. Как видно из сравнения спектров, приращения поглощения в облученном образце не наблюдается, скорее даже наоборот – поглощение несущественно уменьшается.

Согласно данным рентгенофазового анализа, в стекле 2 размер кристаллов CuCl составил 8 нм, в стекле 3 – 7,5 нм. Крутизна границы поглощения в ближней УФ области для упоминавшегося в начале работы фильтра ЖС-10 составляет 0,45 нм/см⁻¹. Для полученного в работе стекла она может составлять от 10 нм/см⁻¹ и выше, т.е. при высоком поглощении вредного для органов зрения излучения поглощение в видимой области спектра практически отсутствует.

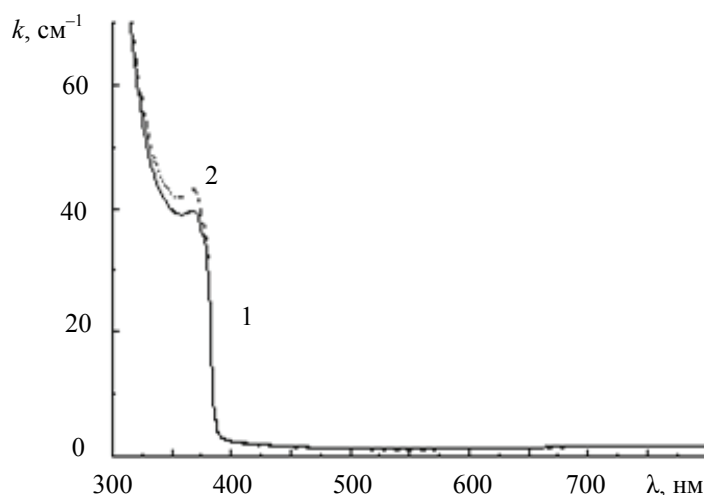


Рис. 4. Сравнение спектров стекла состава 3 с целью выявления фотохромных свойств: 1 – после облучения УФ лампой в течение 30 мин; 2 – до облучения

Заключение

Рассмотрены основные проблемы технологии получения нанокристаллов хлоридов меди в стеклах и способы их решения. Найдены оптимальные технологические режимы и составы для выделения кристаллической фазы CuCl в стеклах с калиево-алюмоборатной матрицей. Полученные стекла не обладают фотохромизмом. Это связано с тем, что при оптимальных температурах обработки фактически не протекает реакция диспропорционирования, ответственная за наличие фоточувствительных компонентов в кристаллической фазе CuCl . Стекла имеют высокое пропускание в видимой области спектра и резкую границу экситонного поглощения в УФ области спектра. Материал с такими свойствами значительно превосходит по своим защитным свойствам современные аналоги и является перспективным для применения в высокоэффективных защитных УФ фильтрах.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ).

Литература

1. Цветное оптическое стекло и особые стекла: Каталог / Под. ред. Г.Т. Петровского. – М.: 1990. – 228 с.
2. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. Physics and chemistry of photochromic glasses. – NY: CRC Press, 1998. – 425 p.
3. Туниманова И.В., Цехомский В.А. Фотохромизм и микроликвация стекла // Ликвационные явления в стеклах. Сб. научн. тр. – Л.: Наука, 1969. – № 19. – С. 132–134.
4. Варгин В.В., Папунашвили Н.А., Цехомский В.А., Фотохромизм в калиево-боратных стеклах // Химическая технология. Сообщение АН Грузинской ССР. – Тбилиси: Наука, 1973. – № 3. – С. 617–620.
5. Степанов С.А., Чуваева Т.И., Подушко Е.В., Магнито-химическое исследование красящих центров в ситализированных стеклах // Известия АН СССР. – 1976. – № 1. – С. 95–98.

- Никоноров Николай Валентинович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой, Nikonovov@oi.ifmo.ru
- Цехомский Виктор Алексеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, tsekoms@mail.ru
- Ширшнев Павел Сергеевич** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pavel.shirshnev@gmail.com

УДК 681.7.063

ЗАПИСЬ УЗКОПОЛОСНЫХ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ОДИНОЧНЫМ ИМПУЛЬСОМ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ МАСКИ

С.В. Варжель, А.В. Куликов, В.А. Асеев, В.С. Брунов, В.Г. Калько, В.А. Артеев

Представлены результаты записи брэгговских решеток в двулучепреломляющем оптическом волокне с повышенной фоторефрактивностью одиночным импульсом КгF эксимерного лазера длительностью 20 нс на длине волны 248 нм. Экспериментально получены решетки Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой с эффективностью более 10% и шириной спектра отражения на полувывоте около 0,1 нм. На основании экспериментально полученных данных вычислены длина биений и эффективный показатель преломления для каждой из выделенных осей двулучепреломляющего волокна.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, двулучепреломление, фоторефрактивность, фазовая маска, эксимерный лазер.

Введение

Брэгговские решетки в настоящее время широко используются в оптических волокнах (ОВ) и планарных волноводах для уплотнения каналов по длине волны (WDM-технология), оптической фильтрации сигналов, как резонаторные зеркала в волоконных и полупроводниковых лазерах, сглаживающие фильтры в оптических усилителях, для компенсации дисперсии в каналах связи. Другой областью применения волоконных брэгговских решеток (ВБР) является использование их в различных измерительных системах – датчиках для регистрации изменений условий окружающей среды, таких как температура, давление, деформация, присутствие или отсутствие химических соединений [1].

Широко применяемые на сегодняшний день методы записи ВБР позволяют изготавливать брэгговские решетки с эффективностью 0,1–99,9% и шириной полосы отражения 0,05–10 нм. Индуцирование решеток Брэгга в ОВ одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски является наиболее простым и эффективным, так как позволяет исключить из схемы записи дорогостоящие виброизолирующие столы, развязанные фундаменты и основания, необходимые при многоимпульсной записи, и при этом получать решетки с требуемыми характеристиками.

В ходе настоящей работы для записи решеток Брэгга применялось оптическое волокно, легированное 16% диоксидом германия (GeO_2), полученное по технологии [2, 3]. Метод легирования заготовок для вытяжки оптического волокна GeO_2 является наиболее простым, эффективным и дает неизменяемый во времени коэффициент приращения фоточувствительности. Кроме того, увеличение фоторефрактивности на стадии формирования заготовок в перспективе позволяет осуществлять запись массивов ВБР в процессе вытяжки оптического волокна. К недостаткам выбранного метода относится увеличение линейных оптических потерь световода. Для используемого в работе двулучепреломляющего волокна с напрягающей эллиптической оболочкой с 16% содержанием GeO_2 потери составляют около 18 дБ/км на длине волны 1550 нм, при этом потери в двулучепреломляющем ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой с 4% содержанием GeO_2 , изготовленном по той же технологии [2, 3], не превышают 1 дБ/км на длине волны 1550 нм. Оптические потери в применявшемся двулучепреломляющем ОВ с 16% содержанием GeO_2 приемлемы для волоконно-оптических измерительных систем на основе ВБР.

Характеристики лазера и схема записи ВБР

В работе применялся эксимерный лазер Lambda Physic Complex 102 с энергией в импульсе около 150 мДж при использовании газовой смеси КгF. Схема записи ВБР, представленная на рис. 1, аналогична схеме, использованной авторами для записи решеток Брэгга в кристалл ниобата лития [4].

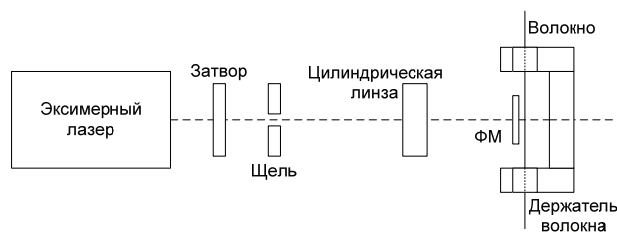


Рис. 1. Схема записи ВБР

Лазер генерирует импульсы длительностью 20 нс на длине волны 248 нм с частотой 1 Гц. Затвор позволяет выделить одиночный импульс из их последовательности, когда лазер уже выведен в стационарный режим работы. Щель отфильтровывает не используемую в процессе записи площадь лазерного пучка. Цилиндрическая линза фокусирует лазерный пучок по одной из осей для достижения требуемой плотности энергии.

Одиночный лазерный импульс, проходя через фазовую маску (ФМ) с периодом $\Lambda_{\text{ФМ}} = 1065,3$ нм, оптимизированную для длины волны 248 нм, дифрагирует на +1 и -1 порядки (рис. 2). Интерференционная картина +1 и -1 порядков осуществляет запись решетки показателя преломления (ПП) в сердцевине оптического волокна, закрепленного на расстоянии нескольких микрометров от ФМ в магнитном держателе.

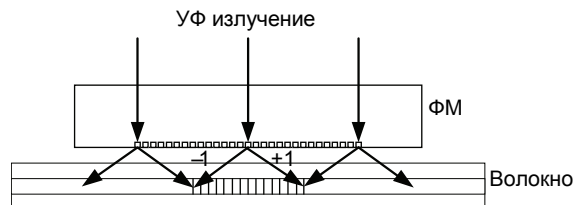


Рис. 2. Дифракция на фазовой маске

Лазерный пучок имеет прямоугольную форму с длинами сторон 22×8 мм. На рис. 3, а, б, продемонстрирована зависимость видности интерференционной картины от смещения относительно центра пучка по короткой и по длинной осям соответственно [5]. На рис. 3 видно, что при смещении по длинной оси отсутствует резкая зависимость видности интерференционной картины от смещения относительно центра пучка.

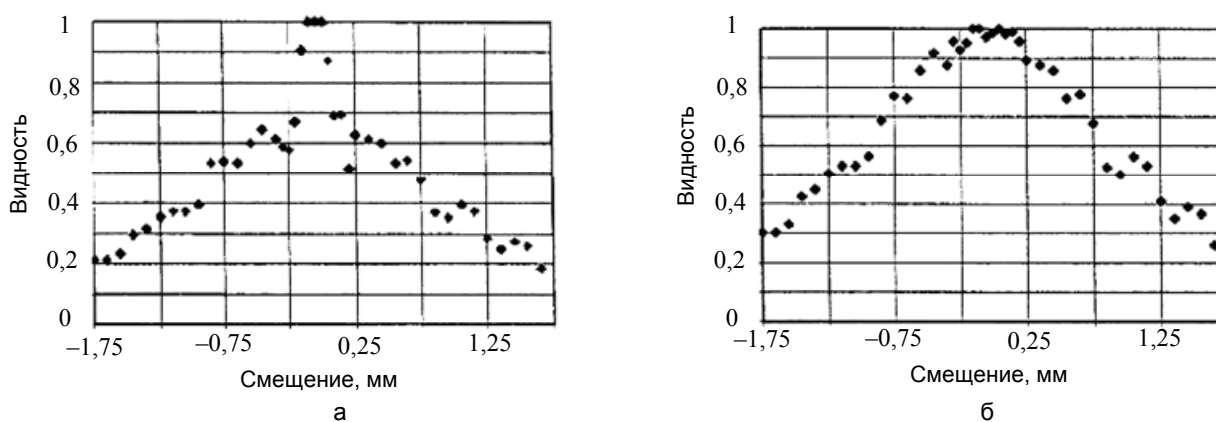


Рис. 3. Зависимость видности интерференционной картины от смещения относительно центра пучка: а) по короткой оси; б) по длинной оси

Таким образом, фокусировка пучка по короткой оси имеет ряд существенных преимуществ: более равномерное распределение энергии по площади пучка; плавная зависимость видности интерференционной картины от смещения относительно центра пучка; возможность записи ВБР длиной до 22 мм при наличии соответствующей ФМ.

Результаты исследования

На рис. 4 представлена схема измерения параметров ВБР по отражению с помощью узкополосного перестраиваемого лазера THORLABS INTUN TL 1550-B. Настоящий лазер позволяет осуществлять выбор длины волны в диапазоне 1510–1620 нм с шагом 0,005 нм. С помощью контроллера поляризации (КП) осуществляется ввод излучения в одну из выделенных осей двулучепреломляющего оптического волокна. Мощность френелевского отражения от сколотого торца волокна принимается за опорный уровень. Измерение уровня сигнала отражения брэгговской решетки производится при подавлении френелевского отражения за счет терминирования сколотого торца волокна с помощью иммерсии с соответствующим показателем преломления. Экспериментально установленный уровень шума в данной схеме соответствует отражению в 0,01%, что позволяет регистрировать ВБР с точностью до 0,1%.

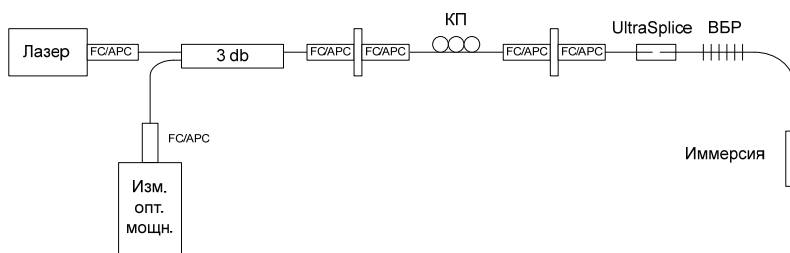


Рис. 4. Схема измерения параметров решеток

На рис. 5 представлены спектры отражения ВБР для двух ортогональных выделенных осей двулучепреломляющего волокна, поочередно выведенных на максимум с помощью КП. Решетка записана с одного импульса в волокно с напрягающей эллиптической оболочкой с 16% GeO₂. Представленная ВБР была записана при плотности энергии импульса эксимерного лазера на волокне около 950 мДж/см².

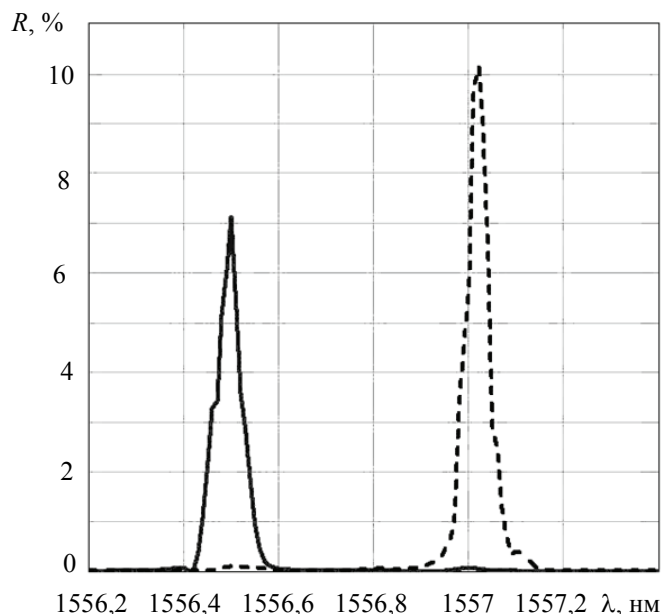


Рис. 5. Спектры отражения ВБР для двух ортогональных выделенных осей двулучепреломляющего волокна: сплошная линия – быстрая ось; пунктирная линия – медленная ось

Пик на длине волны 1556,50 нм имеет ширину на полувысоте, равную 0,08 нм, и эффективность $R=7,1\%$. Пик на длине волны 1557,02 нм имеет ширину на полувысоте, равную 0,09 нм, и эффективность $R=10,2\%$. Наличие неосновного пика на каждом из графиков (рис. 5) обусловлено неточностью ввода поляризованного излучения в выделенную ось двулучепреломляющего волокна. Достигнутый коэффициент отражения позволяет создавать волоконно-оптические датчики различных физических величин на основе ВБР.

Расстояние между двумя пиками отражения, соответствующими двум ортогональным поляризациям, составляет 0,52 нм и определяется коэффициентом двулучепреломления анизотропного волокна. Полученное значение центральной длины волны отражения ВБР ($\lambda_{\text{БР}}$) и известный период ФМ ($\Lambda_{\text{ФМ}}$) позволяют вычислить, в соответствии с условием Брэгга, эффективный показатель преломления ($n_{\text{эфф}}$) для каждой из двух ортогональных осей двулучепреломления:

$$n_{\text{эфф}} = \frac{\lambda_{\text{БР}}}{\Lambda_{\text{ФМ}}}.$$

Рассчитанные значения $n_{\text{эфф}}$ для быстрой и медленной осей двулучепреломляющего волокна с эллиптической напрягающей оболочкой, использованного в работе, составили 1,46109 и 1,46158 соответственно. Полученные значения $n_{\text{эфф}}$ для каждой из ортогональных осей двулучепреломляющего ОВ позволяют вычислить длину биений [6]:

$$L_{\beta} = \frac{\lambda}{n_y - n_x},$$

где n_x , n_y – значения эффективного показателя преломления для быстрой и медленной осей двулучепреломляющего волокна.

Рассчитанное значение L_{β} для двулучепреломляющего ОВ с эллиптической напрягающей оболочкой, использованного в работе, составило 3,163 мм на длине волны 1550 нм.

Заключение

В ходе работы был создан лабораторный стенд для записи ВБР одиночным импульсом эксимерного лазера длительностью 20 нс с длиной волны излучения 248 нм методом фазовой маски. Продемонстрирован образец решетки Брэгга в двулучепреломляющем оптическом волокне с эллиптической напрягающей оболочкой, полученный на настоящем стенде, с эффективностью более 10% и шириной спектра отражения на полувысоте около 0,1 нм. Полученные результаты подтверждают возможность применения данного метода для получения узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импуль-

сом эксимерного лазера. Также на основании экспериментальных данных вычислены длина биений и эффективный показатель преломления для каждой из выделенных осей двулучепреломляющего волокна.

Авторы выражают благодарность М.А. Ероньяну и К.В. Дукельскому за предоставленные образцы двулучепреломляющего оптического волокна с эллиптической напрягающей оболочкой, легированного 16% GeO₂, и полезные обсуждения в ходе выполнения настоящей работы.

Литература

1. Кукушкин С.А., Осипов А.В., Шлягин М.Г. Образование микропор в оптическом волокне под воздействием импульсного УФ света высокой интенсивности // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76. – № 8. – С. 73–84.
2. Дукельский К.В., Ероньян М.А., Комаров А.В., Кондратьев Ю.Н., Ромашова Е.И., Серков М.М., Хохлов А.В. Тонкие анизотропные одномодовые волоконные световоды с эллиптической напрягающей оболочкой // Оптический журнал. – 2000. – Т. 57. – № 10. – С. 104–106.
3. Буреви С.В., Дукельский К.В., Ероньян М.А., Злобин П.А., Комаров А.В., Левит Л.Г., Страхов В.И., Хохлов А.В. Технология крупногабаритных заготовок анизотропных одномодовых световодов с эллиптической оболочкой // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 4. – С. 85–87.
4. Брунов В.С., Варжель С.В., Никоноров Н.В., Стригалева В.Е. Создание фотоиндуцированных брэгговских дифракционных структур в кристалле ниобата лития с помощью ультрафиолетового наносекундного эксимерного импульсного лазера // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 74. – С. 26–29.
5. Mayer E., Gillett D., Govorkov S. Fiber Bragg Grating Writing by Interferometric or Phase-Mask Methods Using High-Power Excimer Lasers // Fiber and Integrated Optics. – 1999. – V. 18. – № 3. – P. 189–198.
6. Meltz G., Morey W.W. Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity // Proc. SPIE. – 1991. – V. 1516. – P. 185–199.

<i>Варжель Сергей Владимирович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vsv187@gmail.com
<i>Куликов Андрей Владимирович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, a.kulikov86@gmail.com
<i>Асеев Владимир Анатольевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, научный сотрудник, aseev@oi.ifmo.ru
<i>Брунов Вячеслав Сергеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, brunov@oi.ifmo.ru
<i>Калько Владимир Геннадьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, vovan-de-mort@mail.ru
<i>Артеев Виктор Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, art-viktor@yandex.ru

УДК 608.1

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА
НЕСИММЕТРИЧНЫМ ДИМЕТИЛГИДРАЗИНОМ**

А.А. Рогова, Л.А. Конопелько

Рассматривается необходимость совершенствования методов контроля загрязнения атмосферного воздуха несимметричным диметилгидразином, в целях чего была осуществлена разработка нового средства измерений.

Ключевые слова: несимметричный диметилгидразин, атмосферный воздух, метрологическое обеспечение, обеспечение единства измерений, источник микропотока.

Введение

Постоянно растущая деятельность Российской Федерации в космической отрасли ставит задачу обеспечения охраны окружающей среды и здоровья населения от специфических загрязнителей, в частности, компонентов ракетного топлива (КРТ). На сегодняшний день в качестве одного из КРТ широко применяется несимметричный диметилгидразин (1,1-диметилгидразин, НДМГ, «гептил»).

Исследование и контроль загрязнения парами НДМГ окружающей среды (ОС), в частности, атмосферного воздуха, может производиться как посредством различных систем по моделированию распространения загрязнения [1], так и напрямую, наблюдением за состоянием среды путем проведения измерений.

При всех общеизвестных достоинствах, которыми обладают различные системы моделирования, преимущества непосредственного измерения и прямого контроля налицо.

На сегодняшний день для определения НДМГ в воздушной среде реализуются различные физико-химические методы. Основными из них являются электрохимический, пьезорезонансный, фотоколориметрический, спектроскопический, фотометрический и т.д.

Анализ методов и средств измерений (СИ) выявил следующие недостатки.

1. Большая масса, габариты и энергопотребление оборудования позволяют проводить измерения только в стационарных условиях.
2. Необходимость проведения пробоподготовки. Отбор, транспортировка в лабораторию, хранение пробы вносят дополнительные погрешности в проведение измерений.
3. Необходимость подготовки к анализу – концентрирование на твердые сорбенты, поглощение специальными растворами и т.д. – затрудняет и усложняет проведение измерений.
4. Существующее оборудование не всегда отвечает современным требованиям (невозможность прямой компьютерной обработки и т.д.).
5. Сложность обеспечения единства измерений в рамках российского законодательства [2, 3].
6. Сложность метрологического обеспечения [2, 3].

Эти факторы не позволяют производить мониторинг состояния воздуха в полной мере и обуславливают необходимость внедрения нового оборудования. Данная работа посвящена разработке и внедрению новых СИ в целях развития метрологического обеспечения контроля загрязнения НДМГ атмосферного воздуха в рамках российского законодательства и действующих в стране государственных стандартов.

**Источники загрязнения атмосферного воздуха несимметричным диметилгидразином
и его влияние на организм человека**

НДМГ – $(\text{CH}_3)_2\text{N}_2\text{H}_2$ – входит в группу широко используемых в ракетной технике гидразиновых горючих на российских, американских, французских, японских, китайских ракетах-носителях: в двигательных установках пилотируемых кораблей и автоматических спутников, орбитальных и межпланетных станций.

НДМГ – бесцветная прозрачная жидкость с резким неприятным запахом, характерным для аминов. Легко самовоспламеняется с окислителями на основе азотной кислоты и азотного тетраоксида, что обеспечивает легкий запуск и стабильную работу двигателей ракет-носителей в широком диапазоне изменения окружающих условий.

Часто можно встретить неправильное наименование НДМГ – «гептил». Данное название не отражает химической формулы НДМГ, поэтому его следует применять, заключая в кавычки.

Вследствие широкого применения в космической и военной деятельности на сегодняшний день существует целый ряд источников загрязнения НДМГ, где население и ОС подвергаются наиболее интенсивному воздействию:

- падение ступеней ракет с несгоревшим топливом при плановых запусках;
- аварии при запусках;
- испытания ракетных двигателей;
- зоны базирования специализированных военных частей;
- места производства;
- нарушение правил транспортировки и хранения, аварийные ситуации при транспортировке и хранении;
- нарушение правил утилизации.

Всемирная организация здравоохранения относит НДМГ к I классу опасности, т.е. к чрезвычайно опасным веществам. Значение предельно допустимой концентрации – $0,1 \text{ мг/м}^3$.

НДМГ обладает сильным токсическим действием. Наиболее опасным источником отравления является вдыхание паров. Результатами действия на организм человека являются раздражение слизистых оболочек глаз, дыхательных путей и легких; сильное возбуждение центральной нервной системы; расстройство желудочно-кишечного тракта (тошнота, рвота).

Отмечается высокая способность проникать через неповрежденную кожу. При хроническом воздействии опасность отравления через кожу достигает уровня ингаляционной. Доказано иммунодепрессивное, эмбриотоксическое, тератогенное, мутагенное и канцерогенное действие НДМГ при любых путях поступления в организм.

Отрицательное влияние загрязнителя усугубляется его кумулятивными свойствами, т.е. способностью накапливаться в организме.

Метрологическое обеспечение контроля несимметричного диметилгидразина

В соответствии с Российским законодательством [2] и в целях обеспечения единства измерений при реализации контроля загрязнения НДМГ атмосферного воздуха был проведен ряд работ, результатом которых стала разработка нового СИ – источника микропотока НДМГ (ИМ).

ИМ – мера массового расхода чистого вещества, представляющая собой контейнер в виде ампулы, трубки с проницаемыми стенками или другого вида, заполненный сжиженным чистым газом, легколетучей чистой органической жидкостью или раствором [3]. При обдувании ИМ азотом или воздухом вещество диффундирует через стенку сосуда в поток газа-разбавителя, формируя газовую смесь с заданным значением массовой концентрации вещества.

ИМ предназначены для использования в качестве сменных элементов в газоаналитических и газосмесительных устройствах (термодиффузионных генераторах газовых смесей), применяемых для градуировки и поверки газоанализаторов контроля НДМГ в атмосферном воздухе и воздухе рабочей зоны.

Источник микропотока

Производство ИМ осуществлялось на площадке ООО «МОНИТОРИНГ», г. Санкт-Петербург. Процесс изготовления ИМ подразумевает проведения ряда стандартных работ:

- анализ исходных данных и планирование процесса изготовления;
- изготовление корпуса ИМ. Габаритные размеры (длина, диаметр) и материал (фторопласт) корпуса выбираются исходя из необходимых значений производительности ИМ (G , мкг/мин). Производительность ИМ является одной из основных характеристик источника и обозначает количество вещества, диффундирующего из ИМ в единицу времени. Данная характеристика зависит от природы вещества, которым заполнен ИМ, а также от геометрических размеров, температуры эксплуатации и параметров проницаемой части сосуда;
- герметизация дна корпуса ИМ, проверка герметичности корпуса;
- заполнение и герметизация ИМ.

Подробный анализ существующих на сегодняшний день аналогов изготавливаемого ИМ (в частности, производства США и России) показал, что высокая летучесть и испаряемость НДМГ, его способность активно сорбироваться различными материалами ставит задачу выполнения особых требований изготовления ИМ, что и было реализовано в рамках настоящей работы.

Соблюдение особых требований было реализовано путем проведения всего процесса изготовления ИМ в специальной установке (боксе) с обязательной постоянной продувкой инертным сухим газом (азотом). По тем же причинам, специально для данного ИМ, был изготовлен специализированный контейнер для хранения и транспортирования, что не предусматривалось ранее при проведении подобных работ. Хранение и транспортирование ИМ должно осуществляться только в контейнере, имеющем возможность

продувки внутреннего объема инертным сухим газом (азотом). Следует отметить, что, так как применение ИМ осуществляется также в инертной сухой среде, то процедуру продувки необходимо выполнять каждый раз перед эксплуатацией ИМ.

В результате проведенных работ был разработан ИМ со следующими характеристиками.

1. Диапазон производительности и пределы допускаемой относительной погрешности приведены в таблице (столбец 4, 5);
2. Габаритные размеры: диаметр 4–8 мм, длина 20–120 мм;
3. масса, не более: 20 г.

Вещество	Номинальное значение температуры, С°	Конструктивное исполнение	Диапазон производительности, G, мкг/мин	Пределы допускаемой относительной погрешности значений производительности, воспроизводимых ИМ [3]
НДМГ (CH ₃) ₂ N ₂ H ₂	30,0	A1	0,1–0,5	± 5 %
	40,0			
	50,0	A2	0,3–1,0	
	60,0			

Таблица. Характеристики ИМ

Как видно из таблицы, ИМ различаются температурой применения и конструктивным исполнением. Таким образом, в зависимости от количества номинальных значений температуры и соответствующих значений производительности, ИМ относятся к многозначным ИМ, что обеспечивает широкий спектр применения данного изделия. Внешний вид ИМ представлен на рисунке.

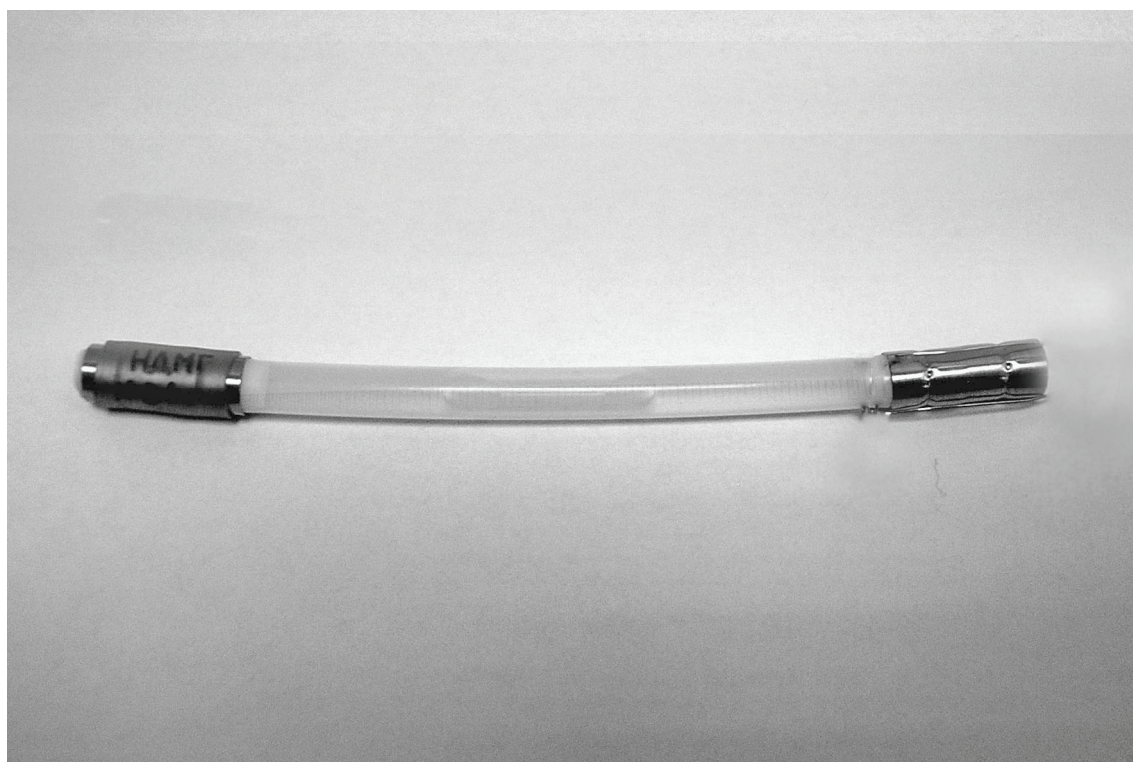


Рисунок. Внешний вид ИМ

Следует также отметить некоторые особенности ИМ, соблюдение которых обусловлено необходимостью обеспечения относительной погрешности значений производительности воспроизводимых ИМ:

- предельным состоянием считают количество вещества в ИМ менее чем 10% от полной вместимости (визуально) или от массы (брутто);
- ИМ относятся к невосстанавливаемым, неремонтируемым, однофункциональным изделиям;
- в эксплуатации ИМ ремонту не подлежат.

Для достижения поставленных задач было организовано проведение испытаний данного СИ в ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в целях утверждения типа.

В соответствии с программой испытаний процедура проведения испытаний включает в себя следующие этапы.

1. Определение метрологических и технических характеристик СИ.
2. Проверка габаритных размеров и массы.
3. Проверка заполнения ИМ.
4. Проверка герметичности контейнера.
5. Определение производительности (G).
6. Проверка относительного отклонения производительности от заданного значения (G).
7. Определение относительной погрешности температурного коэффициента.
8. Определение диапазона производительности ИМ.
9. Определение относительной погрешности производительности ИМ.
10. Испытание ИМ в упаковке для транспортирования на влияние транспортной тряски.
11. Испытание ИМ в упаковке для транспортирования на влияние повышенной температуры окружающего воздуха.
12. Оценка полноты и правильности метрологических СИ в представленной заявителем технической документации.
13. Опробование методики поверки.
14. Определение интервала между поверками СИ.
15. Анализ конструкции СИ.

На основании положительных результатов проведенных испытаний осуществлено внесение ИМ в качестве нового типа СИ в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации как рабочего эталона 1-го разряда для передачи единицы массовой концентрации НДМГ в азоте (в соответствии с [3]).

Заключение

Разработанный ИМ может использоваться в комплексе с большинством из существующих на сегодняшний день газоаналитических и газосмесительных устройств (термодиффузионных генераторах газовых смесей), создавая на выходе такой системы газовую смесь необходимой концентрации с требуемой точностью. Это позволяет улучшить и усовершенствовать существующий процесс реализации обеспечения единства измерений, что, в свою очередь, способствует развитию методов контроля загрязнения воздушной среды несимметричным диметилгидразином.

Литература

1. Carlsen Lars, Kenesova Olga A., Batyrbekova Svetlana E. A preliminary assessment of the potential environmental and human health impact of unsymmetrical dimethylhydrazine as a result of space activities // Chemosphere. – 2007. – V. 67. – Is. 6. – P. 1108–1116.
2. Российская Федерация. Федеральный закон об обеспечении единства измерений. №102-ФЗ. Принят Гос. Думой 11 июня 2008 г.; одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 г.
3. ГОСТ 8.578-2008. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. – Введ. 01.03.2009. – М.: Стандартинформ, 2009. – 13 с.

Рогова Анастасия Андреевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, koroLyok86@mail.ru

Конопелько Леонид Алексеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, lkonop@b10.vniim.ru

УДК 531.5

ПОСТРОЕНИЕ КАРТ ИЗОЛИНИЙ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ТОЧЕЧНЫХ МАСС

О.М. Яшникова

Описаны процедура и реализующая ее в пакете Matlab программа построения карт аномального гравитационного поля Земли на основе метода точечных масс. Процедура носит итерационный характер, в связи с чем обсуждается критерий, используемый при выборе точечных масс. Приводятся результаты и апробация методики построения карт для района озера Байкал.

Ключевые слова: аномальное гравитационное поле, точечные массы, карты изолиний.

Введение

При решении ряда прикладных задач требуются карты различных характеристик гравитационного поля Земли (ГПЗ), их трехмерные изображения и соответствующие им изолинии, а также профили вдоль различных направлений. В частности, такая потребность возникает при исследовании плотностных неоднородностей земной коры, разведке полезных ископаемых, оценке сейсмологической обстановки и т.п. Измерение величин, характеризующих ГПЗ, может проводиться гравиметрическими методами с использованием данных гравиметров, гравитационных вариометров и градиентометров. По данным съемки строятся гравиметрические карты, характеризующие аномалии ГПЗ [1, 2]. Поскольку гравиметрические съемки проведены далеко не на всей поверхности Земли, особенно в труднодоступных районах с аномальной изменчивостью поля, возникают задачи описания параметров гравитационного поля в условиях отсутствия данных гравиметрической съемки. Для этого создаются различного рода математические модели поля исследуемого района.

Один из вариантов построения модели аномального ГПЗ может быть основан на так называемом методе точечных масс. Теоретические основы этого метода известны и довольно подробно освещены в работах [3–5] применительно к описанию возмущающего потенциала [6].

В настоящей работе ставится задача построения карт изолиний аномального гравитационного поля на основе метода точечных масс и определение параметров ГПЗ, характеризующих изменчивость аномальной составляющей поля как в пространственной, так и во временной областях. Для этих целей в прикладном пакете Matlab разработана компьютерная программа, реализующая описываемую ниже математическую модель гравитационного поля и позволяющая на основе заданных характеристик точечных масс строить карты изолиний интересующих параметров. Приводятся результаты апробации методики построения карт для района озера Байкал.

Математическая модель аномального гравитационного поля

Согласно закону тяготения Ньютона проекции вектора силы притяжения $\mathbf{F}$, направленного от притягиваемой точки P с единичной массой и координатами (x_P, y_P, z_P) к притягивающей точке M с массой m и координатами (x_M, y_M, z_M) , могут быть представлены [7] в векторной форме в виде

$$F_j = G \frac{m}{r^2} \cos(r, j), \quad j = x, y, z,$$

или в скалярной форме в виде

$$F_j = G \frac{m(j_P - j_M)}{r^3}, \quad j = x, y, z,$$

где G – гравитационная постоянная; $r = \sqrt{(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + (z_P - z_M)^2}$.

Помимо силы притяжения, на каждую точку на Земле действует центробежная сила, однако она не зависит от наличия притягивающих масс, поэтому можно считать, что сила тяжести для единичной массы определяется только силой притяжения, т.е. $g_x = F_x$, $g_y = F_y$, $g_z = F_z$. Если на точку P действуют не одна, а n притягивающих точечных масс, то выражения для компонент вектора действительной силы тяжести $\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z)^T$ (здесь индекс «Т» означает транспонирование) могут быть представлены в виде

$$g_j = G \sum_{k=1}^n \frac{m_k(j_P - j_k)}{r_k^3}, \quad j = x, y, z. \quad (1)$$

Проекции вектора силы тяжести на плоскости географического сопровождающего трехгранника (ГСТ) позволяют определить направление вектора силы тяжести. Примем точку P за начало прямоуголь-

ной системы координат, ось z совместим с направлением вектора нормальной силы тяжести $\gamma = [0, 0, \gamma]^T$, ось x направим по касательной к меридиану на север, а ось y – на восток (рис. 1).

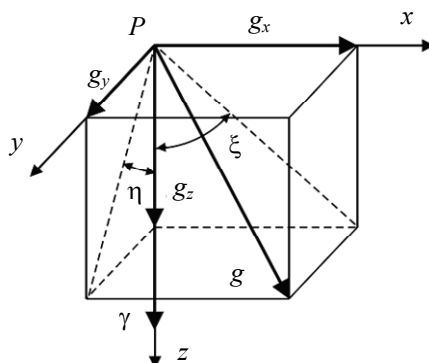


Рис. 1. Проекции вектора силы тяжести

Из (1) можем получить выражения для интересующих нас составляющих аномального ГПЗ:

$$\xi = -\frac{g_x}{g_z}, \quad \eta = -\frac{g_y}{g_z}, \quad (2)$$

$$\Delta g = g_z - \gamma, \quad (3)$$

где ξ и η – так называемые продольная и поперечная составляющие ГПЗ, а Δg – аномалия силы тяжести. В выражении (2) ввиду малости углов тангенсы заменены значениями самих углов, выраженными в радианах.

Уравнения (1)–(3) и определяют используемую далее математическую модель аномального ГПЗ. Для ее конкретизации необходимо выбирать точечные массы и соответствующие им координаты. Поскольку процедура подбора этих параметров носит итерационный характер и требует многократных вычислений, была разработана программа, позволяющая автоматизировать процесс построения таких моделей и соответствующих им карт изолиний в зависимости от числа задаваемых точечных масс и их характеристик.

Построение карт изолиний аномального гравитационного поля и результаты моделирования

Процедура построения карт изолиний аномального ГПЗ с использованием модели (1)–(3) на основе точечных масс заключается в следующем. Географическая карта интересующего района разбивается на равные участки, в центре каждого из них размещается точечная масса. С использованием географических карт определяются координаты x_{M_i}, y_{M_i} основных притягивающих масс M_i (рис. 2, а). Для выбранного количества точечных масс строятся изолинии аномалий. Необходимое количество точечных масс определяется из условия непересечения изолиний и их сглаживания с критерием волнистости изолинии не более 5%. Данный критерий характеризует степень приближенности расчетной изолинии к реальной и представляет собой соотношение длин этих изолиний [8, 9]. При добавлении точечных масс разработанная программа автоматически рассчитывает величину достигнутого критерия и отображает новые изолинии.

Описанная процедура была апробирована при построении карт изолиний сильно аномального гравитационного поля в районе озера Байкал (рис. 2). Байкал лежит в глубоком тектоническом понижении, и местность вокруг озера имеет сложный, глубоко расчлененный рельеф. Горные хребты тянутся здесь параллельно один другому в направлении с северо-запада на юго-восток и разделены котловинообразными понижениями. Высота большинства хребтов Забайкалья составляет около 1300–1800 м, а наиболее высокие хребты достигают значений около 3000 м.

Для определения величины притягивающей массы горный массив в месте залегания точки аппроксимировался равносторонней пирамидой (рис. 2, б), высота которой принималась равной максимальной высоте массива на данном участке.

В этом случае величина массы определялась выражением

$$m_{M_i} = \frac{\rho \cdot S \cdot h}{3}, \quad (4)$$

где ρ – плотность вмещающей среды; S, h – площадь основания и высота пирамиды соответственно. Согласно работам [10, 11], за среднюю плотность вмещающей среды, составляющей Байкальскую рифтовую зону, принимается $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. В качестве высоты залегания точечной массы выбиралась высота расположения центра масс пирамиды.

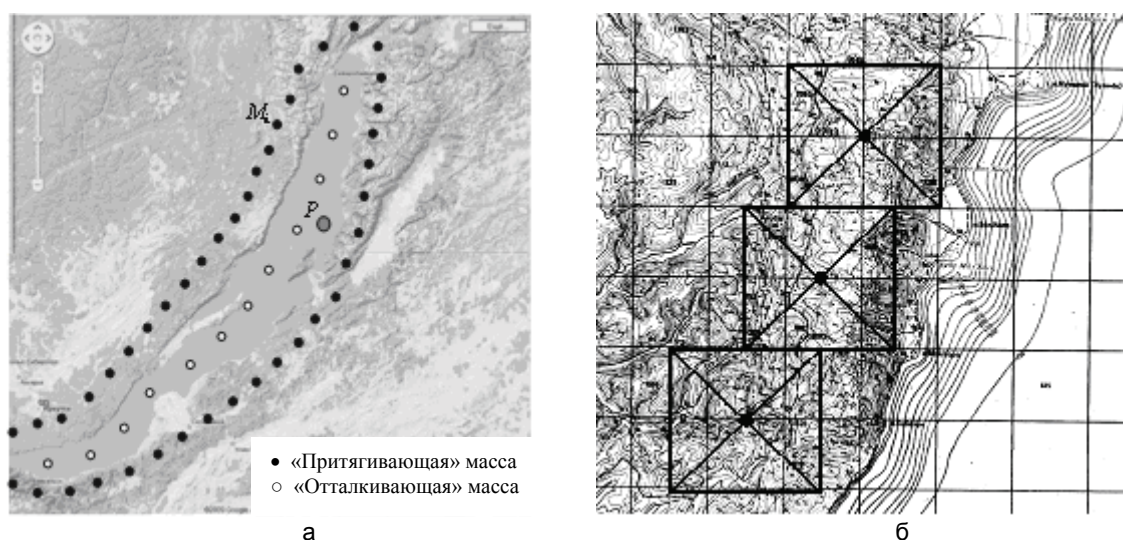


Рис. 2. Схема расположения точечных масс (а) и аппроксимация горного массива (б)

Аналогичная аппроксимация проводилась и для глубин озера с заменой в формуле (4) средней плотности среды на плотность воды $\rho = 1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Масса в этом случае бралась с обратным знаком, так как является «отталкивающей», т.е. уменьшающей значение полной силы тяжести.

Далее с использованием значений масс m_i и соответствующих им координат $x_{M_i}, y_{M_i}, z_{M_i}$ в программе согласно выражениям (1)–(3) рассчитывались искомые параметры ξ, η , характеризующие аномальную составляющую гравитационного поля в точке с заданными координатами.

Для исследуемого района, исходя из описанного критерия, была определена модель с количеством масс, равным 120.

В ряде случаев требуется знание аномалий ГПЗ вдоль заданной траектории, например, когда точка P прямолинейно перемещается в исследуемом районе. Удобно, чтобы зависимость параметров ГПЗ представляла собой функцию от времени. Для этого необходимо задаться траекторией движения внутри поля. Предположим, что объект перемещается прямолинейно из точки S в точку F (рис. 3).

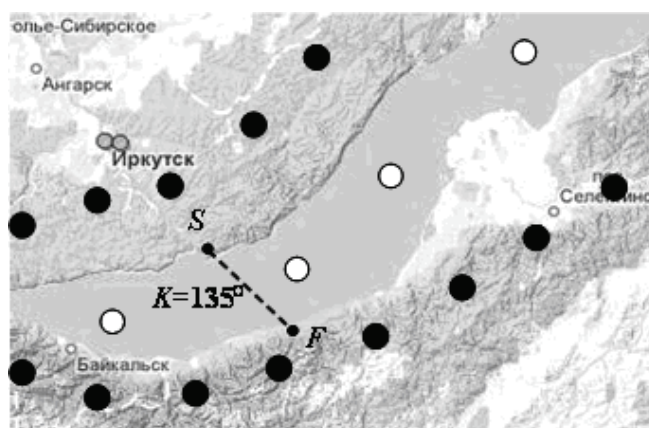


Рис. 3. Траектория движения

В этом случае координаты вычисляются как

$$X_{P_i} = X_0 + V \cdot (t - t_0) \cdot \sin(K),$$

$$Y_{P_i} = Y_0 + V \cdot (t - t_0) \cdot \cos(K),$$

где X_0, Y_0 – координаты точки старта (точка S на рис. 3); V – скорость движения объекта; t – текущее время; t_0 – начальное время; K – курс объекта.

В программе предусмотрена процедура реализации траектории в виде координат X_{P_i}, Y_{P_i} для каждого момента времени и вычисления параметров ГПЗ $\xi, \eta, \Delta g$ для каждой точки траектории.

Полученные параметры ГПЗ в проекциях на плоскости ГСТ приведены на рис. 4 и представляют собой карты изолиний, описывающие характер аномального гравитационного поля в данном районе.

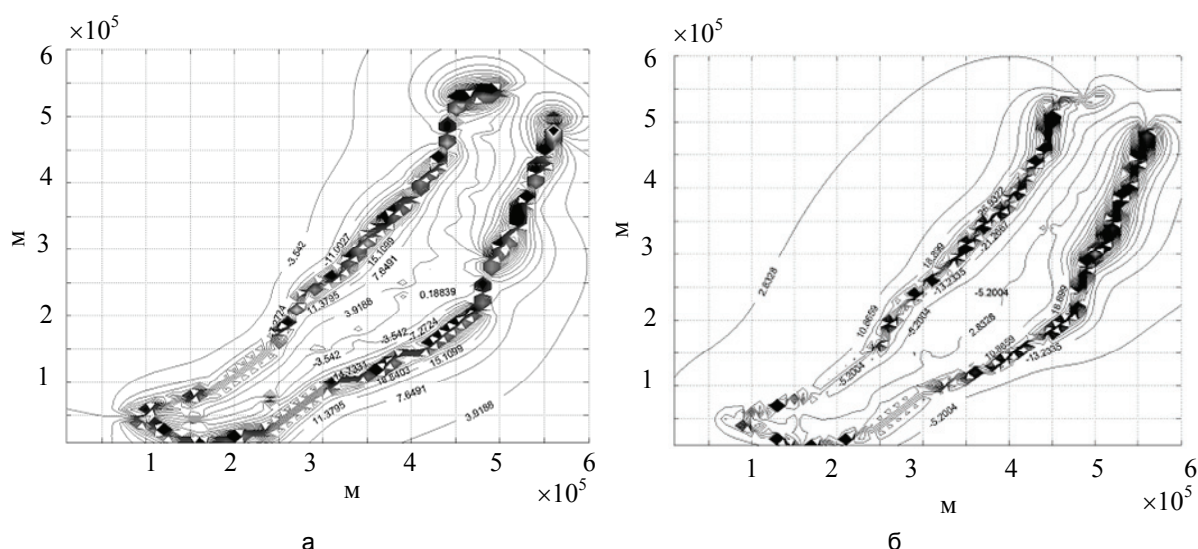


Рис. 4. Параметры ГПЗ в проекциях на меридиональную (а) и вертикальную (б) плоскости ГСТ на поверхности акватории озера Байкал (угл. с)

Аномалия силы тяжести, а также продольная и поперечная составляющие аномального ГПЗ относительно касательной к траектории движения были получены для курса $K = 135^\circ$ (рис. 3) и скорости $V = 8$ узлов и приведены на рис. 5.

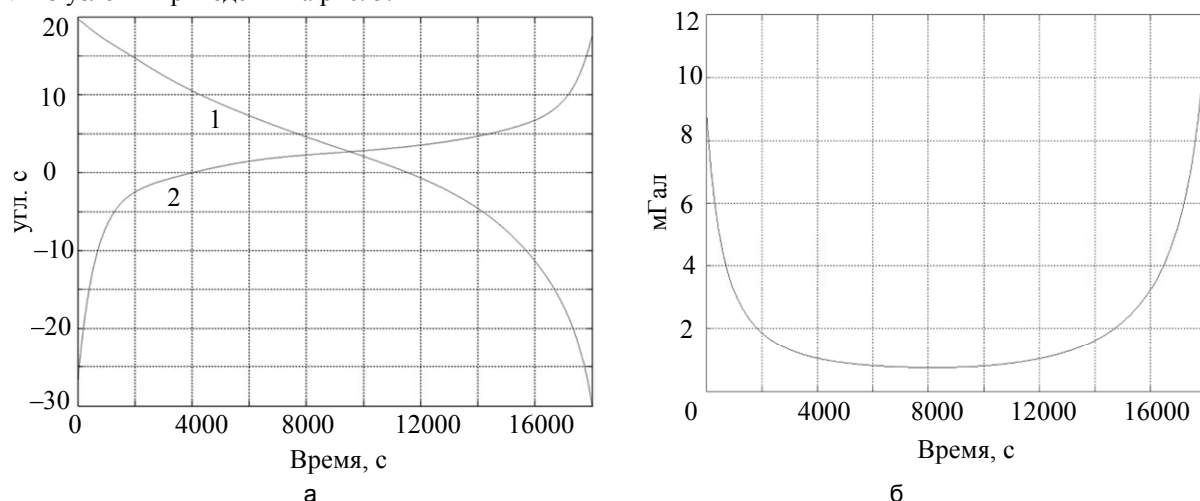


Рис. 5. Продольная ξ (1) и поперечная η (2) составляющие аномального ГПЗ относительно касательной к траектории движения (угл. с) (а) и аномалия силы тяжести Δg (мГал) (б)

Из рис. 5, б, видно, что аномалия силы тяжести для приведенной траектории (рис. 3) имеет вид параболы, значения которой возрастают до 12 мГал по мере приближения к горному массиву и опускаются фактически до нуля в середине траектории. Подобный характер кривой, описывающей аномалию ГПЗ в данном районе, полностью согласуется с данными, полученными на основе гравиметрической съемки [11, 12].

Заключение

Описаны процедура и реализующая ее в пакете Matlab программа построения карт аномального гравитационного поля Земли на основе метода точечных масс.

Практическая апробация процедуры выполнена для акватории озера Байкал, характеризующейся сложным, глубоко расчлененным рельефом. Характер изолиний параметров ГПЗ, полученных с помощью используемой модели, с достаточной степенью точности соответствует аналогичным картам, полученным гравиметрическим методом [11, 12].

Литература

1. Непоклонов В.Б. О создании цифровых карт уклонов отвесной линии // Геодезия и картография. – 1996. – № 9. – С. 2–6.

2. Хмелевской В.К. Геофизические методы исследований: Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. – Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ, 2004. – 232 с.
3. Фомин В.Н. О представлении гравитационного поля простейших тел притяжением точечных масс // *Астрономия и геодезия*. – Томск: Изд-во ТГУ, 1980. – Вып. 8. – С. 102–110.
4. Антонов В.А. Представление гравитационного поля планеты потенциалом системы точечных масс // *Труды астрономической обсерватории ЛГУ*. – 1978. – Т. 34. – С. 145–155.
5. Полещиков С.М. О построении вещественной системы точечных масс, представляющих гравитационное поле планеты // *Вестник ЛГУ*. – 1984. – Т. 14. – С. 95–99.
6. Гравиметрия и геодезия / Под ред. Б.В. Бровара. – М.: Научный мир, 2010. – 570 с.
7. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с.
8. Бурик О.В. Исследование методов автоматического построения изолиний // *Сборник трудов магистрантов Донецкого национального технического университета*. Вып. 2. – Донецк: ДонНТУ. Министерство образования и науки Украины, 2003. – С. 331–342.
9. Чернова Л.И. Обработка геопространственной информации при цифровом моделировании топографических задач // *Автореферат дис. к.т.н.* – Иркутск, 2006. – 20 с.
10. Савиных В.П., Яценко В.Р., Ямбаев Х.К. Геодезические исследования геодинамики рифтовой зоны озера Байкал // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2006. – № 5. – С. 3–10.
11. Кабан М.К. Гравитационная модель коры и верхней мантии Северной Евразии // *Российский журнал наук о Земле*. – 2001. – Т. 3. – № 2. – С. 143–163.
12. Милановский Е.Е. Геология России и Ближнего Зарубежья (Северной Евразии): Учебник. – М.: Изд-во МГУ. – 1996. – 448 с.

Яшикова Ольга Михайловна – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, olga_evstifeeva@mail.ru

УДК 531.746

ПРЕЦИЗИОННАЯ ГИРОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОДЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ РАБОТЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ. ОСНОВНЫЕ СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Ю.М. Гордеев, Т.В. Падерина, Д.А. Соколов

Приводятся основные схемно-конструктивные решения, полученные при проектировании компоновки модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации, предназначенной для работы на шельфах арктических морей. Система реализует принципиально новую кинематическую схему бесплатформенного гироскопического прибора, обеспечивающую требуемую точность позиционирования скважин в высоких широтах.

Ключевые слова: система подземной навигации, бесплатформенный гироскопический прибор, шельфы арктических морей.

Введение

Исследования российских геологов доказывают, что акватория Северного Ледовитого океана может стать крупнейшей нефтегазоносной провинцией на Земле. Однако насколько богат этот «арктический Клондайк», настолько и труден в освоении. Уникальность этих месторождений обусловлена, прежде всего, необходимостью строительства скважин в шельфовой зоне морей, имеющей сотни метров глубины, находящейся под воздействием чрезвычайно суровых природно-климатических условий. На сегодняшний день в мировой практике не существует аналогов работ, связанных с проектированием и разработкой подобных месторождений.

Строительство скважин арктического шельфа, как правило, с большими отклонениями ствола от вертикали, практически сложно осуществить без применения гироскопической системы подземной навигации, работающей в процессе бурения (так называемой gMWD-системы). Специфика режима точечного компасирования в такой системе обуславливает снижение ее точности в высоких широтах. Это означает, что на широтах 74–78° с.ш. (местоположение наиболее крупных месторождений углеводородов) погрешность вычисления азимута скважины gMWD-системой при условии применения гироскопа с одним и тем же уровнем ухода вырастет в 1,8–2,4 раза по сравнению с аналогичной погрешностью на широте 60° с.ш. [1].

Для обеспечения подземной навигации в упомянутых широтах требуется разработка прецизионной гироскопической системы нового типа. И решение для создания такой системы есть. Это применение так называемой диаметральной схемы, предложенной некоторое время назад учеными ЦНИИ «Электроприбор» в процессе разработки серии универсальных гироскопических инклинометров (ГИ) для работы в скважинах с малым диаметром и произвольной ориентацией. Диаметральная схема представляется наиболее совершенной в ряду технических решений для бесплатформенных ГИ. Она предусматривает разворот корпуса гироскопа вокруг поперечной оси скважинного прибора (СП), при котором вектор кинетического момента остается перпендикулярным оси разворота и находится в диаметральной плоскости

СП. Эта схема позволяет создать на основе одного двухосного датчика угловой скорости (ДУС) новую гироскопическую систему подземной навигации, обладающую рядом характеристик, особо востребованных в высоких широтах, – адаптивностью к траектории, т.е. способностью измерения азимута с одной и той же точностью в любых произвольно ориентированных скважинах, и возможностью осуществления режима инвариантного компасирования, с помощью которого достигается независимость ошибок определения азимута от пусковых погрешностей гироскопа.

Таким образом, при использовании данной схемы в гироскопической системе подземной навигации можно достичь требуемой точности позиционирования скважин даже в высоких широтах.

Однако техническая реализация gMWD-системы, предназначенной для условий морских месторождений Арктики, чрезвычайно сложна. Необходимы продуманные проектные решения.

В работе описывается алгоритм инвариантного компасирования в диаметральной кинематической схеме, приводятся и анализируются основные схемно-конструктивные решения, полученные при проектировании компоновки модуля ориентации (МО) названной системы подземной навигации.

Режим инвариантного компасирования в диаметральной схеме

На рис. 1 приведена диаметральной кинематическая схема построения гироскопической системы подземной навигации и показаны следующие углы разворота ДУС: ψ – угол разворота корпуса ДУС вокруг продольной оси СП; χ – угол разворота вектора кинетического момента ДУС вокруг поперечной оси СП.

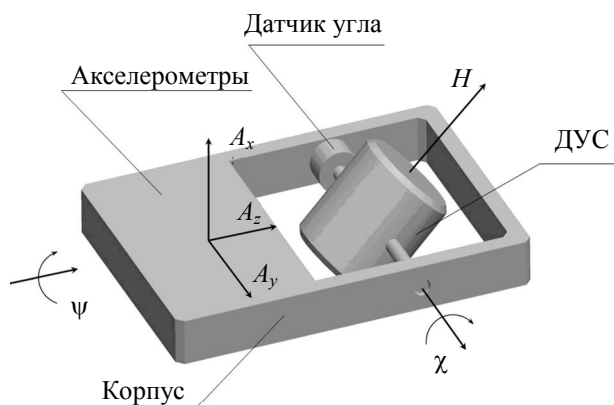


Рис. 1. Диаметральной кинематическая схема построения гироскопической системы подземной навигации

В работах [2, 3], где исследовалось наличие в диаметральной схеме возможности инвариантного компасирования, доказывалось, что для достижения одинаковой эффективности (равной точности) такого компасирования в произвольно ориентированных скважинах требуется управление углами ψ и χ . При этом отмечалось, что при проведении измерений в любой точке ствола достаточно установки корпуса ДУС только в двух положениях: в первом положении $\psi = 0^\circ, \chi = -\theta$ (где θ – зенитный угол ствола), а во втором – $\psi = 180^\circ, \chi = \theta$.

При использовании этих положений составляющие дрейфа, пропорциональные проекциям ускорения – осевой дебаланс ротора ДУС и квадратурные составляющие скорости ухода, являющиеся для механического носителя вектора кинетического момента основными возмущающими факторами, не оказывают влияния на точность компасирования. Влияние же составляющих корпусного ухода ДУС, обусловленных взаимодействием вращающегося ротора с неподвижными частями корпуса гироскопа, исключается при вычислении тригонометрических функций угла азимута:

$$\sin A = \frac{\omega_{Y2Г} - \omega_{Y1Г}}{2\Omega \cos \varphi}, \quad \cos A = \frac{\omega_{X1Г} - \omega_{X2Г}}{2\Omega \cos \varphi},$$

где A – азимут скважины; Ω – угловая скорость вращения Земли; φ – широта места; $\omega_{X1Г}, \omega_{Y1Г}, \omega_{X2Г}, \omega_{Y2Г}$ – выходные сигналы осей чувствительности X и Y ДУС, измеренные соответственно в первом и втором положениях.

Как показывают предварительные оценки, при реализации инвариантного компасирования в системе подземной навигации с ДУС типа динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ) погрешность определения азимута на высоких широтах не превысит $\pm 1^\circ$.

Таким образом, диаметрально схема построения системы подземной навигации позволяет обеспечить высокую точность определения азимута на любых широтах. Здесь уместно отметить, что ни в одной современной gMWD-системе мировых сервисных компаний (например, таких, как Baker Hughes Inteq (США), Scientific Drilling (США)) такая задача не решается.

Проектирование компоновки модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации

Не вызывает сомнения утверждение, что для освоения углеводородных месторождений как на суше, так и на море должно использоваться такое оборудование, которое обеспечивало бы безопасное и рентабельное проведение работ в целом. Однако освоение морских месторождений отличается значительно большей сложностью, а цена ошибок в условиях арктических морей еще выше, чем в теплых [4]. Проектирование сложных технических средств для условий Арктики, в частности, вышеназванной гироскопической системы подземной навигации, невозможно без предварительных прочностных, температурных и других расчетов ее ответственных элементов.

Ниже приводятся результаты предварительных расчетов конструкции компоновки МО рассматриваемой системы, полученные при использовании расчетных методов проектирования, в частности, модулей инженерного анализа SolidWorks Simulation и Pro/ENGINEER Mechanical, а также систем автоматизированного проектирования КОМПАС-3D V10 и SolidWorks 2009.

Конструкция. При конструировании gMWD-системы и ее модулей разработчики, прежде всего, сталкиваются со следующими основными проблемами: выбор технических решений по обеспечению требуемых габаритов системы; выбор максимально возможной степени защиты всех узлов системы от воздействия ударов и вибраций; выбор конструкции, комплектующих и элементной базы, обеспечивающих надежную работу в условиях повышенных температур и давлений.

В самом начале разработки конструкции МО рассматриваемой системы предполагалось использовать те же самые конструктивные решения, которые были приняты несколько лет тому назад в ЦНИИ «Электроприбор» при создании МО универсальной забойной телеметрической системы УЗТС–90, предназначенной, в основном, для измерений при проводке боковых стволов в скважинах старого фонда. МО УЗТС–90 с продольной компоновкой имел следующие габаритные размеры: внутренний диаметр – 38 мм, наружный – 44,5 мм. Однако проведенные прочностные расчеты для реализации в указанных габаритах диаметральной кинематической схемы и используемого типа ДНГ дали неудовлетворительный результат. Тогда было принято решение несколько увеличить габаритные размеры проектируемого МО (внутренний диаметр – 40 мм, наружный – 48 мм) с тем, чтобы рассматриваемая система подземной навигации могла быть встроена в компоновку низа буровой колонны (КНБК) с наружным диаметром не менее 114 мм. Применение такой КНБК хорошо согласуется с мнением ряда ученых, которые считают целесообразным при бурении арктических скважин увеличивать диаметры долота и соответственно диаметры бурильной колонны в целях снижения вероятности затяжек и прихватов инструмента [5].

На рис. 2 приведен вариант конструктивной компоновки МО гироскопической системы подземной навигации для КНБК с наружным диаметром 114 мм, а на рис. 3 показана модель сборки блока чувствительных элементов (БЧЭ) МО и узлов его разворотов.



Рис. 2. Трехмерная модель конструктивной компоновки модуля ориентации гироскопической системы подземной навигации

Дадим следующие пояснения к введенным на рис. 3 обозначениям. Приведение в движение установленного на подшипниках качения 5 вращающегося вала с БЧЭ 7 осуществляется с помощью электромотора с редуктором 2 и зубчатого колеса 3 внутреннего зацепления, установленного непосредственно на вращающемся валу. Фиксация блока производится с помощью арретирующего устройства 6 на основе

электромагнита. Угол продольного разворота БЧЭ считывается с кодового диска с помощью блока фото-транзисторов датчика углового положения 4. Для обеспечения вращения гироскопа 11, находящегося в БЧЭ, применяется малогабаритный электромотор с редуктором 8. Для передачи вращающего момента на корпус гироскопа используются коническая и цилиндрическая пары зубчатых колес 10. Непосредственно на корпусе ДУС установлено колесо специальной формы, чтобы вписать гироскоп в цилиндрический корпус 12. В качестве датчика углового положения ДУС используется абсолютный оптический энкодер 9. Управление работой элементов БЧЭ и приводами разворотов на углы ψ и χ осуществляется контроллером, установленным на плате блока управления 1.

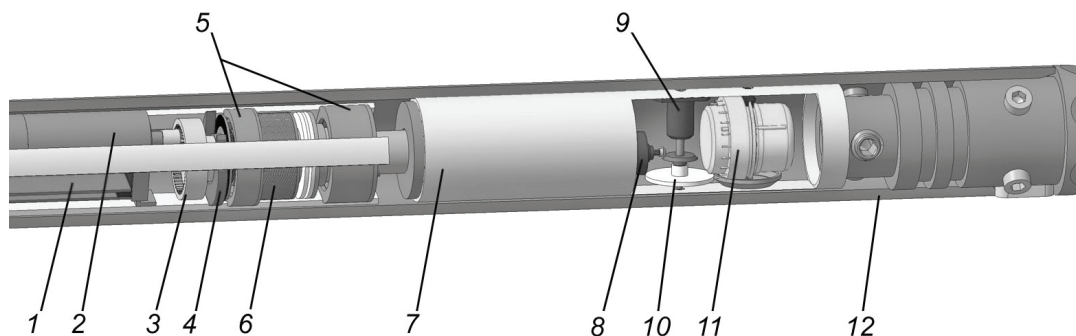


Рис. 3. Узлы разворотов блока чувствительных элементов модуля ориентации на углы ψ и χ

Расчет собственных частот механических колебаний конструкции модуля ориентации. Одной из важнейших проблем при конструировании модулей gMWD-системы является их защита от перегрузок, возникающих от вибраций и ударов при бурении. В соответствии с требованиями [5], а также с требованиями обеспечения условий эксплуатации MWD-систем (Measurements While Drilling) (например, MWD-системы английской фирмы «Geolink»), уровень вибрации при бурении может достигать 20–30 g при частотах от 30 Гц до 300 Гц [5].

Расчет собственных частот конструкции МО производится с целью выявления того, насколько данные частоты отстоят от диапазона частот вибрации. Результат проведенного модального анализа, показавшего, что собственные частоты проектируемой конструкции МО лежат вне заданного диапазона частот вибрации, приведен в таблице.

№ моды	Частота, Гц
1	564,1
2	634,8
3	1796,4

Таблица. Собственные частоты механических колебаний конструкции МО

Предварительный прочностной расчет конструкции модуля ориентации. Проведенные в условиях испытательного центра ЦНИИ «Электроприбор» испытания ДНГ показали, что гироскоп выдерживает максимальную ударную нагрузку в 400 g продолжительностью 3–5 мс. По этой причине при проведении прочностного расчета конструкции МО авторы посчитали наиболее целесообразным рассмотреть воздействие такого же удара. Что касается требований упомянутого выше стандарта [6], то в нем приведены ударные нагрузки, значения которых значительно ниже. Для исследования реакции на удар была создана упрощенная модель конструкции МО, позволяющая сгенерировать сетку конечных элементов, оптимально использующую имеющиеся вычислительные ресурсы. В то же время данная модель дает возможность исследовать именно критические с точки зрения ударных воздействий части компоновки.

Результаты проведенного расчета показали, что исследуемый вариант компоновки МО имеет двукратный запас прочности, вполне достаточный для защиты конструкции от воздействия ударов. На рис. 4 показано распределение эквивалентных напряжений в модели конструкции МО в момент удара.

Исследование температурного режима работы модуля ориентации. Для проведения исследования вышеназванного режима работы МО необходимо рассмотреть характер изменения температуры в скважинах арктического шельфа.

Прежде всего, такие скважины характеризуются наличием многолетнемерзлых пород (ММП) и субмаринной криолитозоны. По общим закономерностям распределения отрицательных температур придонного слоя допускается возможность распространения мерзлых пород под дном арктических морей приблизительно до глубины 400–600 м, температура пород в этом слое меняется в пределах от -8°C до $-$

5°C. Вместе с тем, некоторые исследователи считают [7], что существует вторая и даже третья зона ММП, поэтому можно предположить, что ММП залегают под дном морей до глубины примерно 1500 м, температура глубоко расположенных мерзлых пород находится в пределах от – 6°C до – 1°C. Поскольку сплошность криолитозоны является прерывистой, температура на участках скважин глубиной более 500 м уже может иметь положительные значения, которые начинаются с температуры около +10°C на глубине 500 м и становятся равными примерно +80°C на глубине 3000 м.

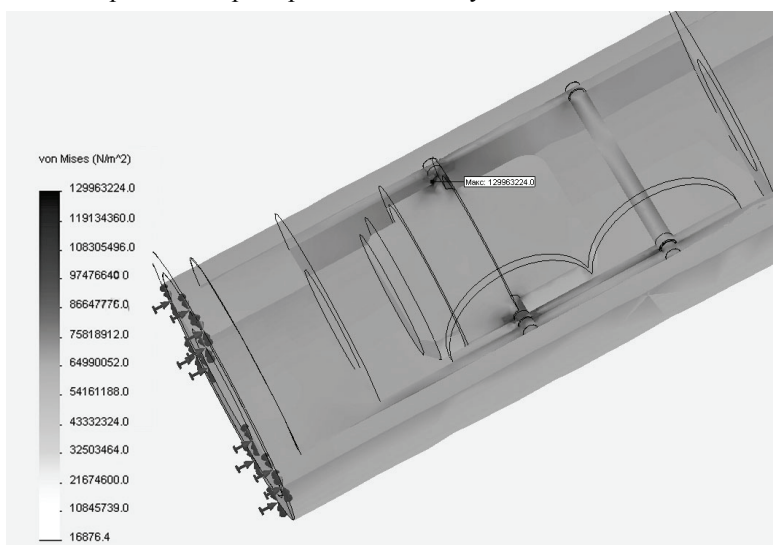


Рис. 4. Динамический анализ ударной нагрузки. Распределение эквивалентных напряжений в модели в момент удара

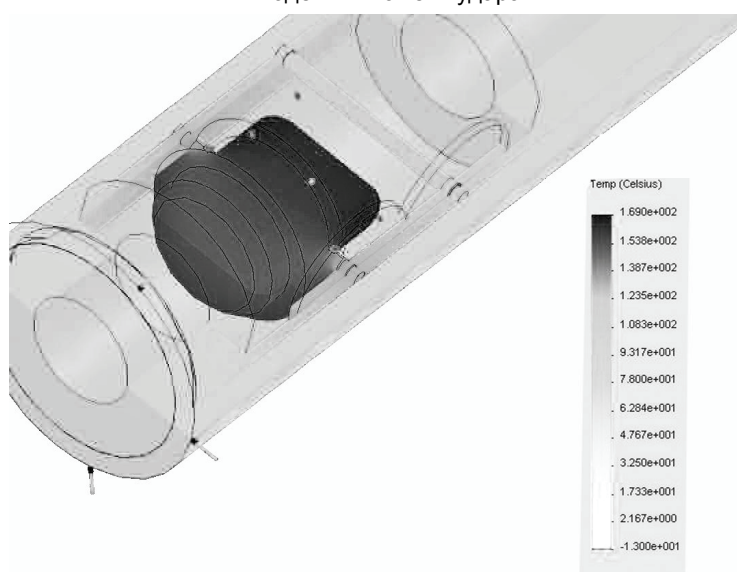


Рис. 5. Анализ стационарной теплопередачи для оценки воздействия на модель постоянной тепловой нагрузки. Распределение температур в модели

Собственно исследование температурного режима МО должно ответить на следующие вопросы: может ли работать в условиях арктических скважин применяемая в ДНГ система термостабилизации, возникают ли температурные градиенты в МО и как они влияют на точность выработки угловых параметров скважины.

Результаты температурного расчета, приведенные на рис. 5, позволяют сделать вывод о том, что мощности штатного обогревателя, установленного на корпусе ДНГ, вполне достаточно для обеспечения работоспособности системы термостабилизации для поддержания температуры гироскопа на уровне +80°C в условиях арктических скважин. По картине распределения температур в модели тепловой нагрузки МО (рис. 5) можно также предварительно оценить уровень температурных градиентов в пределах корпуса гироскопа. Однако, несмотря на достаточно малые перепады температур (единицы градусов), зависимость точности выработки азимута от величин температурных градиентов нуждается в дальнейших исследованиях.

Заключение

Изложен современный подход к проектированию компоновки модуля ориентации gMWD-системы для проводки скважин на шельфовых месторождениях Арктики. Модуль ориентации реализует диаметрально противоположную схему построения гироскопической системы подземной навигации, обеспечивающую требуемую точность ориентации скважин в высоких широтах. В рамках дальнейших исследований предполагается более детальная проработка узлов разворота датчика угловой скорости и анализ влияния температурных градиентов модуля ориентации на точность выработки угловых параметров скважины. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 11-08-00476).

Литература

1. Лочехин А.В., Емельянец Г.И. Начальная выставка и калибровка бескарданного гироскопического компаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 62–69.
2. Биндер Я.И. Универсальный гироскопический датчик с ориентацией главной оси двухосного датчика угловой скорости в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. – 2005. – № 4. – С. 23–31.
3. Биндер Я.И., Соколов Д.А. Управление разворотом корпуса скважинного прибора в инклинометрах с ориентацией главной оси гироскопа в диаметральной плоскости скважины // Гироскопия и навигация. – 2008. – № 2. – С. 84–87.
4. Papusha A.N., Fedorov I.V., Shtrasser V.V. Symbolic evaluation of boundary problem for offshore design technology // The Mathematica Journal. – 2008. – V. 11. – № 3. – P. 107–128.
5. Оганов Г., Обухов С., Гряколов А., Позднышев С., Хоштария В., Гимаева Ж., Агазаде А. Первый отечественный опыт проектирования строительства скважин с большим отклонением ствола от вертикали на арктическом шельфе // Технология ТЭК. – № 4 (23). – С. 42–48.
6. ГОСТ 26116-84. Аппаратура геофизическая скважинная. – Введ. 01.01.1986. – М.: Госстандарт, 1986. – 48 с.
7. Козлов С.А. Инженерная геология Западно-Арктического шельфа России // Труды НИИГА-ВНИИОкеангеология. – СПб: ВНИИОкеангеология, 2004. – Т. 206. – С. 139–147.

Гордеев Юрий Михайлович – ОАО «Электромеханика», младший научный сотрудник, 133880@gmail.com

Падерина Татьяна Владимировна – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, paderinata@rambler.ru

Соколов Дмитрий Александрович – ОАО «Электромеханика», старший научный сотрудник, d.a.sokolov@mail.ru

УДК 621.37

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ МАЛОЗАМЕТНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

А.В. Коротков

Рассматривается задача частотно-временного анализа сигналов малоаметных радиолокационных станций с помощью вейвлет-преобразования. Показана эффективность применения метода, приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, частотно-временной анализ, сигналы радиолокационных станций.

Введение

В современном мире большое внимание уделяется развитию радиолокации. Широкое распространение получили малоаметные сигналы радиолокационных станций (МРЛС). Сигналы таких станций излучаются на уровне шума в широкой полосе и имеют большую длительность, что существенно затрудняет их распознавание. Для анализа сигналов таких станций применение классических методов, основанных только на модификациях преобразования Фурье [1], оказывается малоэффективным. Актуальной становится задача разработки новых методов анализа сигналов МРЛС.

В работе предлагается применение вейвлет-преобразования (ВП) для анализа сигналов МРЛС.

Вейвлет-преобразование

Данное преобразование основано на алгоритме Мала [2]. Оно выполняется при помощи так называемого банка квадратурно-зеркальных фильтров (КЗФ), посредством которых входной одномерный сигнал раскладывается на высоко- и низкочастотные компоненты (рис. 1).

Коэффициенты аппроксимации j -го уровня разложения, получаемые на выходе низкочастотного фильтра с импульсной характеристикой G , отображают медленно изменяющиеся компоненты исходного

сигнала, а коэффициенты детализации, являющиеся результатом применения высокочастотного фильтра с импульсной характеристикой H , представляют высокочастотные спектральные составляющие.

После свертки входного сигнала с импульсными характеристиками фильтров производят операцию прореживания в два раза. Выход каждого уровня преобразования образует матрицу.

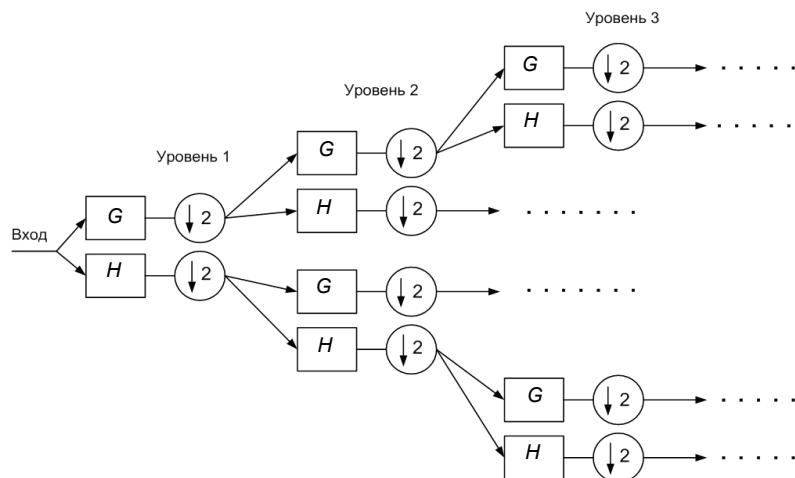


Рис. 1. Схема вейвлет-преобразования

Разрешение по частоте и времени определяется формулами

$$\Delta f = \frac{f_s}{2(2^j - 1)} \quad \Delta t = \frac{n}{f_s(2^{L-j} - 1)},$$

где f_s – частота дискретизации; L – число слоев банка КЗФ; j – номер текущего уровня; n – количество отсчетов входного сигнала. В качестве фильтра применяется модифицированный sinc-фильтр, коэффициенты которого рассчитываются по следующей формуле:

$$h(n) = \sqrt{\frac{S}{2}} \text{sinc}\left(\frac{n+0,5}{C}\right) \omega(n),$$

где C – коэффициент сжатия, S – коэффициент масштабирования, а $\omega(n)$ – окно Хемминга. Параметры C и S могут быть найдены с использованием следующей итерационной процедуры. Вначале изменяют C так, чтобы $|H(\pi/2)| = 1$. Затем вычисляют коэффициенты $h(n)$, а S устанавливают равным $\frac{1}{\sum_n [h(n)]^2}$.

Этот процесс повторяется, пока C не сойдется. Используя данный подход, можно декомпонировать сигнал и измерить его параметры – ширину спектра, среднюю частоту и закон модуляции.

Применение ВП для анализа сигналов МРЛС

Основными видами внутриимпульсной модуляции, применяемой в МРЛС, являются: частотная модуляция (ЧМ), частотная и фазовая манипуляции и их комбинации. Наиболее распространенной является ЧМ с линейно изменяющейся частотой (ЛЧМ). Для кодирования фазы зондирующего сигнала широко используются коды Баркера, полифазные коды Франка, P1, P2, P3 и P4 [3].

ВП сигналов, содержащих коды Баркера. Кодовые последовательности Баркера представляют собой двоичную фазовую манипуляцию. Фаза сигнала может принимать два значения – 0° и 180° . Виды кодовых последовательностей Баркера представлены в таблице.

Длина кода	Элементы кода	Уровень боковых лепестков, дБ
2	+ −, + +	−6,0
3	+ + −	−9,5
4	+ + − +, + + + −	−12,0
5	+ + + − +	−14,0
7	+ + + − − + −	−16,9
11	+ + + − − − + − − + −	−20,8
13	+ + + + − − + − + − + −	−22,3

Таблица. Коды Баркера

В качестве примера рассмотрен сигнал со следующими параметрами: частота несущей $f_n=2,1$ ГГц, полоса сигнала 250 МГц, код Баркера длины 11, частота дискретизации $f_s=10$ ГГц.

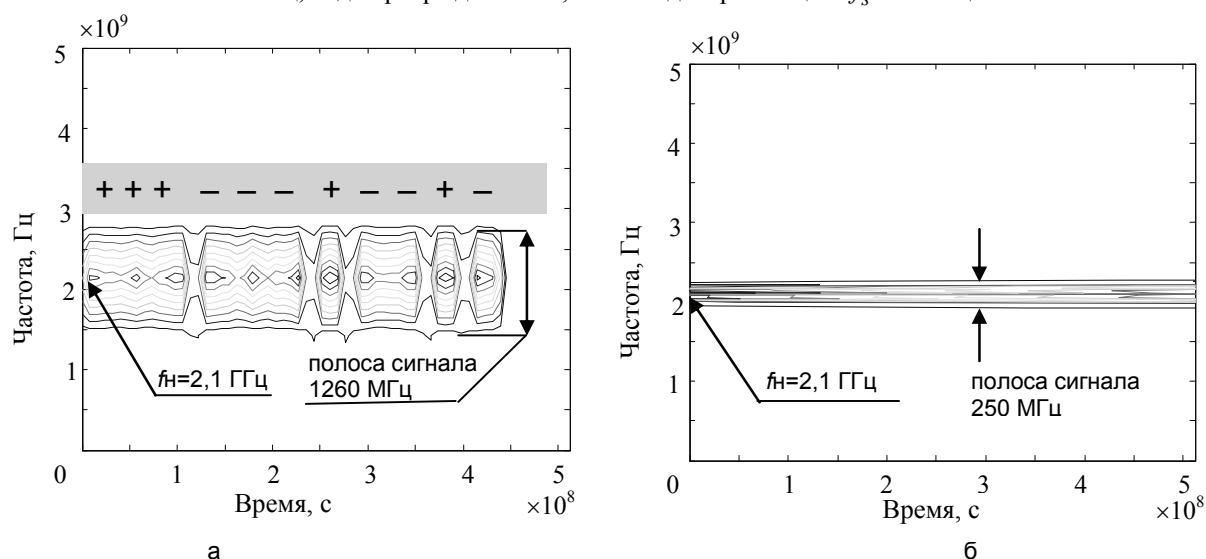


Рис. 2. Код Баркера – ВП уровень 3 (а); ВП уровень 8 (б)

На рис. 2, а, видно, что ВП позволяет однозначно определить несущую частоту, тип модуляции и вид кодовой последовательности. При этом полоса сигнала отличается от заданной вследствие низкого частотного разрешения на этом уровне декомпозиции. В то же время 8 уровень (рис. 2, б) дает точную информацию о значении данного параметра, но не позволяет выявить закон модуляции.

ВП сигналов, содержащих полифазные коды. Формулы, описывающие закон изменения фазы и частоты кодов, имеют следующий вид:

$$\text{код Франка } \varphi_{i,j} = \frac{2\pi}{N}(i-1)(j-1);$$

$$\text{код P1 } \varphi_{i,j} = \frac{-\pi}{N}[N-(2j-1)][(j-1)N+(i-1)];$$

$$\text{код P2 } \varphi_{i,j} = \frac{-\pi}{N}(2i-1-N)(2j-1-N);$$

$$\text{код P3 } \varphi_i = \frac{\pi}{N}(i-1)(i-1);$$

$$\text{код P4 } \varphi_i = \pi \frac{(i-1)^2}{N} - \pi(i-1),$$

где i – номер отсчета на заданной частоте; j – номер частоты; $\varphi_{i,j}$ – фаза i -го отсчета j -ой частоты;

N^2 – длина кода (для кода P3 и P4 длина кода равна N). В качестве примера рассмотрим сигнал со следующими параметрами: полоса сигнала 1 ГГц; код Франка $N=4$; частота дискретизации $f_s=10$ ГГц.

ВП кода Франка позволяет определить все параметры исходного сигнала. При этом необходим просмотр нескольких уровней. Так на рис. 3, б, можно наблюдать 16 максимумов энергии, что соответствует длине кода N^2 .

ВП ЛЧМ сигнала. В качестве примера рассмотрим сигнал со следующими параметрами: девиация частоты 1 ГГц, частота дискретизации $f_s=10$ ГГц (сигнал представляет собой четыре ЛЧМ участка с периодом 0,1 мкс).

Результаты представлены на рис. 4. Достаточно точно определены основные параметры ЛЧМ сигнала – вид модуляции, девиация частоты, период.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- в условиях априорной неопределенности, применение вейвлет-преобразования требует просмотра нескольких уровней декомпозиции и выбора наиболее информативного;
- частотная манипуляция может быть лучше определена на высших уровнях разложения ВП, а фазовая – на низших.

- ВП позволяет получить высокое частотно-временное разрешение, что дает возможность анализировать сложные сигналы.

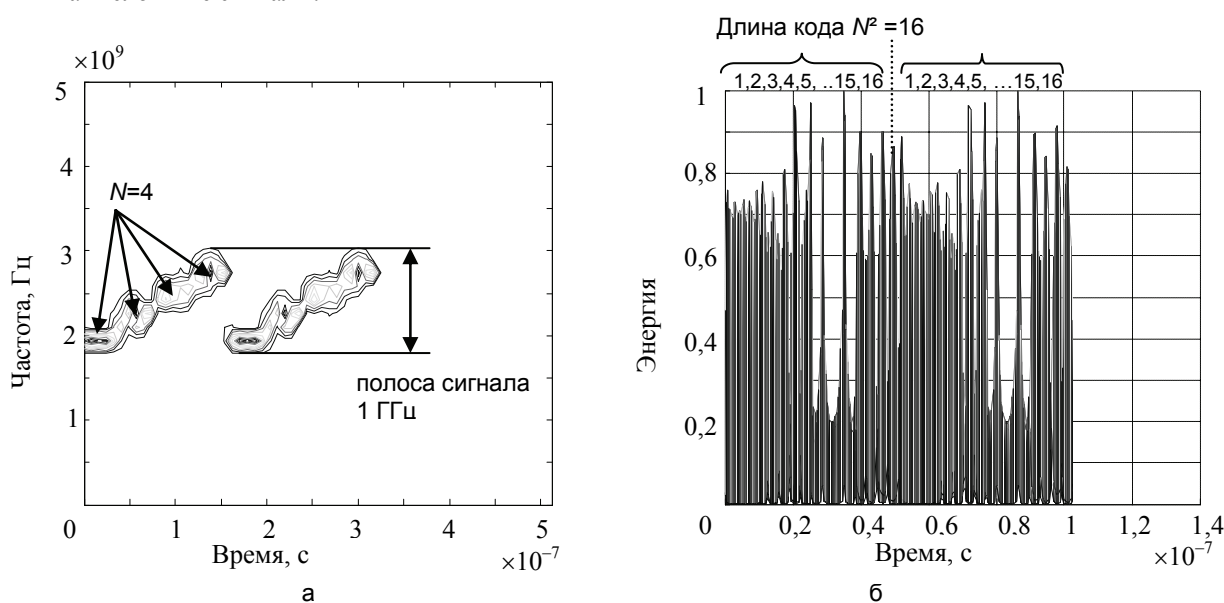


Рис. 3. Код Франка – ВП уровень 5 (а); ВП уровень 2 (б)

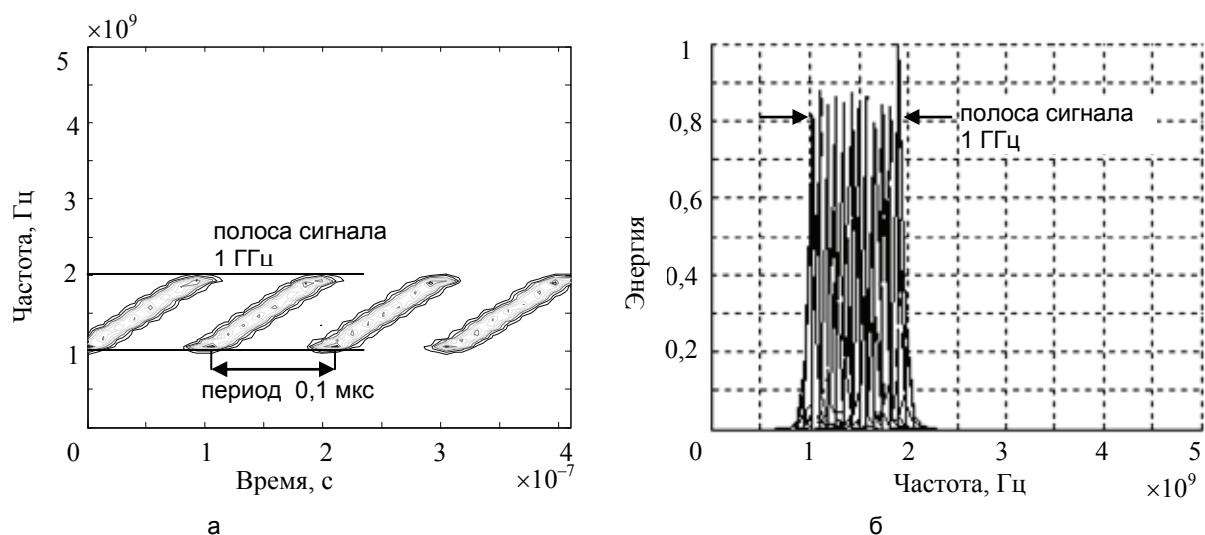


Рис. 4. ЛЧМ сигнал, ВП уровень 7 – временная диаграмма (а); спектрограмма(б)

Заключение

Вейвлет-преобразование позволяет определять основные параметры сигналов с различными видами модуляции. Эта информация может быть в дальнейшем использована для принятия решения о типе источника излучения. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения вейвлет-преобразования для анализа сигналов малозаметных радиолокационных станций.

Литература

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
2. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
3. Pace Phillip E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar. – Artech House, 2009. – 857 p.

Коротков Андрей Владимирович – ОАО «НИИ Вектор», инженер, Andrey.k0206516@mail.ru

УДК 538.566

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ПРИЗЕМНЫМИ АНТЕННАМИ

С.Т. Рыбачек, М.А. Белянский

Рассматривается проблема определения электромагнитных полей, создаваемых в нижней ионосфере (50–500 км) приземными низкочастотными антеннами. Решение строится методом нормальных волн в рамках моделей сферического волновода Земля–ионосфера, радиально неоднородной анизотропной ионосферы, произвольной ориентации геомагнитного поля и электрических и магнитных диполей. Определение полей в ионосфере на больших высотах в области неустойчивости решения сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений для касательных компонент полей проникающей собственной волны. На меньших высотах интегрируется комбинация дифференциальных уравнений для адмитанса и для касательных компонент собственных волн. Начальные условия задаются в приближении ВКБ (Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна). С помощью обобщенных теорем взаимности получена связь между компонентами полей, возбуждаемыми в ионосфере различными приземными излучателями.

Ключевые слова: электромагнитные поля, анизотропная ионосфера, низкочастотные антенны.

Введение

Проблема распространения низкочастотных (НЧ) радиоволн 0,3–30 кГц в ионосфере Земли относится к ряду сравнительно новых. Впервые возможность просачивания волн этого диапазона в ионосферу и магнитосферу Земли отметил Т.Л. Эккерслеи [1] в 1935 г. Исследования свистящих атмосфериков позволили предложить [2] и развить [3] механизм распространения НЧ волн по траекториям, близким к силовым линиям геомагнитного поля, который до сих пор широко используется для интерпретаций экспериментальных данных наряду с другими [4]. Однако возможности исследования структуры ионосферных полей с помощью НЧ источников естественного происхождения ограничены. Более перспективными для диагностики ионосферной плазмы оказались эксперименты по регистрации сигналов наземных НЧ радиостанций с помощью аппаратуры, установленной на борту искусственных спутников Земли (ИСЗ) [5], а также проводимые в течение последних десятилетий в ряде стран эксперименты по регистрации наземными станциями электромагнитных полей, возбуждаемых НЧ антеннами, расположенными на ИСЗ. Эксперименты, выполненные в г. Горьком в 1973–1974 г.г., показали, что при воздействии на нижнюю ионосферу мощным высокочастотным модулированным по амплитуде излучением возникает НЧ излучение на частоте модуляции. Это открытие привлекло внимание исследователей к более низким, по сравнению со спутниковыми, высотам расположения излучателей.

К настоящему времени опубликованы многочисленные теоретические исследования по разработке моделей сред распространения и методов расчета полей. Большая часть из них посвящена распространению радиоволн либо в ионосфере [6, 7], либо в приземном волноводе [8, 9]. Значительное число работ посвящено также комплексной проблеме излучения антенн в плазме с последующим распространением до земной поверхности [10, 11]. Гораздо меньше публикаций имеется по второй комплексной проблеме излучения наземных антенн с последующим распространением в ионосфере [12]. Как правило, в работах по обеим комплексным проблемам используется модель плоского волновода и рассматриваются частные случаи ориентации геомагнитного поля и диполей, моделирующих антенны.

Вторая комплексная проблема рассматривалась авторами в [12–13] как вспомогательная задача при исследовании возбуждения приземного волновода антеннами, расположенными на ИСЗ, и в работе [14], связанной с возможностью предсказания землетрясений. Публикации по этой теме имеют пробелы, связанные с изучением ионосферных полей на высотах ~ 50–120 км, а также по охвату значений параметров, влияющих на НЧ поля на больших высотах. Вследствие этого возникает необходимость более полного изучения структуры радиополей, создаваемых приземными НЧ излучателями в нижней ионосфере.

Постановка задачи

Обсуждаемая проблема сводится к ряду волноводных задач и к интегрированию уравнений Максвелла для анизотропной ионосферы. Волновод Земля – ионосфера моделируется сферической полостью со свойствами свободного пространства (вводится сферическая система координат r, θ, φ с началом в центре Земли). Ионосфера описывается уравнениями для полей в приближении холодной плазмы, нелинейные эффекты не учитываются. Свойства ионосферы полагаются зависящими лишь от радиальной координаты, вектор геомагнитного поля имеет произвольную ориентацию. Антенны моделируются элементарными электрическими и магнитными диполями произвольной ориентации, расположенными в полости волновода при $r = b, \theta = 0$. В работе используется система СИ и зависимость от времени $\exp(-i\omega t)$.

Волноводные задачи сводятся к уравнениям Максвелла для полости волновода

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = ik\mathbf{H}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = -ik(\mathbf{E} + \mathbf{p}_e / \varepsilon_0), \quad (1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -ik(\mathcal{H} + z_0 \mathbf{p}_m / \mu_0), \quad \text{rot } \mathcal{H} = -ik\mathbf{E}. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) $\mathbf{p}_e$ и $\mathbf{p}_m$ – объемные плотности дипольных моментов электрического и магнитного диполей, $\mathcal{H} = z_0 \mathbf{H}$, а k, ε_0, μ_0 и z_0 – волновое число, диэлектрическая и магнитная проницаемости и характеристический импеданс вакуума соответственно. Граничные условия на нижней стенке волновода ($r = a$) описываются матрицей импеданса Земли, а на верхней стенке ($r = d$) – матрицей адмитанса ионосферы [15]:

$$\begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\delta \\ \delta & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_\theta \\ H_\phi \end{pmatrix}, \quad r = a; \quad \begin{pmatrix} H_\theta \\ H_\phi \end{pmatrix} = \hat{a} \begin{pmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{pmatrix}, \quad r = d. \quad (3)$$

Здесь δ – приближенный поверхностный импеданс Земли. Кроме того, должны быть выполнены условия ограниченности полей $\mathbf{E}$ и $\mathcal{H}$ при $\theta = 0, \pi$ и условия их убывания при $r \rightarrow \infty$. Общее решение уравнений Максвелла дается суперпозицией двух фундаментальных решений. Поперечно-магнитное поле описывается электрическим $\Pi_e = \Pi_e \mathbf{e}_r$, а поперечно-электрическое магнитным $\Pi_m = \Pi_m \mathbf{e}_r$ потенциалами Герца. В области вне источников связь полей с потенциалами имеет следующий вид:

$$\mathcal{H}_e = -ik \text{rot } \Pi_e, \quad \mathbf{E}_e = \text{rot rot } \Pi_e, \quad \mathbf{E}_m = ik \text{rot } \Pi_m, \quad \mathcal{H}_m = \text{rot rot } \Pi_m. \quad (4)$$

Волноводные задачи

Основной является задача для радиального электрического диполя. Решение строится методом нормальных волн в виде разложения по собственным функциям радиального оператора, который определяется дифференциальными уравнениями и граничными условиями, вытекающими из (3):

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + k^2 \right) \begin{pmatrix} R_{v-1/2}^{(e)}(kr) \\ R_{v-1/2}^{(m)}(kr) \end{pmatrix} = \frac{v^2 - 1/4}{r^2} \begin{pmatrix} R_{v-1/2}^{(e)}(kr) \\ R_{v-1/2}^{(m)}(kr) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$R_{v-1/2}^{(e)'}(kr) = -i\delta R_{v-1/2}^{(e)}(kr), \quad R_{v-1/2}^{(m)'}(kr) = -iR_{v-1/2}^{(m)}(kr)/\delta, \quad r = a \quad (6)$$

(граничные условия при $r = d$ не выписываются). В (6) штрих обозначает производную по аргументу. Спектральная задача (5), (6) позволяет найти собственные функции и уравнение для собственных значений v_s ($s=1, 2, \dots$). В результате для потенциалов получаем следующие ряды нормальных волн:

$$\begin{pmatrix} \Pi_e \\ \Pi_m \end{pmatrix} = -\frac{P_e}{4\varepsilon_0 k b^2} \sum_{v=v_s} R_{v-1/2}^{(e)}(kb) \begin{pmatrix} R_{v-1/2}^{(e)}(kr) \\ \chi_{v-1/2} R_{v-1/2}^{(m)}(kr) \end{pmatrix} \frac{P_{v-1/2}(-\cos \theta)}{N_{v-1/2} \cos(v\pi)}. \quad (7)$$

Здесь P_e – величина дипольного момента электрического диполя, а v ; $R_{v-1/2}^{(i)}(kr)$, ($i=e, m$); $\chi_{v-1/2}$; $N_{v-1/2}$ при $v=v_s$ – собственные значения и функции, коэффициент поляризации и норма оператора. Использование асимптотик функций Лежандра [16]

$$P_{v-1/2}(\cos \theta) = [2/(\pi v \sin \theta)]^{1/2} \sin(v\theta + \pi/4), \quad |v|\theta \gg 1, \quad |v|(\pi - \theta) \gg 1, \quad (8)$$

и замена функции $[\cos(v\pi)]^{-1}$ геометрической прогрессией позволяют пренебречь в (7) кругосветными и антиподными волнами и ограничиться рассмотрением прямой волны, пришедшей от источника в точку наблюдения по кратчайшему расстоянию. При этом зависимость потенциалов от угла θ принимает вид

$$(\sin \theta)^{-1/2} \exp(iv\theta). \quad (9)$$

Касательные компоненты полей в полости волновода в области вне источников можно определить, дифференцируя потенциалы (7) в соответствии с (4). Радиальные компоненты удобно найти, используя связь спектральных задач для поперечного и продольного операторов:

$$\begin{pmatrix} E_r \\ H_r \end{pmatrix} = \frac{1}{r^2} \sum_{v=v_s} (v^2 - 1/4) \begin{pmatrix} \Pi_{es} \\ \Pi_{ms} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Здесь Π_{es} , Π_{ms} – отдельные члены рядов (7). Решение волноводных задач для других излучателей опирается на решение для радиального электрического диполя. В случае радиального магнитного диполя используется принцип перестановочной двойственности для анизотропных сред [12], который позволяет построить решение с помощью перестановок компонент полей и параметров в формулах, описывающих решение для радиального электрического диполя. Поля касательного к границам раздела электрического диполя можно найти, применяя обобщенную теорему взаимности для анизотропных сред [17]:

$$E_\xi^{e\zeta}(1, \mathbf{H}_0) = E_\xi^{e\zeta}(2, -\mathbf{H}_0), \quad H_\xi^{e\zeta}(1, \mathbf{H}_0) = -g E_\xi^{m\zeta}(2, -\mathbf{H}_0), \quad (11)$$

$$g E_\xi^{m\zeta}(1, \mathbf{H}_0) = -H_\xi^{e\zeta}(2, -\mathbf{H}_0), \quad H_\xi^{m\zeta}(1, \mathbf{H}_0) = H_\xi^{m\zeta}(2, -\mathbf{H}_0), \quad g = z_0 P_e P_m^{-1}.$$

Абсолютные значения дипольных моментов в теореме взаимности для двух электрических диполей полагаются одинаковыми и обозначаются P_e . Аналогичные значения для магнитных диполей обо-

значены P_m . В (11) 1 и 2 – две пространственные точки. Индексы e и m у компонент полей относятся к электрическим и магнитным диполям соответственно, так что $E_{\xi}^{e\zeta}(1, \mathbf{H}_0)$ и $H_{\xi}^{e\zeta}(1, \mathbf{H}_0)$, например, – ξ – компоненты полей, создаваемые в точке 2 расположенным в точке 1 электрическим диполем с дипольным моментом $\mathbf{P}_e$, ориентированным вдоль орта $\mathbf{e}_{\zeta}(\xi, \zeta = r, \theta, \varphi)$, при этом геомагнитное поле есть $\mathbf{H}_0$. Радиальные компоненты электрического (магнитного) поля горизонтального электрического (магнитного) диполя можно найти, используя теоремы взаимности для такого диполя и вспомогательного радиального электрического (магнитного) диполя. Далее с помощью (10) определяются потенциалы, дифференцируя которые по координатам в соответствии с формулами (4), можно найти касательные компоненты электрического и магнитного полей. Аналогично находятся поля горизонтального магнитного диполя.

Поля в ионосфере

Уравнения Максвелла в анизотропной ионосфере имеют вид

$$\text{rot } \mathbf{E} = ik \hat{\boldsymbol{\epsilon}} \mathbf{H}, \quad \text{rot } \mathbf{H} = -ik \hat{\boldsymbol{\epsilon}}'_m \mathbf{E}, \quad (12)$$

где $\hat{\boldsymbol{\epsilon}}'_m$ – тензор относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды. Асимптотическое разделение переменных в уравнениях (12), базирующееся на использовании асимптотик (8), позволяет, учитывая (9) и опуская индекс s у собственного значения, представить поля нормальной волны в ионосфере в виде

$$\mathbf{e}^{(v)} \exp(iv\theta)(\sin \theta)^{-1/2}, \quad \mathbf{e}^{(v)} = r \boldsymbol{\mathcal{E}}^{(v)}, \quad \boldsymbol{\mathcal{E}}^{(v)} \equiv \{E_0^{(v)}, E_{\varphi}^{(v)}, H_0^{(v)}, H_{\varphi}^{(v)}\}, \quad (13)$$

где $\boldsymbol{\mathcal{E}}^{(v)}$ – матрица-столбец 4×1 с компонентами, указанными в фигурных скобках. Вектор $\mathbf{e}^{(v)}$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$d\mathbf{e}^{(v)} / dx = ik \hat{T}_v \mathbf{e}^{(v)}, \quad x = kr. \quad (14)$$

Здесь $\hat{T}_v$ – матрица 4×4 , элементы которой имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} T_{11} &= -S_v \epsilon_{r\theta} / \epsilon_{rr}, \quad T_{12} = -S_v \epsilon_{r\varphi} / \epsilon_{rr}, \quad T_{14} = 1 - S_v^2 / \epsilon_{rr}, \quad T_{23} = -1, \\ T_{31} &= -\sigma_{\varphi\theta} / \epsilon_{rr}, \quad T_{32} = S_v^2 - \sigma_{\varphi\varphi} / \epsilon_{rr}, \quad T_{34} = S_v \epsilon_{\varphi r} / \epsilon_{rr}, \quad T_{41} = \sigma_{\theta\theta} / \epsilon_{rr}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T_{42} &= \sigma_{\theta\varphi} / \epsilon_{rr}, \quad T_{44} = -S_v \epsilon_{\theta r} / \epsilon_{rr}, \quad T_{13} = T_{21} = T_{22} = T_{24} = T_{33} = T_{43} = 0. \\ S_v &= \sin \alpha(v, r) = v(kr)^{-1}. \end{aligned} \quad (16)$$

В формулах (15) и (16) значения σ_{in} ($i, n = r, \theta, \varphi$) определяются элементами ϵ_{in} тензора $\hat{\boldsymbol{\epsilon}}'_m$, а $\alpha(v, r)$ – комплексный угол падения нормальной волны на ионосферу. Уравнение (14) по форме совпадает с уравнением, описывающим прохождение плоских волн в однородной анизотропной плазме [15]. Отличие состоит в том, что в рассматриваемой нами задаче свойства среды зависят от радиальной координаты, а элементы тензора $\hat{T}_v$ зависят от r и спектрального параметра v . Из четырех линейно независимых решений системы (14) граничным условиям, состоящим в требовании убывания поля при $r \rightarrow \infty$, удовлетворяют два, $\mathbf{e}_1^{(v)}$ и $\mathbf{e}_2^{(v)}$ ($\boldsymbol{\mathcal{E}}_1^{(v)}$ и $\boldsymbol{\mathcal{E}}_2^{(v)}$). На произвольной высоте в ионосфере поле нормальной волны номера s можно представить суммой собственных волн,

$$\boldsymbol{\mathcal{E}}^{(v_s)} = C_{1s} \boldsymbol{\mathcal{E}}_1^{(v_s)} + C_{2s} \boldsymbol{\mathcal{E}}_2^{(v_s)}, \quad (17)$$

где $\boldsymbol{\mathcal{E}}_p^{(v_s)}$ ($p = 1, 2$) – матрица-столбец вида (13),

$$\boldsymbol{\mathcal{E}}_p^{(v_s)} = (r \sqrt{\sin \theta})^{-1} \exp(iv_s \theta) \mathbf{e}_p^{(v_s)}. \quad (18)$$

Постоянные C_{1s} и C_{2s} в (17) определяются из условий сшивания при $r = d$ тангенциальных компонент электрического и магнитного полей нормальной волны номера s , найденных в волноводе и ионосфере. Касательные составляющие полных полей в ионосфере представляются рядами нормальных волн $\boldsymbol{\mathcal{E}} = \sum_{s=1} \boldsymbol{\mathcal{E}}^{(v_s)}$, радиальные находятся из уравнений Максвелла:

$$E_r = -(\epsilon_{rr})^{-1} \left[\epsilon_{r\theta} E_{\theta} + \epsilon_{r\varphi} E_{\varphi} + \sum_{s=1} \frac{v_s}{kr} H_{\varphi}^{(v_s)} \right], \quad H_r = \sum_{s=1} \frac{v_s}{kr} E_{\varphi}^{(v_s)}, \quad (19)$$

(формулы (19) получаются из уравнений Максвелла).

С помощью волн $\boldsymbol{\mathcal{E}}_1^{(v_s)}$ и $\boldsymbol{\mathcal{E}}_2^{(v_s)}$ (18) можно ввести адмитанс ионосферы $\hat{a}^{(v)}$ [15]

$$\begin{pmatrix} H_{10}^{(v)} & H_{20}^{(v)} \\ H_{1\phi}^{(v)} & H_{2\phi}^{(v)} \end{pmatrix} = \hat{a}^{(v)} \begin{pmatrix} E_{10}^{(v)} & E_{20}^{(v)} \\ E_{1\phi}^{(v)} & E_{2\phi}^{(v)} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Адмитанс $\hat{a}^{(v)}$ удовлетворяет матричному дифференциальному уравнению

$$d\hat{a}^{(v)} / dx = i(-\hat{a}^{(v)} B_{12} \hat{a}^{(v)} + B_{21} - \hat{a}^{(v)} B_{11} + B_{22} \hat{a}^{(v)}), \quad (21)$$

где значения B_{in} определяются элементами матрицы T_{in} (15):

$$B_{11} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, B_{12} = \begin{pmatrix} T_{13} & T_{14} \\ T_{23} & 0 \end{pmatrix}, B_{21} = \begin{pmatrix} T_{31} & T_{32} \\ T_{41} & T_{42} \end{pmatrix}, B_{22} = \begin{pmatrix} 0 & T_{34} \\ 0 & T_{44} \end{pmatrix}.$$

В волноводных задачах адмитанс $\hat{a}^{(v)}$ можно определить, интегрируя уравнения (21) для элементов матрицы адмитанса. Задавая в качестве начальных условий решения ВКБ [15] при некотором значении $r = r_0$, можно найти адмитанс $\hat{a} = \hat{a}^{(v)}$ при $r = d$, который используется в граничном условии (3). Значение r_0 соответствует верхней границе области, существенной для распространения волн в волноводе [18], и определяется параметрами задачи и заданной точностью расчета полей. Уравнения интегрируются при вычислении корня v_s характеристического уравнения при каждой итерации, при этом в соответствии с формулой (20) адмитанс несет в себе информацию об обоих решениях, $\mathcal{E}_1^{(v_s)}$ и $\mathcal{E}_2^{(v_s)}$.

Матрица адмитанса может быть рассчитана на любых высотах $H = r - a$ в ионосфере без возникновения численных неустойчивостей, однако для определения компонент ионосферных полей необходимо дополнительное интегрирование. Использование уравнений (14) на больших высотах H (порядка сотен километров) приводит к появлению таких неустойчивостей, так как из двух собственных решений только одно является существенно распространяющимся. Второе быстро затухает по мере распространения в ионосфере и на больших высотах приводит к потере линейности решений и неустойчивости распространяющейся (проникающей) волны [7]. Однако на высотах $H > H_1$ сильно затухающее решение пренебрежимо мало по сравнению с распространяющейся волной, которая в этом случае описывает полное поле. Значение H_1 зависит от параметров задачи и заданной точности решения (см. ниже). На высотах $H < H_1$ ионосферные поля можно найти, интегрируя уравнения для компонент полей (14) или комбинированную систему уравнений для матрицы адмитанса (21) и компонент полей.

Соотношения между компонентами ионосферных полей различных излучателей

Зависимость потенциалов (7) от координат для каждой отдельной нормальной волны с учетом выражений (9) описывается функциями

$$\Pi_e \sim R_{v-1/2}^{(e)}(kr) \exp(i\nu\theta)(\sin\theta)^{-1/2}, \quad \Pi_m \sim R_{v-1/2}^{(m)}(kr) \exp(i\nu\theta)(\sin\theta)^{-1/2}. \quad (22)$$

Из формул (4) и (10), опуская индексы e и m у компонент полей, можно получить

$$\begin{pmatrix} E_\theta \\ H_\theta \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} \begin{pmatrix} \Pi_e \\ \Pi_m \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} E_\phi \\ H_\phi \end{pmatrix} = \frac{ik}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \begin{pmatrix} -\Pi_m \\ \Pi_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} E_r \\ H_r \end{pmatrix} = \frac{v^2 - 1/4}{r^2} \begin{pmatrix} \Pi_e \\ \Pi_m \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Используя выражения (22), (23), полагая функцию $(\sin\theta)^{-1/2}$ медленно меняющейся по сравнению с $\exp(i\nu\theta)$ и считая, что $|\nu| \gg 1$, найдем отношения компонент полей в полости волновода

$$\begin{aligned} E_\theta / E_r &= ikr R_{v-1/2}^{(e)'}(kr) / [v R_{v-1/2}^{(e)}(kr)], \\ H_r / H_\theta &= v R_{v-1/2}^{(m)}(kr) / [ikr R_{v-1/2}^{(m)'}(kr)], \\ E_\theta / H_\phi &= R_{v-1/2}^{(e)'}(kr) / [i R_{v-1/2}^{(e)}(kr)], \quad E_\phi / H_\theta = -i R_{v-1/2}^{(m)}(kr) / [R_{v-1/2}^{(m)'}(kr)]. \end{aligned} \quad (24)$$

Если точка наблюдения располагается на поверхности Земли, то в силу граничных условий (6) отношения (24) принимают следующий вид:

$$E_\theta / E_r = ka\delta / v, \quad H_r / H_\theta = v\delta / (ka), \quad E_\theta / H_\phi = -\delta, \quad E_\phi / H_\theta = \delta.$$

Теоремы взаимности (11) позволяют получить отношения какой-либо (одной и той же) компоненты полей, возбуждаемых в ионосфере в точке 2 с координатами (r, θ) различными излучателями, расположенными в полости волновода в точке 1 $(b, 0)$. Эти отношения с учетом выражений (24) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}^{e0} &= ([ikb R_{v-1/2}^{(e)'}(kb)] / [v R_{v-1/2}^{(e)}(kb)]) \mathbf{B}^{er}, \quad \mathbf{B}^{m0} = -([i R_{v-1/2}^{(m)}(kb)] / [g R_{v-1/2}^{(m)}(kb)]) \mathbf{B}^{e\phi}, \\ \mathbf{B}^{m0} &= ([ikb R_{v-1/2}^{(m)'}(kb)] / [v R_{v-1/2}^{(m)}(kb)]) \mathbf{B}^{mr}, \quad \mathbf{B}^{e0} = ([ig R_{v-1/2}^{(e)'}(kb)] / [R_{v-1/2}^{(e)}(kb)]) \mathbf{B}^{m\phi}. \end{aligned} \quad (25)$$

Здесь вектор $\mathbf{B}^{q\xi}$ ($q = e, m; \xi = r, \theta, \varphi$) – матрица-столбец 6×1 , элементами которой являются компоненты напряженностей электрического $\mathbf{E}$ и магнитного $\mathbf{H}$ полей. При расположении излучателя на поверхности Земли ($b = a$) из выражений (25) с учетом (6) вытекает, что

$$\mathbf{B}^{e0} = g\delta \mathbf{B}^{m\varphi}, \mathbf{B}^{e\varphi} = -g\delta \mathbf{B}^{m0}, \mathbf{B}^{e0} = (ka\delta / v)\mathbf{B}^{er}, \mathbf{B}^{mr} = [v\delta / (ka)]\mathbf{B}^{m0}. \quad (26)$$

Из приближенных выражений (26) вытекает, что при анализе структуры ионосферных полей достаточно ограничиться рассмотрением лишь двух ионосферных излучателей. Результаты численных расчетов компонент полей рассмотрим в последующих работах.

Заключение

В работе изложена теория распространения в ионосфере электромагнитных волн, излучаемых источниками, расположенными вблизи поверхности Земли. В рамках моделей анизотропной, неоднородной по радиальной координате ионосферы, сферического регулярного приземного волновода, а также электрических и магнитных диполей различной ориентации она сводится к двум проблемам.

Первая проблема связана с волноводными задачами для электрических и магнитных диполей, которые решаются с помощью принципа перестановочной двойственности и обобщенных теорем взаимности для анизотропных сред.

Вторая проблема связана с нахождением полей в ионосферной плазме. Дифференциальные уравнения для матричного адмитанса и касательных компонент полей интегрируются в области ионосферных высот H_1-H_0 , где H_0 – начало ионосферного слоя. В области, расположенной выше H_1 , интегрируются лишь уравнения для касательных компонент одной «проникающей» собственной ионосферной волны, которая и описывает полное поле.

С помощью обобщенных теорем взаимности получена связь между компонентами полей, создаваемых в ионосфере электрическими и магнитными приземными диполями различных ориентаций.

Полученные теоретические результаты легли в основу алгоритмов, которые позволили провести численное исследование особенностей структуры электромагнитных полей, возбуждаемых низкочастотными антеннами, расположенными вблизи поверхности Земли. Результаты численных расчетов анализируются во второй части работы.

Литература

1. Eckersley T.L. Musical atmospherics // Nature. – 1935. – V. 135. – P. 104–123.
2. Storey L.R.O. An investigation of whistling atmospherics // Phil. Trans. Roy. Soc. – 1953. – V. 246A. – № 908. – P. 113–141.
3. Helliwell R.A. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. – Stan. Univ. Pr. – 1965. – 365 p.
4. Мальцева О.А., Молчанов О.А. Распространение низкочастотных волн в магнитосфере Земли. – М.: Наука, 1987. – 117 с.
5. Laaspere T., Johnson W.C. Additional results from an OGO 6 experiment concerning ionospheric electric and electromagnetic fields in the range 20 Hz to 540 kHz // J. Geophys. Res. – 1973. – V. 78. – № 16. – P. 2926–2944.
6. Galejs J. Stable solution of ionospheric fields in propagation of ELF and VLF waves // Radio Sci. – 1972. – V. 7. – № 5. – P. 549–561.
7. Budden K.G. The theory of coupling of characteristic radio waves in the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – V. 34. – № 11. – P. 1909–1921.
8. Galejs J. Terrestrial Propagation of Long Electromagnetic Waves. – New York: Pergamon. Press, 1972. – 362 p.
9. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля–ионосфера и в ионосфере. – М.: Наука, 1994. – 150 с.
10. Pappert R.A. Excitation of the Earth-ionosphere waveguide by point dipoles at satellite heights // Radio sci. – 1973. – V. 8. – № 6. – P. 535–545.
11. Котик Д.С., Поляков С.В., Яшнов В.А. Возбуждение волновода Земля–ионосфера низкочастотными источниками, расположенными в неоднородной ионосфере // Изв. вузов. Радиофизика. – 1978. – Т. 21. – № 7. – С. 938–944.
12. Рыбачек С.Т. Электромагнитные поля точечных диполей в волноводе Земля–ионосфера // Изв. вузов. Радиофизика. – 1985. – Т. 28. – № 4. – С. 406–415.
13. Рыбачек С.Т. Электромагнитные поля ионосферных точечных диполей в волноводе Земля–ионосфера. // Ibid № 6. – С. 703–711.
14. Borisov N., Chmyrev V., Rybachek S. A new ionospheric mechanism of electromagnetic ELF precursors to Earthquakes // Geomagn. Aeron. – 2001. – V. 63. – № 1. – P. 3–10.
15. Budden K.G. Radiowaves in the ionosphere. – Cambridge Univ. Press, 1961. – 542 p.

16. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. – М.: Наука, 1966. – 295 с.
 17. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – М.: Наука, 1967. – 683 с.
 18. Рыбачек С.Т. О влиянии существенной области ионосферного слоя на характеристики распространения СДВ // Изв. вузов. Радиофизика. – 1972. – Т. 15. – № 9. – С. 1300–1303.

Рыбачек Светлана Тимофеевна – Санкт-Петербургский государственный университет, кандидат физ.-мат. наук, доцент, rybachev_st@mail.ru

Белянский Максим Анатольевич – Санкт-Петербургский государственный университет, аспирант, maxim_belyansky@mail.ru

УДК 681.5.11

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОСИ СКАНИРОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА

В.А. Толмачев, Д.А. Субботин

Предложена векторно-матричная математическая модель и методика синтеза системы управления электропривода оси сканирования телескопа, построенной на основе бесконтактного магнитоэлектрического преобразователя с ограниченным углом поворота и замкнутой по углу поворота последнего. Проведено математическое моделирование процессов сканирования при заданных характеристиках магнитоэлектрического преобразователя и параметрах диаграммы сканирования, подтвердившее правомерность предложенной методики синтеза и возможность реализации требуемого движения исполнительной оси в режиме слежения за трапецеидальным задающим воздействием.

Ключевые слова: магнитоэлектрический преобразователь, система регулирования угла, методика синтеза, математическая модель, сканирующая ось, инфракрасный телескоп.

Введение

Основу системы наведения (СН) современного телескопа составляют опорно-поворотное устройство (ОПУ) и силовые следящие электроприводы. Например, СН инфракрасного телескопа строится на основе трехосного ОПУ с азимутальной, угломестной и сканирующей осями. На каждой из осей расположен электроагрегат, содержащий электрический двигатель, датчики угла поворота и скорости двигателя с жестко связанными валами. Синтезу систем управления прецизионными безредукторными следящими электроприводами азимутальной и угломестных осей на основе вентильных двигателей посвящены работы [1–3] и др. Специфическими являются требования к электроприводам осей сканирования. Во многих случаях они должны обеспечивать движение оси в пределах малых углов в соответствии с временной диаграммой, представленной на рис. 1.

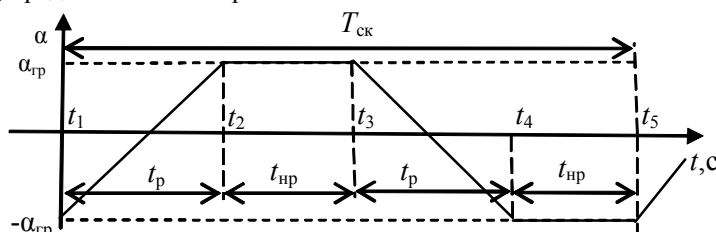


Рис. 1. Диаграмма сканирования электропривода

Полный цикл сканирования $T_{ск}$ содержит 2 участка рабочего хода (t_1-t_2 и t_3-t_4) с длительностью t_p и 2 участка нерабочего хода (t_2-t_3 и t_4-t_5) с длительностью t_{np} . На участках рабочего хода угол поворота оси должен меняться линейно в пределах от $-\alpha_{тр}$ до $+\alpha_{тр}$ с допустимой погрешностью нелинейности $\Delta_n\%$. Закон изменения угла на участках нерабочего хода не лимитируется. Длительность нерабочего хода измеряется между окончанием одного рабочего хода и началом следующего.

Параметры диаграммы и требования к точности ее воспроизведения зависят от заданного режима сканирования (в широком или узком угловом поле). Здесь будем ориентироваться на параметры диаграммы, представленные в таблице.

Режим сканирования	$\alpha_{тр},'$	$T_{ск}, c$	t_p, c	t_{np}, c	$\Delta_n\%$
Широкое угл. поле	30	2,4	1	0,2	15
Узкое угл. поле	5	0,5	0,17	0,08	10

Таблица. Параметры диаграммы сканирования

При воспроизведении диаграммы независимо от заданного режима угловые ускорения оси не должны превышать максимально допустимого значения $15^\circ/c^2$, заданного разработчиками ОПУ телескопа.

па и обусловленного механической прочностью конструкции. Время выхода на одну из границ рабочего диапазона углов из произвольной точки первоначального положения не должно превышать 0,2 с.

Ввиду достаточно малого диапазона изменения угла поворота оси сканирования для реализации электропривода нет необходимости использовать традиционные электродвигатели с неограниченным углом поворота. Перспективно применение для этих целей бесконтактных магнитоэлектрических преобразователей (МЭП) входного электрического сигнала (напряжения) в пропорциональное угловое перемещение его ротора.

В работе [4] проведен анализ статических и динамических характеристик МЭП с ограниченным углом поворота для приводов сканирования. На основе анализа обоснована целесообразность построения системы управления электропривода по двухконтурной структуре, содержащей внутренний контур динамической коррекции для демпфирования слабо затухающих угловых колебаний вала с обратной связью по скорости вала и внешний контур регулирования угла. Однако методика синтеза подобной системы и правомерность ее использования для реализации трапецеидальной диаграммы сканирования с заданными параметрами не были рассмотрены. Параметрический синтез системы управления и моделирование процессов в режимах сканирования является целью настоящей работы.

Структурная схема и математическая модель системы

Структурная схема системы управления изображена на рис. 2.

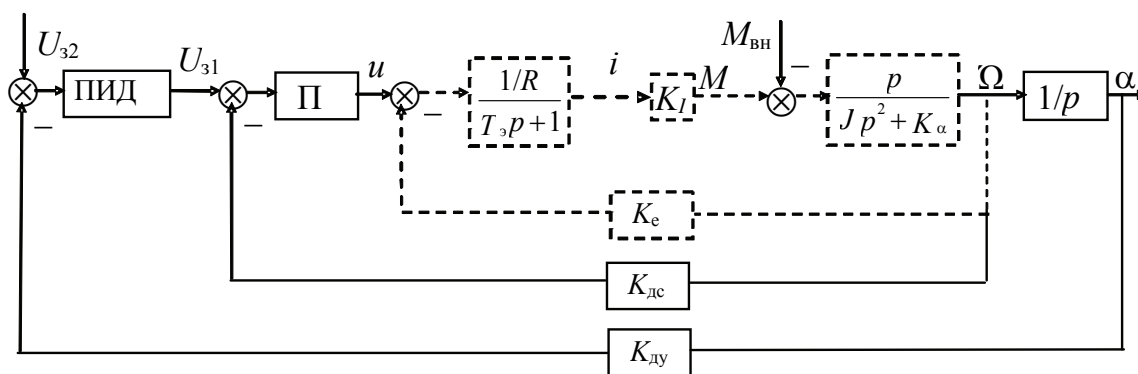


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Здесь штриховыми линиями выделены элементы и связи, образующие структурную схему собственно электромеханического преобразователя, обоснованную в работе [4]. В приведенной схеме: u и i – соответственно напряжение на обмотке управления МЭП и ток в обмотке; α и Ω – соответственно угол поворота оси и ее угловая скорость; R и L – соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки управления; K_e – крутизна противо-э.д.с.; J – суммарный момент инерции по оси сканирования; f – коэффициент момента сил вязкого трения (внутреннего демпфирования); $M_{вн}$ – суммарный момент внешних воздействий, состоящий из момента типа «сухое трение» и ветрового момента; $K_a = dM/d\alpha$ – жесткость механической характеристики или жесткость «магнитной пружины»; $K_I = dM/di$ – жесткость моментной (тяговой) характеристики или чувствительность по току. Далее при расчетах и моделировании будем ориентироваться на следующие параметры МЭП с нагрузкой: $K_a = 4500$ Н·м/рад, $K_I = 120$ Н·м/А; $K_e = 1,5$ В·с/рад; $L = 0,03$ Гн; $R = 10,5$ Ом; $J = 250$ кг·м²; $f = 0$. Электрическая постоянная времени $T_3 = L/R = 0,029$ с.

Контур динамической коррекции содержит П-регулятор с коэффициентом передачи $K_{п1}$ и датчик скорости с коэффициентом передачи $K_{дс}$. Передаточные функции внутреннего контура по задающему U_{31} и возмущающему $M_{вн}$ воздействиям при $L=0$ можно представить соответственно в виде

$$\frac{\Omega(p)}{U_{31}(p)} = \frac{pK_{\Omega}^*}{\left(\frac{1}{\omega_0^2}p^2 + \frac{K_{\Omega}^*}{\omega_0^2}p + 1\right)K_{дс}\omega_0^2}, \quad \frac{\Omega(p)}{M_{вн}(p)} = \frac{p}{\left(\frac{1}{\omega_0^2}p^2 + \frac{K_{\Omega}^*}{\omega_0^2}p + 1\right)K_a\omega_0^2},$$

где резонансная частота электромеханического преобразователя (ЭМП) равна

$$\omega_0 = \sqrt{K_a/J}; \quad (1)$$

$$K_{\Omega}^* = \frac{K_I K_{п1} K_{дс}}{JR}. \quad (2)$$

Эти передаточные функции при $K_{дс} \gg K_e$ и выборе коэффициента K_{Ω}^* из условия

$$K_{\Omega}^* \geq 2\omega_0, \quad (3)$$

принимают вид

$$\frac{\Omega(p)}{U_{31}(p)} = \frac{2p}{(T_1p+1)(T_2p+1)K_{\text{дс}}\omega_0},$$

$$\frac{\Omega(p)}{M_{\text{вн}}(p)} = \frac{p}{(T_1p+1)(T_2p+1)K_{\alpha}}.$$

Постоянные времени определяются по формулам

$$T_1 = \frac{1}{-\frac{K_{\Omega}^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_{\Omega}^*}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}, \quad T_2 = \frac{1}{-\frac{K_{\Omega}^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_{\Omega}^*}{2}\right)^2 - \omega_0^2}}.$$

Контур регулирования угла содержит пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор) с коэффициентом передачи $K_{\text{п2}}$ и датчик угла поворота МЭП с коэффициентом передачи $K_{\text{дв}}$.

На рис. 3 представлена детализированная структурная схема (ДСС) регулятора.

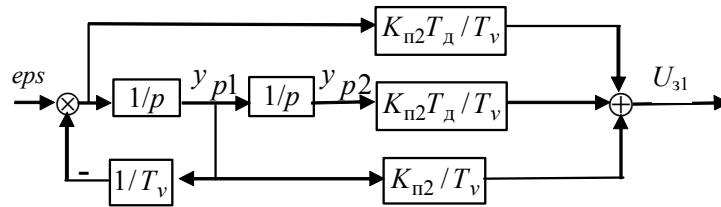


Рис. 3. Детализированная структурная схема ПИД-регулятора

С учетом дополнительной инерционности, неизбежно появляющейся при реализации ПИД-регулятора [5], передаточную функцию последнего запишем в виде

$$W_{\text{пид}}(p) = U_{31}(p)/\text{eps}(p) = K_{\text{п2}} \frac{(T_{\text{и}}T_{\text{д}}p^2 + T_{\text{и}}p + 1)}{T_{\text{и}}p(T_{\text{в}}p + 1)},$$

где $T_{\text{и}}$ – постоянная времени интегрирования; $T_{\text{д}}$ – постоянная времени дифференцирования; $T_{\text{в}}$ – постоянная времени дополнительного инерционного звена.

Используя ДСС, опишем ПИД-регулятор следующими уравнениями:

$$\dot{y}_{p1} = u_{32} - K_{\text{дв}}\alpha - (1/T_{\text{в}})y_{p1}, \quad (4)$$

$$\dot{y}_{p2} = y_{p1}, \quad (5)$$

$$u_{31} = -\frac{K_{\text{п2}}T_{\text{д}}K_{\text{дв}}}{T_{\text{в}}} \alpha + \frac{K_{\text{п2}}(T_{\text{в}} - T_{\text{д}})}{T_{\text{в}}^2} y_{p1} + \frac{K_{\text{п2}}}{T_{\text{и}}T_{\text{в}}} y_{p2} + \frac{K_{\text{п2}}T_{\text{д}}}{T_{\text{в}}} u_{31}R, \quad (6)$$

где y_{p1} и y_{p2} – выходные сигналы интеграторов ДСС, а u_{32} – сигнал задания на входе углового контура. Дополнив систему уравнений, описывающих поведение внутреннего скоростного контура, приведенную в работе [4], уравнениями регулятора (4)–(6), представим описание рассматриваемой структуры в векторно-матричной форме

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B}\mathbf{U}, \quad (7)$$

где

$$\mathbf{Y}^T = \begin{bmatrix} i & \Omega & \alpha & y_{p1} & y_{p2} \end{bmatrix}$$

– вектор состояния, элементами которого являются соответственно ток обмотки управления, скорость вала ЭМП, угол поворота вала, выходные сигналы интеграторов ДСС ПИД-регулятора;

$$\mathbf{U}^T = \begin{bmatrix} U_{32} & M_{\text{вн}} \end{bmatrix}$$

– вектор внешних воздействий, элементами которого являются соответственно напряжение задания на входе внешнего контура регулирования угла и момент статической нагрузки на валу ЭМП;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e + K_{dc}K_{п1}}{L} & -\frac{K_{п1}K_{п2}K_{дy}T_d}{LT_v} & \frac{K_{п1}K_{п2}K_{дy}(T_d - T_v)}{LT_v^2} & \frac{K_{п1}K_{п2}}{LT_vT_{и}} \\ \frac{K_I}{J} & -\frac{\mu}{J} & -\frac{K_a}{J} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{дy} & -\frac{1}{T_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{п1}K_{п2}T_d}{T_vL} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Оптимизация углового контура

Настройка углового контура на технический оптимум [5] состоит в таком выборе параметров ПИД-регулятора, при котором передаточная функция разомкнутого контура соответствует эталонной:

$$W_{pz}(p) = \frac{\alpha(p)}{eps^*(p)} = \frac{1}{2pT_{\mu}(1 + pT_{\mu})}. \quad (8)$$

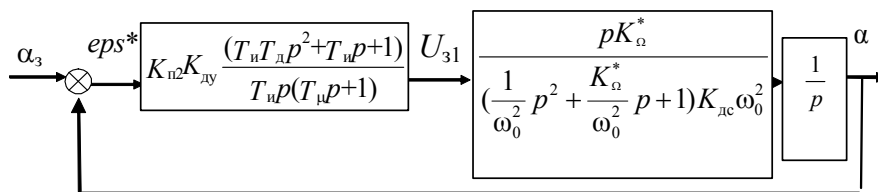


Рис. 4. Расчетная структурная схема углового контура

Из эквивалентной расчетной структурной схемы углового контура, представленной на рис. 4, где α_3 – заданное значение угла поворота, следует, что

$$W_p(p) = \frac{K_{дy}K_{п2}(T_{и}T_{д}p^2 + T_{и}p + 1)}{T_{и}p} \cdot \frac{1}{(T_{\mu}p + 1)} \cdot \frac{K_{\Omega}^*}{(-\frac{1}{\omega_0^2}p^2 + \frac{K_{\Omega}^*}{\omega_0^2}p + 1)K_{дc}\omega_0^2}.$$

Дополнительное инерционное звено с некомпенсированной постоянной времени T_{μ} , включает электромагнитную постоянную времени обмотки управления МЭП T_5 и дополнительную постоянную времени ПИД-регулятора T_v . Таким образом, $T_{\mu} = T_5 + T_v$.

Обычно ПИД-регулятор реализуем при условии $T_{и} > T_{д}$. По этой причине расчет этих постоянных времени (настроек регулятора) целесообразно осуществлять по формулам

$$T_{и} = K_{\Omega}^*/\omega_0^2, \quad (9)$$

$$T_{д} = 1/K_{\Omega}^*. \quad (10)$$

В таком случае

$$W_p(p) = \frac{\alpha(p)}{eps^*(p)} = \frac{K_{дy}K_{п2}}{pK_{дc}} \cdot \frac{1}{(T_{\mu}p + 1)}. \quad (11)$$

Из условия эквивалентности передаточных функций (8) и (11) находим

$$K_{п2} = \frac{K_{дc}}{2T_{\mu}K_{дy}}. \quad (12)$$

Параметрический синтез системы управления электропривода проводится в следующем порядке. После определения резонансной частоты ω_0 по формуле (1) в соответствии с (3) выбираем значение коэффициента передачи K_{Ω}^* из условия обеспечения $T_1 > 4T_2$ и из выражения (2) находим значение коэффициента $K_{п1}$. Далее по формулам (9), (10) и (12) находим параметры ПИД-регулятора угла $T_{и}$, $T_{д}$ и $K_{п2}$. При заданном времени переходного процесса в системе t_n некомпенсированная постоянная времени T_{μ} может быть вычислена как $t_n/6$ и при этом удовлетворять условию $T_{\mu} \geq T_5$. Если это условие не выполняется, то заданное время процесса при настройке на технический оптимум не реализуемо. В данном случае при значениях коэффициентов передачи $K_{дc}=20$ В·с/рад; $K_{дy}=10$ В/рад и заданном времени переустановки оси $t_n=0,2$ с имеем $T_{\mu}=0,033$ с; $K_{п1}=10,2$; $K_{п2}=30$; $T_{и}=0,52$ с; $T_{д}=0,107$ с.

Результаты математического моделирования в среде Mathcad с использованием векторно-матричной модели (7) установившихся и переходных режимов на скачок напряжения $U_{32}=0,058$ В, соот-

ветствующий заданному углу поворота $\alpha_z=0,0058$ рад ($20'$), в контуре регулирования угла представлены на рис. 5.

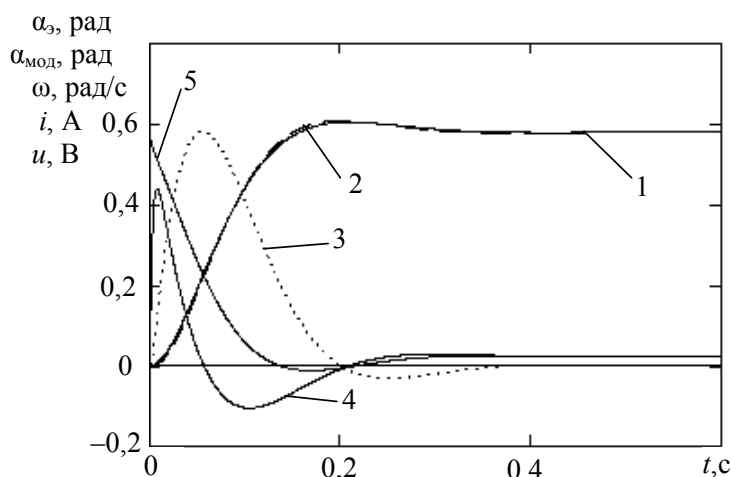


Рис. 5. Диаграмма реакции координат привода на скачок задающего воздействия:
1 – эталонная (расчетная) кривая угла поворота МЭП в масштабе 100:1 (рад); 2 – кривая угла поворота, полученная на модели в том же масштабе (рад); 3 – кривая скорости вращения МЭП в масштабе 10:1 (рад/с); 4 – кривая тока обмотки управления в масштабе 10:1 (А); 5 – кривая напряжения на обмотке управления МЭП в масштабе 1:100 (В)

Как видно из рис. 5, кривые 1 и 2 практически совпадают, и, следовательно, статические и динамические характеристики МЭП с дополнительной обратной связью по скорости и с контуром регулирования угла, полученные с использованием модели, полностью соответствуют расчетным. Таким образом, можно утверждать, что принятые при синтезе математические модели, методики синтеза контуров электропривода сканирования и расчетные соотношения корректны.

Результаты моделирования квазиустановившегося режима сканирования при слежении системой за задающим воздействием в виде заданной временной диаграммы сканирования для широкого поля при нулевом моменте нагрузки $M_{вн}$ приведены на рис. 6.

Детальный анализ кривых, представленных на рис. 6, а также результаты моделирования режима сканирования в узком угловом поле показали, что нелинейность кривых изменения угла на рабочих участках диаграммы сканирования не превышает 1,1% и 7,5% при сканировании соответственно в режимах широкого и узкого полей. При этом ускорения оси сканирования достигают максимальных значений при смене рабочих и нерабочих участков диаграммы сканирования, но не превышают допустимого значения.

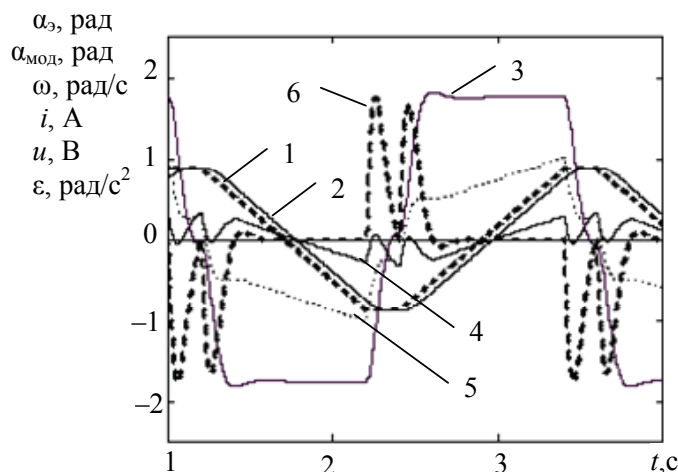


Рис. 6. Диаграмма моделирования режима сканирования в широком угловом поле:
1 – угол задания в масштабе 100:1 (рад); 2 – угол поворота сканирующей оси в масштабе 100:1 (рад); 3 – скорость в масштабе 100:1 (рад/с); 4 – ток в обмотке управления ЭМП в масштабе 1:1 (А); 5 – напряжение на обмотке управления в масштабе 1:10 (В); 6 – ускорение в масштабе 10:1 (рад/с²)

Заключение

В ходе работы была предложена векторно-матричная модель и методика синтеза системы управления электропривода оси сканирования инфракрасного телескопа, построенной по двухконтурной структуре, содержащей внутренний контур динамической коррекции для демпфирования слабо затухающих угловых колебаний вала с обратной связью по скорости вала, позволяющий перейти от колебательного к апериодическому переходному процессу и получить время переходного процесса, равного 1,1 с, и внешний контур регулирования угла, обеспечивающий настройку контура положения на технический оптимум. На основе анализа результатов математического моделирования был сделан вывод о корректности предложенных математических моделей и методики синтеза, а также о возможности реализации требуемого движения исполнительной оси в режиме слежения за трапецеидальным задающим воздействием.

Литература

1. Борисов П.А., Томасов В.С. Методы анализа и синтеза энергоподсистем электротехнических комплексов с высокими энергетическими показателям // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 1 (59). – С. 5–13.
2. Толмачев В.А., Никитина М.В., Сергеева М.Е. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ-3.12 // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 39–43.
3. Толмачев В.А., Антипова И.В., Фомин С.Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44. – С. 142–147.
4. Толмачев В.А., Демидова Г.Л. Математические модели и динамические характеристики электромеханических преобразователей с ограниченным углом поворота // Изв. вузов. Приборостроение. – 2008. – Т. 51. – № 11. – С. 18–23.
5. Фрер Ф., Орттенбургер Ф. Введение в электронную технику регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 190 с.

Толмачев Валерий Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tolmachev@ets.ifmo.ru

Субботин Дмитрий Андреевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Subb-Dm@yandex.ru

УДК 681.5:621.865.8+519.71

СИСТЕМА И АЛГОРИТМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ БОЛБОТА

А.С. Боргуль, В.С. Громов, К.А. Зименко, С.Ю. Маклашевич

Решена задача стабилизации неустойчивой конструкции с шаром в основании и двух присоединенных к нему приводов. Синтезированы регуляторы на основе метода оптимизации линейно-квадратичного функционала и метода обеспечения качественной экспоненциальной устойчивости. Проведены экспериментальные исследования системы управления на макете, собранном на базе робототехнического комплекса LegoNXT.

Ключевые слова: болбот, перевернутый математический маятник, линейно-квадратичный регулятор, качественно-экспоненциальная устойчивость.

Введение

Болбот (Ballbot) – это мобильный робот, основной задачей которого является удержание собственной конструкции в положении равновесия на сферическом катке (шаре). Динамическая устойчивость болбота в сочетании с шаром вместо колес приводит к ряду уникальных свойств в области наземного транспорта: болбот является всенаправленным, т.е. может перемещаться в любом направлении и в любой момент времени, ограничиваясь лишь собственной динамикой, но не механическими связями, как у других конструкций. Таким образом, он не должен отклоняться от курса для того, чтобы изменить направление. Все это делает его более маневренным по сравнению с другим наземным транспортом.

Обладая уникальными характеристиками, такая система может найти ряд практических применений в условиях ограниченного пространства и требований к высокой маневренности, например, в условиях библиотеки или склада. Свойство динамической устойчивости позволяет использовать робота в динамических средах с возмущениями, таких как корабли, поезда [1]. Всенаправленность движения делает болбота пригодным для быстрой навигации в системах с нанесенной координатной сеткой. Также в условиях роста игровой индустрии и повышающегося интереса к созданию роботов, использующихся в сфере обслуживания, болбот обладает большими перспективами к дальнейшему развитию. Однако до сих пор болбот остается объектом научных исследований и служит узко определенным целям.

Постановка задачи

Рассматривается задача стабилизации болбота, представляющего собой робототехнический комплекс на подвижном основании (шаре), которое образует систему независимых перевернутых маятников. Задача решается при дополнительных условиях – неучтенной динамике и внешних возмущениях. Требуется выявить оптимальный метод стабилизации болбота с заданными показателями качества как при позиционировании на месте, так и при траекторном управлении, а также при наличии дополнительных управляющих воздействий.

Устройство робота

Основными элементами конструкции являются: шар, контроллер, два гироскопа, два двигателя постоянного тока со встроенными редукторами и энкодерами. Добавлен ультразвуковой датчик расстояния для контроля препятствий при перемещении и взаимодействия с объектами. Пластиковый шар в основании закреплен с трех сторон – одним свободно вращающимся колесом и двумя присоединенными к двигателям, с помощью которых осуществляется управление конструкцией.

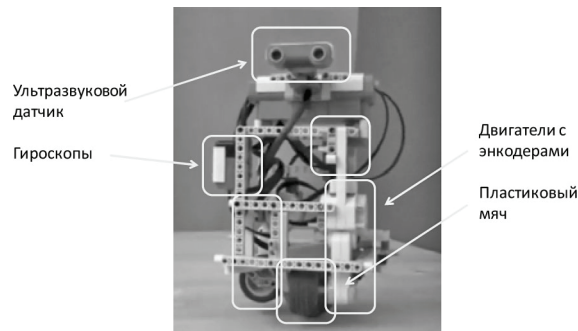


Рис. 1. Основные элементы конструкции

Математическая модель

Рассматривается модель, в которой движения в продольном и поперечном направлениях не связаны, и уравнения движения в этих двух плоскостях одинаковы. Тогда болбот можно рассматривать как две модели отдельных одинаковых перевернутых маятников на сферическом катке [2]. На рис. 2 показана система координат перевернутого маятника на сферическом катке, где ψ – угол отклонения конструкции; θ – угол поворота катка; θ_s – угол поворота катка, задаваемый двигателем. Двигатель вращает сферический каток через колесо с резиновой покрышкой. Допускается, что между ними нет скольжения. θ_m – угол поворота двигателя. $R_w \theta_m = R_s \theta_s$.

Опишем уравнение движения перевернутого маятника на сферическом катке методом Лагранжа, основываясь на системе координат, указанной ранее. Если $\theta = 0$ при $t=0$, тогда каждая координата задается следующим образом:

$$(x_s, z_s) = (R_s \theta, z_b), \quad (\dot{x}_s, \dot{z}_s) = (R_s \dot{\theta}, 0), \\ (x_b, z_b) = (x + L \sin \psi, z + L \cos \psi), \quad (\dot{x}_b, \dot{z}_b) = (R_s \dot{\theta} + L \dot{\psi} \cos \psi, -L \dot{\psi} \sin \psi).$$

Кинетическая энергия поступательного движения T_1 , вращательного движения T_2 , потенциальная энергия U записываются следующим образом:

$$T_1 = \frac{1}{2} M_s (\dot{x}_s^2 + \dot{z}_s^2) + \frac{1}{2} M_b (\dot{x}_b^2 + \dot{z}_b^2), \\ T_2 = \frac{1}{2} J_s \dot{\theta}_s^2 + \frac{1}{2} J_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} J_w \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 = \frac{1}{2} J_s \dot{\theta}_s^2 + \frac{1}{2} J_\psi \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} (J_m + J_w) \frac{R_s^2}{R_w^2} (\dot{\theta} - \dot{\psi}),$$

$$U = M_s g z_s + M_b g z_b.$$

Лагранжиан L имеет вид

$$L = T_1 + T_2 - U.$$

Используем θ и ψ как обобщенные координаты. Уравнение Лагранжа имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F_\theta, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} = F_\psi.$$

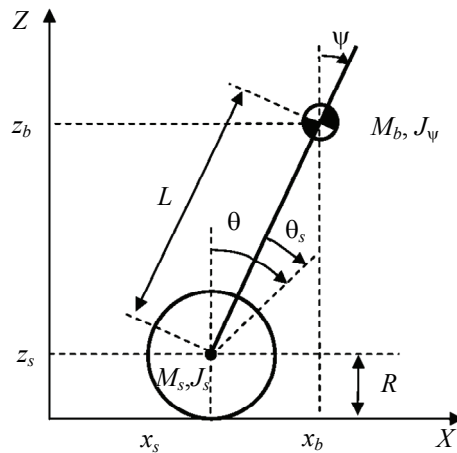


Рис. 2. Система координат перевернутого маятника

С учетом постоянного крутящего момента двигателя и вязкого трения обобщенные силы равны

$$F_\theta = K_t i - f_m \dot{\theta}_m - f_s \dot{\theta}, \quad F_\psi = -K_t i - f_m \dot{\theta}_m,$$

где i – ток двигателя; $\dot{\theta}_m = k(\dot{\theta} - \dot{\psi})$ – угловая скорость двигателя. Без учета трения внутри двигателя и индуктивности обобщенные силы выражаются [3] следующим образом:

$$F_\theta = \alpha v - (\beta + f_s) \dot{\theta} + \beta \dot{\psi}, \quad F_\psi = -\alpha v + \beta \dot{\theta} - \beta \dot{\psi}, \quad \alpha = \frac{K_t}{R_m}, \quad \beta = k \left(\frac{K_t K_b}{R_m} + f_m \right).$$

Линеаризуем уравнения состояния, рассматривая предел $\psi \rightarrow 0$ ($\sin \psi \rightarrow \psi$, $\cos \psi \rightarrow 1$) и пренебрегая слагаемым второго порядка $\dot{\psi}^2$, в векторно-матричной форме имеем:

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \end{bmatrix} = H v, \quad E = \begin{bmatrix} (M_b + M_s)R_s^2 + J_s + J_m & M_b L R_s - k^2 J_m \\ M_b L R_s - k^2 J_m & M_b L^2 + J_\psi + k^2 J_m \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \beta + f_s & -\beta \\ -\beta & \beta \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -M_b g L \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} \alpha \\ -\alpha \end{bmatrix}.$$

Обозначим x – вектор состояния; u – вход.

$$x = \begin{bmatrix} \theta & \psi & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T; \quad u = v;$$

Таким образом, представим уравнения состояния в форме Коши:

$$\dot{x} = A(t)x(t) + B(t)u(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A(3,2) & A(3,3) & A(3,4) \\ 0 & A(4,2) & A(4,3) & A(4,4) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B(3) \\ B(4) \end{bmatrix};$$

$$A(3,2) = M_b g L E(1,2) / \det(E);$$

$$A(4,2) = -M_b g L E(1,1) / \det(E);$$

$$A(3,3) = -[(\beta + f_s)E(2,2) + \beta E(1,2)] / \det(E);$$

$$A(4,3) = [(\beta + f_s)E(1,2) + \beta E(1,1)] / \det(E);$$

$$A(3,4) = -\beta[E(2,2) + E(1,2)] / \det(E) \quad A(4,4) = -\beta[E(1,1) + E(1,2)] / \det(E);$$

$$B(3) = -\alpha[E(2,2) + E(1,2)] / \det(E);$$

$$B(4) = -\alpha[E(1,1) + E(1,2)] / \det(E) \quad \det(E) = E(1,1)E(2,2) - E(1,2)^2.$$

Расчет регуляторов

На вход системы управления подается напряжение управления двигателями. Выходом системы являются значения с энкодеров угла поворота двигателя θ_m и угловая скорость отклонения конструкции от вертикали $\dot{\psi}$. Численное значение угла отклонения ψ получается путем интегрирования угловой скорости $\dot{\psi}$. Начальные условия при интегрировании определяются из условия вертикального запуска,

выбранного положения объекта. Положение равновесия является неустойчивым. При минимальном отклонении необходимо двигать болбот в направлении угла наклона конструкции, чтобы удержать баланс.

Линейно-квадратичный регулятор. Для решения задачи удержания перевернутого маятника в положении неустойчивого равновесия синтезируется пропорционально-интегральный регулятор (рис. 3). C_θ – матрица выхода для получения θ из x .

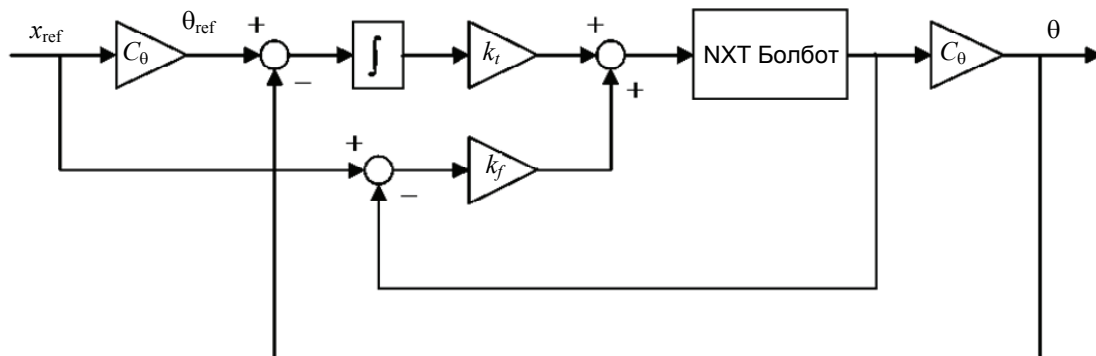


Рис. 3. Схема пропорционально-интегрального регулятора

Рассчитаем коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих на основе метода линейно-квадратичного регулятора. Линейно-квадратичный регулятор – в теории управления один из видов оптимальных регуляторов, использующий квадратичный функционал качества [4]. Выберем весовые матрицы Q и R [5]:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^3 \end{bmatrix}, \quad R = 6 \times 10^3 \times \left(\frac{180}{\pi} \right)^2,$$

где $Q(2,2)$ – элемент весовой матрицы состояния, характеризующий вес значения угла отклонения конструкции, $Q(5,5)$ – элемент весовой матрицы состояния, характеризующий вес по времени интегрирования разницы между ранее измеренным и полученным углами.

Используя полученные ранее математическую модель робота и весовую матрицу, рассчитаем в среде Matlab численные значения коэффициентов для пропорциональной и интегральной составляющих. Функция *lqr* вычисляет матрицу коэффициентов регулирования со среднеквадратичным функционалом качества [6]. В результате вычислений получается набор коэффициентов:

$$k_f = [-0,015 \ -1,5698 \ -0,027 \ -0,2325], \quad k_i = -0,0071.$$

Качественная экспоненциальная устойчивость. Построим регулятор, обеспечивающий экспоненциальную сходимость со следующими показателями качества: $t_n = 0,36$ с; $\delta_n = 0$.

В линейных системах подлежит минимизации квадратичный критерий качества

$$J(x, u) = \int_0^\infty [x^T(t)Q(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t)] dt.$$

Непрерывная система экспоненциально устойчива в точке $x = 0$, если существуют такая квадратичная функция Ляпунова

$$V(x(t)) = x^T(t)P(t)x(t),$$

где $P = P^T$ – положительно определенная $n \times n$ матрица, и такой параметр $\lambda: \lambda < 0$, при которых на всех траекториях движения системы в любой момент времени $t \geq 0$ выполняется условие

$$\dot{V}(x(t)) \leq 2\lambda V(x(t)).$$

Данное условие имеет место, если справедливо уравнение

$$\dot{V}(x(t)) - 2\lambda V(x(t)) = -x^T(t)Q(t)x(t) - u^T(t)R(t)u(t).$$

Подставив квадратичную функцию Ляпунова и ее производную, получим:

$$[A(t)x(t) + B(t)u(t) - \lambda x(t)]^T P(t)x(t) + x^T(t)P(t)[A(t)x(t) + B(t)u(t) - \lambda x(t)] + x^T(t)\dot{P}(t)x(t) + u^T(t)R(t)u(t) = 0,$$

на основе которого, воспользовавшись методом локальной оптимизации [7], находим оптимальное управление:

$$u(t) = R^{-1}(t)B^T(t)P(t)x(t).$$

Получим систему матричных уравнений типа Риккати [7]:

$$\dot{P}(t) + [A(t) - B(t)K(t) - \lambda I]^T P(t) + P(t)[A(t) - B(t)K(t) - \lambda I] + K^T(t)R(t)K(t) + Q(t) = 0,$$

$$K(t) = R^{-1}(t)B^T(t)P(t).$$

Так как матрицы A, B, Q, R постоянны, то процесс достигает установившегося состояния в том смысле, что становится постоянной матрица P ($\dot{P} = 0$):

$$[A - BK - \lambda I]^T P + P[A - BK - \lambda I] + K^T R K + Q = 0, \quad K = R^{-1} B^T P.$$

Из матричных алгебраических уравнений получается следующая матрица обратных связей K регулятора: $K_f = [-0,0117 \quad -1,4993 \quad -0,0284 \quad -0,2432]$.

Сравнительный анализ полученных регуляторов (линейно-квадратичного регулятора на рис. 4 и регулятора на основе метода качественной экспоненциальной устойчивости на рис. 5) проведен на основе экспериментальных данных.

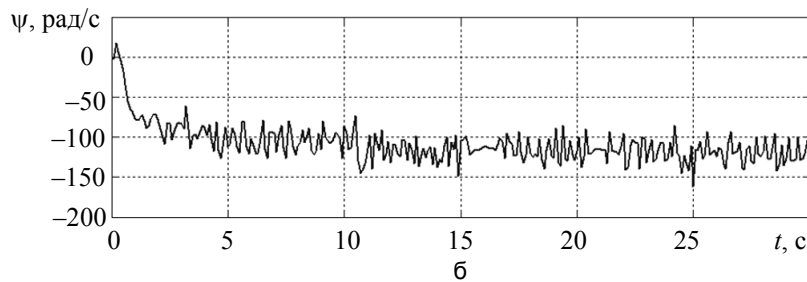
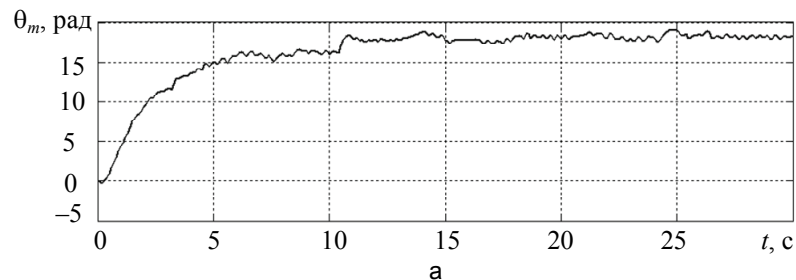


Рис. 4. Показания при использовании линейно-квадратичного регулятора: угол поворота двигателя (а); скорость изменения угла крена (б)

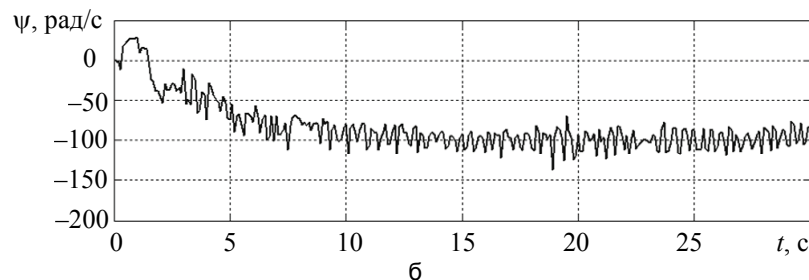
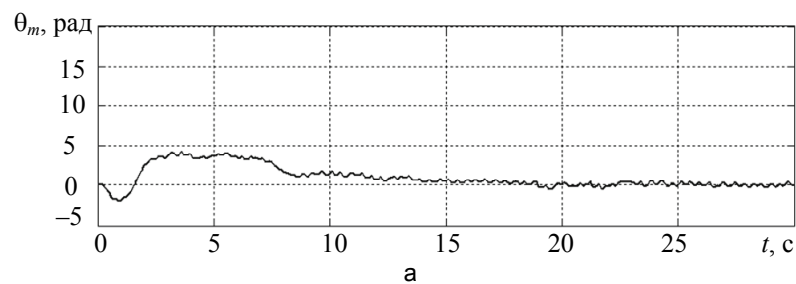


Рис. 5. Показания при использовании регулятора на основе метода качественной экспоненциальной устойчивости: угол поворота двигателя (а); скорость изменения угла крена (б)

Из полученных графиков видно, что использование качественно-экспоненциального регулятора приводит к уменьшению колебательности процесса стабилизации болбота и более точному позиционированию конструкции.

Заключение

В результате проделанной работы был получен опытный образец и синтезирован алгоритм, позволяющий стабилизировать в вертикальном положении объект на сферическом катке, обладающий достаточным запасом качества для отработки дополнительных управляющих воздействий. Был произведен синтез линейно-квадратичного регулятора и регулятора на основе качественной экспоненциальной устойчивости. Анализ полученных данных показал, что регулятор на основе качественной экспоненциальной устойчивости обеспечивает лучшие точностные и качественные показатели, а, следовательно, является более предпочтительным в условиях поставленной задачи.

Литература

1. Lauwers T.B., Kantor G.A., Hollis R.L. A dynamically stable single-wheeled mobile robot with inverse mouse-ball drive // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2006. – 2884 p.
2. Nagarajan U., Mampetta A., Kantor G., Hollis R. State transition, balancing, station keeping, and yaw control for a dynamically stable single spherical wheel mobile robot // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2009. – P. 3161–3166.
3. Колюбин 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.
4. Anderson B.D.O., Moore J.B. Optimal control: linear quadratic methods. – Prentice-Hall, 1989. – 394 p.
5. Ha Y.-S., Yuta S. Trajectory tracking control for navigation of self-contained mobile inverse pendulum // Proc. IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – 1994. – P. 1875–1882.
6. Linear-Quadratic-Regulator (LQR) design – MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/control/ref/lqr.html>, св. Яз. англ. (дата обращения 18.03.2011).
7. Быстров С.В., Григорьев В.В., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А. Экспоненциальная устойчивость непрерывных динамических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 73. – С. 44–47.

<i>Боргуль Александр Сергеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, borgulalexandr@gmail.com
<i>Громов Владислав Сергеевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, object253@yandex.ru
<i>Зименко Константин Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kostyazimenko@gmail.com
<i>Маклашевич Сергей Юрьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, s.maklashevich@gmail.com

УДК 681.513.1, 681.513.3

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ ДВУХКОЛЕСНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ «МОТОБОТ»

А.А. Бобцов, А.С. Боргуль, К.А. Зименко, А.А. Пыркин

Рассмотрена задача управления мобильным роботом типа мотоцикл, построенном на базе Lego Mindstorms NXT. Для макета робота разработан регулятор, обеспечивающий устойчивое вертикальное положение при перемещении по горизонтальной плоскости с возможностью дистанционного управления траекторией движения.

Ключевые слова: мобильные роботы, автономный мотоцикл, неустойчивые системы, управление по выходу.

Введение

Роботы сегодня входят в нашу жизнь в различных областях. Они летают в космос, исследуют другие планеты, помогают в военных целях – разминируют бомбы и разведывают обстановку с воздуха. В промышленности многие отрасли уже немыслимы без роботов: они собирают автомобили, помогают находить новые лекарства. Многие устройства, принимающие решения на основе полученных от сенсоров данных, тоже можно считать роботами, например, лифты, стиральные машины, системы антиблокировочного торможения, помогающие избежать аварий.

Одну из наиболее важных проблем, которую можно решить с помощью робототехники – это вопрос, связанный с транспортом. В условиях современной загруженности дорог (пробки в городе и, наоборот, бездорожье в сельской местности) особую ценность представляет одноколесный транспорт, об-

ладающий маневренностью, малыми габаритами и пониженным энергопотреблением. Так, в частности, с помощью мотоцикла можно проехать в пробке, найти тропинку на проселочной дороге и решить многие другие задачи, связанные с современным темпом жизни. С развитием робототехники, теории и систем автоматического управления стало возможным решение задачи автономного движения мотоцикла.

Задача стабилизации одноколейного двухколесного транспорта в вертикальном положении была поставлена еще в середине прошлого века и относится к классическим задачам механики и теории управления. Известны работы [1, 2], в которых уделено внимание задаче управления «роботом-велосипедистом», включая математические модели и возможные алгоритмы управления. Достижение устойчивости на одноколейном транспорте является гораздо более сложной проблемой, чем на любой другой платформе, поэтому никто не преуспел в создании автономных мотоциклов, несмотря на все их преимущества.

С развитием высокоточного приборостроения и робототехники поменялся подход к созданию аппаратов данного типа. Самой известной является разработка фирмы DARPA GrandChallenge [3].



Рис. 1. Автономно-управляемый мотоцикл DARPA GrandChallenge

В этой разработке стабилизация осуществляется за счет скорости поворота руля. Также модель оснащена GPS навигацией для определения карты местности. Система технического зрения по трем каналам вместе с GPS позволяют создать подробную карту местности. Преимущества двухколесной системы перед трех-, четырех-, шестиколесными конструкциями – в большей управляемости и уменьшении жесткости привязки к земной поверхности. Следует отметить, что для одноместного мотоцикла требуется постоянная настройка, которая чрезвычайно трудно достигается (в частности, в данной разработке более 140 тысяч строк программного кода для успешной стабилизации).

Устойчивость мотоцикла зависит от баланса сил, которыми управляет водитель. При длительном или напряженном темпе движения проявляются такие факторы, как усталость, нервное напряжение – причина большинства дорожно-транспортных происшествий. Другой проблемой при удержании равновесия мотоцикла является зависимость гироскопического стабилизирующего момента от линейной скорости движения. При низких скоростях исчезает управляемость в системе.

В работе описывается макет автономного мобильного робота «Мотобот», являющегося моделью двухколесного мотоцикла. Как и в [4], для построения макета используется конструктор Lego Mindstorms NXT. Анализируется математическая модель движения двухколесного одноколейного робота на плоскости, на основе которой синтезируются алгоритмы автоматического управления. Задача может быть решена путем управления рулевым колесом и скоростью ведущего колеса. Решены локальные задачи стабилизации вертикального положения равновесия, движения вдоль прямой с заданной скоростью, а также реализовано дистанционное управление траекторией движения с помощью джойстика и радиоканала связи.

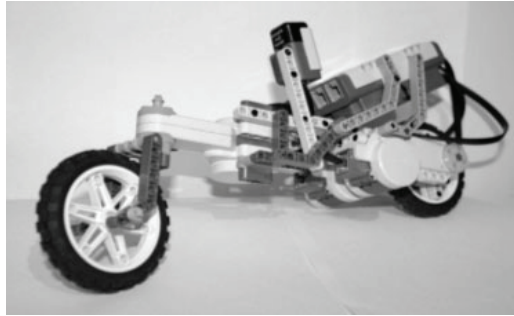
Математическая модель робота «Мотобот»

Математическая модель мотоцикла является нелинейной и включает несколько важных параметров, таких как масса мотоцикла, коэффициент трения, расстояние между проекциями колес, моменты инерции составных частей относительно центра масс и др. Математическая модель состоит из четырех основных частей: рамы, двух колес и рулевой вилки. Приемлемая модель имеет 7 степеней свободы, из них 3 – степени свободы угловых скоростей. Модель может быть соответственно параметризованной с помощью следующих переменных: угол крена вдоль поперечной оси φ ; угол поворота с помощью рулевого колеса δ , изменение уровня вращения заднего колеса θ .

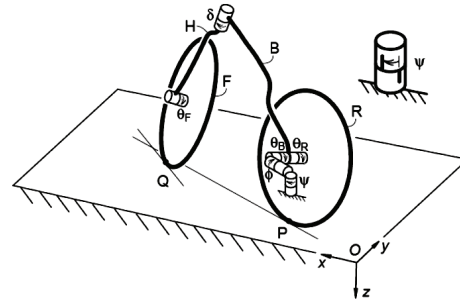
За основу была взята модель сбалансированного одноколейного транспорта с симметрией масс (рис. 2, а) [5]. Рассмотрим декартову систему координат с центром в точке O и осями x , y и z (рис. 2, б). Заднее колесо R , соединенное с рамой, при наличии водителя имеет центр масс в точке B .

Центр масс B размещен в следующей области: $x_B = 0$, $y_B = 0$, $z_B < 0$. Момент инерции рамы относительно центра масс представлен матрицей моментов инерции размерности (3×3) , где все массы симметричны относительно проекции xz . Центр масс передней части рамы с вилкой и рулем H находится в следующей области $x_H = 0$, $y_H = 0$, $z_H < 0$. Матрицы моментов инерции передней и задней сборок равны

$$\mathbf{I}_B = \begin{bmatrix} I_{Bxx} & 0 & I_{Bxz} \\ 0 & I_{Byy} & 0 \\ I_{Bxz} & 0 & I_{Bzz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_H = \begin{bmatrix} I_{Hxx} & 0 & I_{Hxz} \\ 0 & I_{Hyy} & 0 \\ I_{Hxz} & 0 & I_{Hzz} \end{bmatrix}.$$



а



б

Рис. 2. Прототип мобильного робота «Мотобот» (а) и схематическое изображение углов положения составных частей (б)

Представим линеаризованные уравнения движения:

$$P = \sum F_i \cdot \Delta v_i = T_\phi \Delta \dot{\phi} + T_\delta \Delta \dot{\delta} + T_{\theta_R} \Delta \dot{\theta}_R,$$

где T_ϕ , T_δ , T_{θ_R} – обобщенные силы каждой линейной комбинации компонентов различных приложенных сил F .

Принятие полной линеаризации и движения без завала, по прямой, может быть достигнуто при любой скорости, удовлетворяющей условию $v = -\dot{\theta}_R r_R$. Боковая симметрия системы, совмещенная с линейностью уравнений, позволяет получить зависимость между прямолинейным движением и углами падения и поворота. Исходя из этого, линеаризованное уравнение движения для первой степени свободы (движения вперед) просто получить, исследуя систему по осям x, z :

$$[r_R^2 m_T + I_{Ryy} + (r_R / r_F)^2 I_{Fyy}] \ddot{\theta}_R = T_{\theta_R}.$$

Линеаризованные уравнения для двух других степеней свободы, угла падения и поворота рулевого колеса – это пара совмещенных дифференциальных уравнений второго порядка. Уравнение в канонической форме, где первое уравнение отражает крен, а второе поворот руля, имеет вид $\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{f}$.

Для модели мотоцикла запишем его в форме $\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + v \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{q}} + [g \mathbf{K}_0 + v^2 \mathbf{K}_2] \mathbf{q} = \mathbf{f}$, где изменяемые во времени переменные $\mathbf{q} = [\phi, \delta]^T$ и $\mathbf{f} = [T_\phi, T_\delta]^T$; $\mathbf{M}$ – симметричная матрица масс, которая отображает кинетическую энергию мотоцикла. Матрица затухания $\mathbf{C} = v \mathbf{C}_1$ линейной скорости v и охватывает косо-симметрические гироскопические моменты, возникающие из-за уровней крена мотоцикла и рулевого управления. $\mathbf{C}_1$ также содержит инерциальные реакции, возникающие во время рулевого управления. Матрица жесткости $\mathbf{K}$ состоит из двух частей: независимой от скорости симметричной части $g \mathbf{K}_0$, пропорциональной гравитационному ускорению, которая может быть использована при расчете изменения потенциальной энергии, и части $v^2 \mathbf{K}_2$, которая пропорциональна квадрату скорости и зависит от гироскопического и центробежного эффектов. Таким образом, имеем характеристическое уравнение:

$$\det(\mathbf{M} \lambda^2 + v \mathbf{C}_1 \lambda + g \mathbf{K}_0 + v^2 \mathbf{K}_2) = 0. \quad (1)$$

Далее следует рассматривать решения [4] при различных скоростях. На низких и высоких скоростях асимптотическая устойчивость не достижима, в силу ряда факторов. На начальных этапах рассматривается диапазон средних скоростей, где решается задача асимптотической устойчивости.

В общем виде модель движения выглядит следующим образом:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S}(\mathbf{q}, t) \mathbf{u}, \quad \dot{\mathbf{u}} = [\mathbf{M}(\mathbf{q}, t)]^{-1} \mathbf{Q}(\mathbf{q}, \mathbf{u}, t),$$

где $\mathbf{q}$ – обобщенная координата; $\mathbf{u}$ – обобщенная скорость; $\mathbf{S}$ – кинематическая матрица, которая отображает отношение уровней обобщенных координат к обобщенным скоростям; $\mathbf{M}$ – система матриц масс; $\mathbf{Q}$ содержит все силы и зависимости от скорости инерции.

Нахождение параметров линеаризованной модели движения робота

Будем использовать следующие индексы: R – для заднего колеса; B – для задней части рамы совместно с мотоциклистом; H – для передней части с рулем; F – для переднего колеса; T – для системы в целом; A – для сборки передней части рамы с рулем.

Найдем общую массу и расположение центра масс (относительно точки контакта заднего колеса с землей P):

$$m_T = m_R + m_B + m_H + m_F, \quad x_T = (x_B m_B + x_H m_H + w m_F) / m_T,$$

$$z_T = (-r_R m_R + z_B m_B + z_H m_H - r_F m_F) / m_T.$$

Для вывода момента инерции всего мотоцикла вдоль оси z используем соответствующие моменты масс и значения инерций по отношению к контактной точке P вдоль общих осей, с учетом зависимости осесимметричных моментов инерции переднего и заднего колес:

$$I_{Tzz} = I_{Rzz} + I_{Bzz} + I_{Hzz} + I_{Fzz} + m_B x_B^2 + m_H x_H^2 + m_F w^2.$$

Таким же способом описывается передняя сборка A . Рассмотрим вектор $\lambda = (\sin \lambda, 0, \cos \lambda)^T$, направленный вниз вдоль рулевой оси, где λ – угол на плоскости xz . Центр масс передней сборки расположен выше руля, перпендикулярно $u_A = (x_A - w - c) \cos \lambda - z_A \sin \lambda$. Для передней сборки требуются три специальные величины инерции: момент инерции относительно оси руля и значения моментов инерции относительно смещенных и косых осей, взятых около точки, где они пересекаются. Из этих соотношений берется момент около одной оси, возникающий из-за углового ускорения около других.

Отношение механического трейла (расстояние между продолжением рулевой вилки и проекцией передней оси на поверхность) к базе колес $\mu = (c/w) \cos \lambda$.

Угловые моменты заднего и переднего колес вдоль оси y , вычисленные с помощью линейной скорости, вместе с их суммой из гиростатических коэффициентов, равны

$$S_R = I_{Ryy} / r_R, S_F = I_{Fyy} / r_F, S_T = S_R + S_F.$$

Сформируем параметры линеаризованных уравнений движения.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{\varphi\varphi} & M_{\varphi\delta} \\ M_{\delta\varphi} & M_{\delta\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} K_{0\varphi\varphi} & K_{0\varphi\delta} \\ K_{0\delta\varphi} & K_{0\delta\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} K_{2\varphi\varphi} & K_{2\varphi\delta} \\ K_{2\delta\varphi} & K_{2\delta\delta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} C_{1\varphi\varphi} & C_{1\varphi\delta} \\ C_{1\delta\varphi} & C_{1\delta\delta} \end{bmatrix},$$

где $M_{\varphi\varphi} = I_{Txx}$, $M_{\varphi\delta} = I_{Axx} + \mu I_{Txx}$, $M_{\delta\varphi} = M_{\varphi\delta}$, $M_{\delta\delta} = I_{Axx} + 2\mu I_{Axx} + \mu^2 I_{Txx}$ – элементы симметричной матрицы масс $\mathbf{M}$; $K_{0\varphi\varphi} = m_T z_T$, $K_{0\varphi\delta} = -S_A$, $K_{0\delta\varphi} = K_{0\varphi\delta}$, $K_{0\delta\delta} = -S_A \sin \lambda$ – гравитационные коэффициенты жесткости (умноженные на g); $K_{2\varphi\varphi} = 0$, $K_{2\varphi\delta} = 0$, $K_{2\delta\varphi} = ((S_T - m_T z_T) / w) \cos \lambda$, $K_{2\delta\delta} = ((S_A + S_F \sin \lambda) / w) \cos \lambda$ – скоростные коэффициенты жесткости (умноженные на v^2); $C_{1\varphi\varphi} = 0$, $C_{1\varphi\delta} = \mu S_T + S_F \cos \lambda + (I_{Txx} / w) \cos \lambda - \mu m_T z_T$, $C_{1\delta\delta} = (I_{Axx} / w) \cos \lambda + \mu (S_A + (I_{Txx} / w) \cos \lambda)$, $C_{1\delta\varphi} = -(\mu S_T + S_F \cos \lambda)$ – коэффициенты матрицы «затухания» $\mathbf{C}$.

Расчет параметров регулятора

Запишем уравнения баланса угловых моментов. Баланс углового момента крена относительно продольной оси:

$$-m_T \ddot{y}_P z_T + I_{Txx} \ddot{\varphi} + I_{Txx} \ddot{\psi} + I_{Axx} \ddot{\delta} + \dot{\psi} v S_T + \dot{\delta} v S_F \cos \lambda = T_{B\varphi} - g m_T z_T \varphi + g S_A \delta.$$

Баланс углового момента рыскания относительно точки P :

$$m_T \ddot{y}_P x_T + I_{Txx} \ddot{\varphi} + I_{Txx} \ddot{\psi} + I_{Axx} \ddot{\delta} - \dot{\varphi} v S_T - \dot{\delta} v S_F \sin \lambda = w F_{Fy}.$$

Баланс углового момента руля для передней сборки:

$$m_A \ddot{y}_P u_A + I_{Axx} \ddot{\psi} + I_{Axx} \ddot{\delta} + v S_F (-\dot{\varphi} \cos \lambda + \dot{\psi} \sin \lambda) = T_{H\delta} - c F_{Fy} \cos \lambda + g (\varphi + \delta \sin \lambda) S_A.$$

Используя выражение, характеризующее изменение угла крена относительно изменения угла рыскания рамы, получим итоговое выражение баланса мотоцикла:

$$\ddot{y}_P = ((v^2 \delta + v c \dot{\delta}) / w) \cos \lambda.$$

Уравнения задания положения мотоцикла относительно задней контактной точки:

$$\dot{x}_P = v \cos \psi, \quad \dot{y}_P = v \sin \psi.$$

Для модели вход-состояние-выход, где $\mathbf{x} = [\dot{\phi}, \dot{\delta}, \phi, \delta]^T$ – вектор состояния, найдем закон управления $u = T_{\delta}$. Расчет регулятора для случая адаптивной системы будем проводить с помощью алгоритма «полоска». Для неадаптивной системы воспользуемся линейно-квадратичным регулятором с критерием качества $J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q}_u \mathbf{x} + u^T \mathbf{R}_u u) dt$, где $\mathbf{Q}_u$ и $\mathbf{R}_u$ – диагональные матрицы штрафов по состоянию и управлению. Выберем $\mathbf{Q}_u = \text{diag}\{0, 0, 1, 0\}$, так как итоговая цель балансирования мотоцикла, удержание вертикального положения, может быть достигнута минимизацией угла крена. Для контроля усилий возьмем $\mathbf{R}_u = 1$.

Алгоритм управления рулевым колесом по измерению угла крена выберем в виде пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, коэффициенты которого подберем методом Циглера–Никольса: $k_p = 8,23$ – для пропорционального, $k_i = 1,48$ – для интегрального и $k_d = 2,76$ – для дифференциального составляющих сигнала управления.

Заключение

На базе макета мобильного робота «Мотобот» были проведены экспериментальные исследования системы управления. На рис. 3 приведены временные диаграммы реальных процессов в системе во время эксперимента.

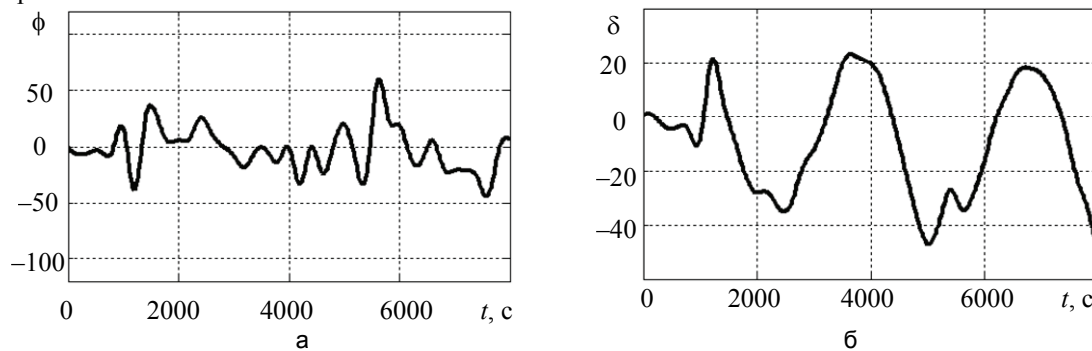


Рис. 3. Временные диаграммы процессов в роботе «Мотобот»: угол крена мотоцикла ϕ [град/с] (а); угол поворота рулевого колеса δ [град] (б)

Как видно из рис. 3 синтезированная система обладает достаточным запасом устойчивости не только для постоянного поддержания мотоцикла в вертикальном положении, но и для возможности управления направлением и скоростью движения.

В отличие от ближайшего аналога [5], в этой работе были сделаны ключевые изменения в конструкции, позволившие обеспечить стабильное передвижение робота по горизонтальной плоскости в течение длительного периода времени. Была уменьшена длина рамы и трейла, изменена конструкция руля. Расположение гироскопа ближе к центру сделало конструкцию реалистичнее. В отличие от [5], вместо пропорционального регулятора был использован ПИД-регулятор, что позволило компенсировать статическую ошибку слежения и демпфировать колебания. Было реализовано дистанционное управление с джойстика для управления траекторией движения «Мотобота». На рис. 4 представлены кадры, полученные во время проведения эксперимента.



Рис. 4. Движение мобильного робота «Мотобот» с коррекцией траектории

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П498 от 08.08.2010 г.; проекты 2011-1.2.1-402-014/057 и 2011-1.2.2-215-009/023).

Литература

1. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 448 с.
2. Селиванов А.А., Никитин Д.А. Адаптивное управление роботом-велосипедистом // XII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб, 2010. – 16 с.
3. Архив агентства по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://archive.darpa.mil/>, свободный. Яз. англ.
4. Бобцов А.А., Капитанюк Ю.А., Капитонов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А., Чепинский С.А., Шаветов С.В. Технология LEGO MINDSTORMS NXT в обучении студентов основам адаптивного управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1. – С. 103–108.
5. Meijaard J.P., Papadopoulos J.M., Ruina A., Schwab A.L. Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review // Proceedings of the Royal society A: mathematical, physical and engineering sciences. – 2007. – V. 463. – № 2084. – P. 1955–1982.

- | | |
|---|---|
| Бобцов Алексей Алексеевич | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru |
| Боргуль Александр Сергеевич | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, borgulalexandr@gmail.com |
| Зименко Константин Александрович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kostyazimenko@gmail.com |
| Пыркин Антон Александрович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com |

УДК 004.8

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ НАБЛЮДАЕМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЯХ НА ОСНОВЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ

М.Я. Пинский, А.В. Сироткин, А.Л. Тулупьев, А.А. Фильченков

Скрытые марковские модели и алгебраические байесовские сети представляют собой вероятностные графические модели, а потому во многом похожи. Скрытые марковские модели получили широкое применение, в то время как алгебраические байесовские сети пока не столь распространены, однако их аппарат позволяет моделировать и решать задачи скрытых марковских моделей. Рассмотрен вопрос ускорения решения первой задачи скрытых марковских моделей на основе методов, применяющихся в алгебраических байесовских сетях. Предложен алгоритм для оценки вероятности наблюдаемой последовательности в бинарных линейных по структуре скрытых марковских моделях с помощью апостериорного вывода алгебраической байесовской сети.

Ключевые слова: скрытые марковские модели, алгебраические байесовские сети, бинарные линейные по структуре скрытые марковские модели, вероятностные графические модели.

Введение

Вероятностные графические модели – скрытые марковские модели (СММ) и алгебраические байесовские сети (АБС) – используются для изучения различных процессов в таких областях, как распознавание речи, теория информации, машинный перевод, молекулярная биология [1–6]. СММ – более развитый и широко известный инструмент для моделирования временных рядов. Их используют во многих современных системах распознавания речи [4], в большинстве приложений вычислительной молекулярной биологии [7], в сжатии информации [8], в системах статистического машинного перевода [5], приложениях компьютерного зрения [9].

АБС – это одна из математических моделей баз фрагментов знаний с неопределенностью. Она формализует знания (с неопределенностью) при помощи вероятностной логики. Развитие аппарата АБС осуществлялось с 1980-х г.г., и на сегодняшний день в теории АБС существуют алгоритмы для решения различных задач, однако АБС все еще редко используются для практических целей [10]. На текущий момент АБС обладают развитым аппаратом логико-вероятностного вывода [11–15] и набором средств автоматического обучения, который находится на стадии развития [16–18].

Области применения АБС и СММ схожи, поэтому возникает вопрос о возможности представления одной модели через другую. Это может быть полезно для использования разработок, полученных в одной из них, для более широкого круга задач.

Цель работы – ускорение известного алгоритма [19] решения первой задачи для СММ с помощью апостериорного вывода АБС.

Скрытые марковские модели

Определения, связанные со СММ, будут вводиться по [2, 4, 6]. СММ – модель, состоящая из следующих объектов:

1. набор возможных значений скрытых состояний $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$;
2. последовательность скрытых состояний во времени $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$;
3. матрица переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$, $a_{ij} = P(q_{t+1} = s_j | q_t = s_i)$, $1 \leq i, j \leq N$;
4. вектор начального распределения $\pi = \{\pi_i\}$, $\pi_i = P(q_1 = s_i)$, $1 \leq i \leq N$;
5. алфавит возможных значений наблюдений $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$;
6. последовательность наблюдений во времени $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$;
7. матрица вероятностей наблюдений $B = \{b_j(k)\}$, $b_j(k) = P(v_k = o_t | s_j = q_t)$, $1 \leq j \leq N$, $1 \leq k \leq M$,

и обладающая следующими свойствами:

1. $P(q_{t+1} | q_t, q_{t-1}, q_{t-2}, \dots, q_1) = P(q_{t+1} | q_t)$ – марковское свойство;
 2. $P(o_t | o_1, \dots, o_T, q_1, \dots, q_T) = P(o_t | q_t)$ – зависимость текущего наблюдения только от текущего состояния,
- где $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$, $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$ – последовательности наблюдений и состояний соответственно.

В расчетах, связанных со СММ, пользуются представлением СММ в виде набора матриц вероятностей: $\mu = (A, B, \pi)$.

В теории СММ сформулированы три основных задачи.

1. *Правдоподобие наблюдений.* Дана СММ с известными матрицами вероятностей. Определить вероятность поступающей последовательности наблюдений во времени относительно этой СММ. Формальная постановка задачи: дана последовательность наблюдений $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ и модель $\mu = (A, B, \pi)$. $P(O|\mu) = ?$ Для данной задачи существуют различные решения, например алгоритм «вперед-назад» [19].
2. *Декодирование скрытой последовательности.* Даны СММ с оценками вероятности и поступившая последовательность наблюдений. Требуется определить наиболее вероятную последовательность скрытых состояний. Формальная формулировка задачи: дана последовательность наблюдений $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ и модель $\mu = (A, B, \pi)$. Найти наиболее вероятную последовательность скрытых состояний $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$, соответствующую данной последовательности наблюдений. Данная задача решается с помощью алгоритма Витерби [20].
3. *Обучение СММ.* Изменить (настроить) матрицы вероятностей СММ таким образом, чтобы максимизировать вероятности поступающего набора последовательностей наблюдений. Иначе говоря, требуется обучить СММ на наборе тренировочных последовательностей наблюдений. Формальная формулировка задачи: настроить параметры модели $\mu = (A, B, \pi)$ так, чтобы максимизировать $P(O|\mu)$. Данную задачу можно решать с помощью алгоритма Баума–Вэлха [21].

Для преобразования в АБС в работе будем использовать бинарные линейные по структуре СММ. Это такие СММ, у которых могут быть только два скрытых состояния ($S = \{s_1, s_2\}$) и два вида наблюдений ($V = \{v_1, v_2\}$). В последнем будет иметь место $S = V = \{0, 1\} = \{true, false\}$.

Алгебраические байесовские сети

Определения, связанные с теорией АБС, будут вводиться по [10, 22]. АБС – логико-вероятностная графическая модель баз фрагментов знаний с неопределенностью [10]. Фрагмент знаний представляется в виде идеала конъюнктов с оценками их истинности.

Пусть T – конечный набор элементарных пропозиций; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ – непустое подмножество T ; $S^\diamond = \{v_1 v_2 \dots v_r : v_1, v_2, \dots, v_r \in S, r = 0 \dots k\}$ – конъюнкты (множество положительно означенных конъюнкций над S); $S^\Delta = S^\diamond \setminus \{e\}$ – идеал конъюнкта (множество положительно означенных конъюнктов без пустого конъюнкта). В идеале существует один максимальный элемент (максимальная по длине конъюнкция) и множество минимальных элементов (одноатомных конъюнкций).

Квант $Q = \{\tilde{x}_0 \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_{n-1}\}$ – конъюнкция, которая для любой атомарной переменной из алфавита содержит либо ее формулу, либо отрицание.

Теперь введем нумерацию на конъюнктах и квантах. Каждому конъюнкту из идеала $\{x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_k} | 0 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n-1, k \leq n\}$ можно сопоставить номер вида $2^{i_1} + 2^{i_2} + \dots + 2^{i_k}$. Обозначим через c_i конъюнкт с порядковым номером i . Выделим из кванта положительную часть. Номер получившегося конъюнкта будет номером кванта. Обозначим через q_i квант с порядковым номером i .

Далее введем вероятность на конъюнктах и квантах. Вероятности, относящиеся к фрагменту знаний, удобно упорядочивать по номерам конъюнктов и квантов и представлять в виде векторов. Выделяют две структуры алгебраических байесовских сетей – первичную и вторичную. Первичная структура АБС – это база фрагментов знаний (ФЗ). Вторичная структура АБС – это связь между ФЗ. Вторичная структура АБС определяется набором вершин и набором ребер между ними. Вершины – это фрагменты знаний, они однозначно задаются глобальным индексом минимального конъюнкта. Ребра однозначно задаются двумя вершинами.

Представление бинарных линейных по структуре СММ в виде АБС

Представление вводится по [23], где приведено формальное доказательство корректности сведения бинарных линейных по структуре СММ к АБС. Отметим, что любая СММ может быть приведена к АБС серией аналогичных преобразований. Рассмотрим простейшую линейную бинарную СММ в четыре момента времени (рис. 1). Матрицы данной модели $\mu = (A, B, \pi)$ будут иметь следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{00} & a_{01} \\ a_{10} & a_{11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p(x_i | x_i) & p(x_i | \bar{x}_i) \\ p(\bar{x}_i | x_i) & p(\bar{x}_i | \bar{x}_i) \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0(v_0) & b_0(v_1) \\ b_1(v_0) & b_1(v_1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p(o_i | x_i) & p(\bar{o}_i | x_i) \\ p(o_i | \bar{x}_i) & p(\bar{o}_i | \bar{x}_i) \end{pmatrix}, \quad \pi = \begin{pmatrix} \pi_0 \\ \pi_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p(x_i) \\ p(\bar{x}_i) \end{pmatrix}.$$

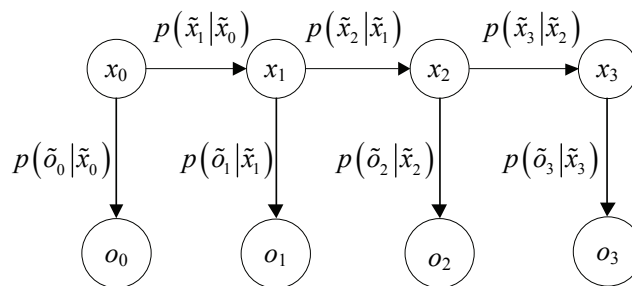


Рис. 1. Линейная бинарная СММ в четыре момента времени

Теперь построим АБС, соответствующую рассмотренной СММ (рис. 2).
Для нумерации вершин необходимо ввести алфавит. В алфавите соответствующей АБС будем чередовать o_i и x_i , начиная с $i = 0$: $\{o_0, x_0, o_1, x_1, \dots, o_{N-1}, x_{N-1}\}$.

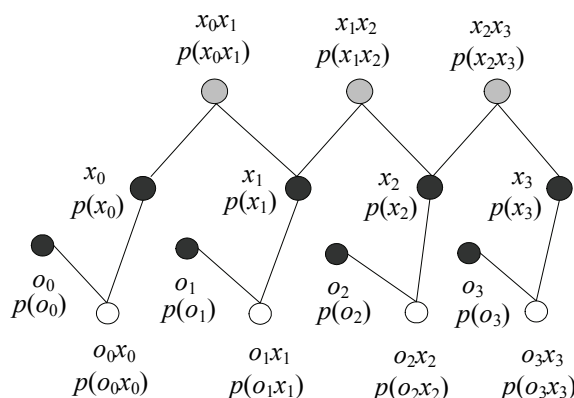


Рис. 2. АБС, соответствующая рассмотренной СММ. (Серым отмечены узлы, соответствующие одноатомным конъюнктам, белым – соответствующие двухатомным конъюнктам)

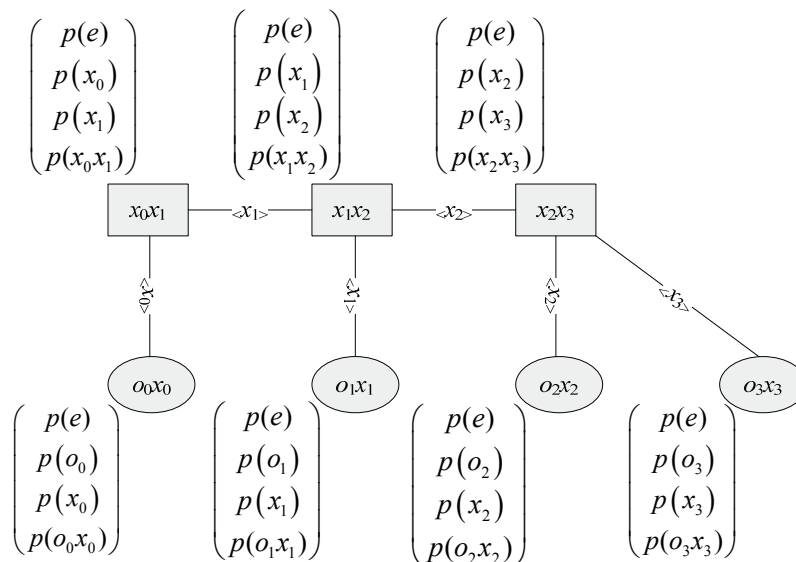


Рис. 3. Соответствующая АБС, изображенная как база ФЗ; изображены узлы и векторы вероятностей в них

Данная АБС будет содержать ФЗ вида $\left\{ \left(\{o_i, x_i\}^\Delta, \{x_i, x_{i+1}\}^\Delta \right)_{i=0}^{N-2}, \{o_{N-1}, x_{N-1}\}^\Delta \right\}$ (рис. 3).

Решение первой задачи для СММ через АБС

В ходе исследований удалось установить, что первая задача для СММ эквивалентна первой задаче апостериорного вывода для АБС [4].

Первая задача СММ: Дана последовательность наблюдений $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ и модель $\mu = (A, B, \pi)$. Какова вероятность наблюдаемой последовательности при условии данной модели $P(O | \mu) = ?$

В терминах АБС данная задача будет формулироваться следующим образом. Поступает детерминированное свидетельство, например $e = \tilde{o}_0 \tilde{o}_1 \tilde{o}_2 \dots \tilde{o}_T$, каким-то образом означенное. Требуется оценить вероятность данного свидетельства $P(e) = ?$

Рассмотрим какое-либо конкретно-означенное детерминированное свидетельство $e = \tilde{o}_0 \tilde{o}_1 \tilde{o}_2 \dots \tilde{o}_T$. В теории АБС стандартный алгоритм первой задачи апостериорного вывода может проагировать (распространять влияние) только свидетельство, полностью лежащее в ФЗ. Данное принадлежит $T + 1$ фрагменту знаний. Совершим преобразование, воспользовавшись правилом Байеса:

$$\begin{aligned} P(\tilde{o}_0 \tilde{o}_1 \tilde{o}_2 \dots \tilde{o}_T) &= P(\tilde{o}_0 \tilde{o}_1 \tilde{o}_2 \dots \tilde{o}_{T-1} | \tilde{o}_T) \cdot P(\tilde{o}_T) = \dots \\ &= P(\tilde{o}_0 | \tilde{o}_1 \tilde{o}_2 \dots \tilde{o}_T) \cdot P(\tilde{o}_1 | \tilde{o}_2 \dots \tilde{o}_T) \cdot \dots \cdot P(\tilde{o}_{T-1} | \tilde{o}_T) \cdot P(\tilde{o}_T). \end{aligned}$$

Теперь исходная вероятность состоит из произведения вероятностей свидетельств, полностью лежащих в соответствующих ФЗ. Будем проагировать, начиная с крайнего правого подсвидетельства ($\tilde{o}_T$). Оно будет поступать на вход к ФЗ $\tilde{o}_T x_T$. После его проагации на соседний ФЗ, он будет иметь новые апостериорные оценки вероятностей $P^{\tilde{o}_T}(\dots)$. Для этих оценок вероятностей будем проагировать $\tilde{o}_{T-1}$, поступающее в ФЗ $\tilde{o}_{T-1} x_{T-1}$, которое снова изменит оценки вероятностей для следующего ФЗ на апостериорные $P^{\tilde{o}_T \tilde{o}_{T-1}}(\dots)$, и т.д. Каждый раз будем проагировать на соседний ФЗ единичные подсвидетельства, двигаясь справа налево. В конце останется только перемножить вероятности единичных подсвидетельств. Данный алгоритм эквивалентен описанному в [1], так как свидетельство достаточно проагировать только на следующий ФЗ. Его апостериорная оценка изменит оценки следующих свидетельств так же, как если бы свидетельство проагировали на всю сеть, потому что для любого ФЗ $\tilde{o}_i x_i$ справедливо соотношение

$$P(\tilde{o}_i | \tilde{o}_{i+1} \dots \tilde{o}_T) = P(\tilde{o}_i | \tilde{o}_{i+1}) P(\tilde{o}_{i+1} | \tilde{o}_{i+2} \dots \tilde{o}_T).$$

Заключение

Известно, что СММ могут быть представлены как частный случай динамических байесовских сетей доверия, которые, в свою очередь, могут быть преобразованы в АБС. Отсюда возник естественный вопрос о прямой связи между СММ и АБС, который и был частично изучен в данной работе.

В работе приведены теория СММ, в том числе первая задача СММ, теория АБС, в частности, апостериорный вывод АБС, а также представление бинарной линейной по структуре СММ в виде АБС. Доказана эквивалентность апостериорного вывода для АБС и первой задачи СММ. Дан улучшенный (ускоренный) по сравнению с [19] алгоритм решения первой задачи СММ, состоящей в оценке вероятности последовательности наблюдений, в терминах апостериорного вывода АБС. Сложность была уменьшена в n раз, где n – количество состояний в СММ. Таким образом, приведенный алгоритм решения работает за полиномиальное от длины входа время. Точную оценку установить не представляется возможным, так как вопрос сложности проагации свидетельств на данный момент недостаточно изучен.

Первая задача была решена через АБС, что является примером использования АБС в теории СММ и может упростить дальнейшее развитие теории АБС в применении к СММ. Однако для этого необходимо проведение исследований. За рамками работы остаются вопросы, связанные со второй и третьей задачами СММ, которые также разрешимы в теории АБС, однако еще не было создано конкретных алгоритмов решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-01-00861-а «Методология построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений на основе баз фрагментов знаний с вероятностной неопределенностью».

Литература

1. Николенко С.И., Тулупьев А.Л. Самообучающиеся системы. – М.: МНЦМО, 2009. – 288 с.
2. Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. Probabilistic Networks and Expert Systems. – NY: Springer-Verlag, 1999. – 321 p.
3. Huang X., Acero A., Hsiao-Wuen Hon Spoken Language Processing. – Prentice Hall, 2001. – 1008 p.
4. Huang X., Jack M. and Y. Ariki. Hidden Markov Models for Speech Recognition. – Edinburgh University Press, 1990. – 276 p.
5. Jurafsky D., Martin J.H. Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing, Speech Recognition, and Computational Linguistics. – 2-d edition. – Prentice-Hall, 2009. – 944 p.

6. Stengel M. Introduction to Graphical Models, Hidden Markov Models and Bayesian Networks. Department of Information and Computer Sciences Toyohashi University of Technology Toyohashi, 441-8580. – Japan, 2003. – 46 p.
7. da-Silva C.Q. Hidden Markov models applied to a subsequence of the *Xylella fastidiosa* genome // Genet. Mol. Biol. – São Paulo, Dec. 2003. – V. 26. – № 4. – P. 529–535.
8. Li J., Gray R.M. Image Segmentation and Compression Using Hidden Markov Models. – 1-st edition. – Springer, 2000. – 141 p.
9. Bunke H., Caelli T. Hidden Markov Models Applications in Computer Vision. Series in Machine Perception and Artificial Intelligence. – World Scientific, 2001. – V. 45. – 244 p.
10. Тулупьев А.В., Николенко С.И., Сироткин А.В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. – СПб: Наука, 2006. – 608 с.
11. Сироткин А.В. Модели, алгоритмы и вычислительная сложность синтеза согласованных оценок истинности в алгебраических байесовских сетях // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 11. – С. 32–37.
12. Тулупьев А.Л. Алгебраические байесовские сети: реализация логико-вероятностного вывода в комплексе java-программ // Труды СПИИРАН. – СПб: Наука, 2009. – Вып. 8. – С. 191–232.
13. Тулупьев А.Л. Алгебраические байесовские сети: система операций глобального логико-вероятностного вывода // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – № 11. – С. 65–72.
14. Тулупьев А.Л. Апостериорные оценки вероятностей в идеале конъюнктов // Вестник СПбГУ. – 2010. – Сер. 10. – Вып. 1. – С. 95–104.
15. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Николенко С.И. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2009. – 400 с.
16. Опарин В.В., Фильченков А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Матроидное представление семейства графов смежности над набором фрагментов знаний // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4. – С. 73–76.
17. Фильченков А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В. Компаративный анализ клик минимальных графов смежности алгебраических байесовских сетей // Труды СПИИРАН. – СПб: Наука, 2010. – Вып. 2. – С. 87–105.
18. Тулупьев А.Л. Задача локального автоматического обучения в алгебраических байесовских сетях: логико-вероятностный подход // Труды СПИИРАН. – СПб: Наука, 2008. – Вып. 7. – С. 11–25.
19. Момзикова М.П., Великодная О.И., Пинский М.Я., Сироткин А.В., Тулупьев А.Л., Фильченков А.А. Оценка вероятности наблюдаемой последовательности в бинарных линейных по структуре скрытых марковских моделях с помощью апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях // Труды СПИИРАН. – СПб: Наука, 2010. – Вып. 2. – С. 122–142.
20. Forney D.G. The Viterbi Algorithm // Proceedings of the IEEE. – 1973. – V. 61. – № 3. – P. 268–278.
21. Welch L.R. Hidden Markov Models and the Baum-Welch Algorithm // IEEE Information Theory Society Newsletter. – 2003. – V. 53. – № 4. – P. 10–13.
22. Тулупьев А.Л. Алгебраические байесовские сети. Логико-вероятностный подход к моделированию баз знаний с неопределенностью. – СПб: СПИИРАН, 2000. – 292 с.
23. Момзикова М.П., Великодная О.И., Пинский М.Я., Сироткин А.В., Тулупьев А.Л., Фильченков А.А. Представление бинарных линейных по структуре скрытых марковских моделей в виде алгебраических байесовских сетей // Труды СПИИРАН. – СПб: Наука, 2010. – Вып. 1. – С. 134–150.

<i>Пинский Михаил Яковлевич</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mikhailpinsky@gmail.com
<i>Сироткин Александр Владимирович</i>	–	Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, мл. научный сотрудник, alexander.sirotkin@gmail.com
<i>Тулупьев Александр Львович</i>	–	Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. лабораторией, alexander.tulupiev@gmail.com
<i>Фильченков Андрей Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, мл. научный сотрудник, aaafil@mail.ru

УДК 654.154.4

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СИГНАЛИЗАЦИИ НА ЦИФРОВЫХ СЕТЯХ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ**Е.А. Павловский**

Проведен анализ требований к задачам, структуре и функциям системы, осуществляющей мониторинг сигнализации по общему каналу на узлах цифровых телефонных сетей. Описаны технические решения ее практической реализации.

Ключевые слова: узел связи, АТС, мониторинг, общий канал сигнализации, тестер сигнализации, ОКС, удаленный доступ.

Введение

Современные системы телефонной связи можно разделить на три основных поколения: уходящие в прошлое аналоговые системы, современные цифровые системы с коммутацией каналов, составляющие львиную долю оборудования как государственных, так и ведомственных сетей [1], и перспективные системы телефонии на базе коммутации пакетов. Из-за широкого распространения цифровых сетей с коммутацией каналов, в особенности – использующих управление с помощью сигнализации по общему каналу (ОКС), важным вопросом является мониторинг их технического состояния, быстрый поиск причин ухудшения качества абонентов и прогнозирование роста нагрузки. Для решения этих задач могут применяться относительно недорогие автономные тестеры сигнализации, обеспечивающие только работу на месте и не дающие общей картины состояния сети, а также комплексные системы мониторинга и прогнозирования, такие как система «Спайдер» [2], однако последние имеют очень высокую стоимость и требования к квалификации персонала. В данной работе описан подход, обеспечивающий достаточную степень комплексности, к построению системы мониторинга, доступной для небольших операторов связи и ведомственных телефонных сетей, и приведены сведения о практической реализации этого подхода.

Классификация методов контроля и сбора статистики

Существует множество подходов к контролю сигнализации на соединительных линиях с использованием ОКС. Условно их можно разделить на несколько классов.

- Первый класс – контроль на уровне сигналов, передаваемых по физическим цепям. Этот класс включает в себя контроль соответствия формы электрических сигналов стандартным шаблонам, измерение уровня передаваемого сигнала, искажений и других физических параметров. Эти методы применяются при начальном монтаже соединительных линий и устранении аппаратных неисправностей оборудования и линий; непрерывный контроль физических параметров во время нормальной работы системы связи, как правило, не требуется.
- Второй класс – контроль битовой структуры потока. Сюда относится контроль сигналов цикловой синхронизации, а также битстаффинга в каналах сигнализации. Создание отдельной аппаратуры для этой цели редко оправдано, поэтому такие функции включаются в приборы, реализующие методы первого и третьего классов.
- Третий класс – мониторинг сигнализации ОКС. Этот класс предполагает расшифровку и проверку правильности информации сигнализации, передаваемой между двумя телефонными станциями по одному из стандартных протоколов (ОКС-7, DSS1, QSIG и др.) С использованием этой информации также возможен сбор статистики по нагрузке как на каналы передачи речевой информации, так и на сам общий канал сигнализации. Многие современные автоматические телефонные станции (АТС) имеют встроенные средства самодиагностики этого класса, однако, поскольку они являются дополнительной функцией, их реализация относительно примитивна и неудобна в использовании. Кроме того, при использовании оборудования разных производителей, что актуально в современных условиях конкуренции, требуется независимое устройство контроля для разрешения конфликтных ситуаций и систематизации статистических данных.
- Четвертый класс – это активные методы проверки, предполагающие включение в тракт в роли «эталонной» станции и имитацию взаимодействия. Приборы, реализующие такой контроль, функционально просты, но из-за огромного объема сценариев функционирования телефонной станции, особенно с учетом всех нестандартных ситуаций, чрезвычайно трудоемки в разработке. Методы этого класса широко применяются при сертификации телекоммуникационного оборудования, но практически никогда – при его эксплуатации.

Итак, для мониторинга системы телефонной связи в процессе эксплуатации наиболее информативным является мониторинг ОКС. Перехват и расшифровка сообщений, передаваемых по общему каналу сигнализации, позволяет не только диагностировать неисправности, но и получить большое количество информации о функционировании сети связи в целом. При помощи сбора статистики по вызовам согласно методикам [3] можно отслеживать тенденции использования услуг связи пользователями и точнее прогнозировать развитие телефонной сети.

Требования к системе мониторинга ОКС

Основной сложностью в реализации мониторинга ОКС является то, что существующие системы сигнализации по общему каналу обладают чрезвычайно широкими возможностями по обработке вызовов и предоставлению дополнительных услуг, что влечет за собой чрезвычайную сложность и объем сценариев взаимодействия. При разработке аппаратно-программного обеспечения АТС или другого подобного оборудования решение является простым: для тех сценариев, которые данным оборудованием не поддерживаются, предусматривается лишь возможность корректного отказа. Такой подход, очевидно, недопустим при разработке универсального оборудования мониторинга.

Другой проблемой, встающей перед разработчиками приборов мониторинга, является то, что такой прибор должен быть рассчитан на подключение к каналу сигнализации без перезапуска потока – а это означает, что в момент подключения связь между станциями уже, скорее всего, будет установлена, и какие-то сценарии уже будут находиться в процессе выполнения. Соответственно, необходимо уметь осуществлять проверку корректности сценариев с любого момента, что сильно затрудняет проверку взаимосвязей между предыдущими и последующими сообщениями. Так, например, не зная, как происходило начало вызова, не всегда можно определить корректность его завершения; корректность активации услуги невозможно определить без знания того, была ли эта услуга заказана абонентом, и т.д.

Также зачастую отмечается [4], что неоднозначность спецификаций, данных ITU-T, также может представлять проблему при реализации: хотя для большинства случаев в рекомендациях приведены алгоритмы, они не могут включать в себя всего многообразия нестандартных ситуаций, которые могут возникнуть в реальных условиях.

Ключ к решению описанных выше проблем лежит в том, что конечным звеном в любой системе мониторинга является квалифицированный оператор – в отличие от телефонной станции, которая по возможности не должна требовать никакого вмешательства оператора при работе. Таким образом, можно распределить задачи контроля между оператором и аппаратурой так, чтобы последняя выполняла более простые, но трудоемкие части работы, оставляя решение проблем, требующих интеллектуального решения, оператору.

К алгоритмически простым, но ресурсоемким задачам, которые целесообразно реализовать в оборудовании, относятся:

- выделение канала сигнализации из общего потока данных;
- выделение отдельных сообщений;
- обработка битстаффинга.

К алгоритмически более сложным и потому реализуемым программно задачам относятся:

- проверка структуры сообщений и допустимости значений битовых полей;
- проверка корректности передачи сообщений с помощью контрольных полей;
- текстовая расшифровка значений битовых полей для представления оператору;
- накопление и хранение базы информации за определенный период времени;
- подсчет статистики по нагрузке в соответствии с методикой ITU-T E.500.

На долю оператора остаются наиболее «интеллектуальные», но не настолько трудоемкие функции, которые, к тому же, не нужно осуществлять в реальном времени и для всех сообщений, а именно:

- проверка соответствия передаваемой информации реальным услугам и возможностям конкретного оборудования;
- проверка соблюдения последовательности передачи сообщений;
- анализ статистических данных.

Для удобства работы оператору необходимо предоставить средства для фильтрации, поиска и наглядного представления собранной информации. С точки зрения как удобства, так и простоты разработки программного обеспечения для взаимодействия с оператором целесообразно использовать персональный компьютер.

Поскольку сеть телефонной связи состоит из большого количества узлов, а рабочие места операторов на узлах могут располагаться в отдельном помещении, необходимо предусмотреть возможность удаленного доступа к системе мониторинга, а также одновременной работы множества операторов с одной системой.

Таким образом, система мониторинга должна состоять из следующих компонентов:

1. устройств, обеспечивающих параллельное подключение к соединительным линиям, выделение каналов сигнализации и аппаратную низкоуровневую обработку сигнала (выделение сообщений, битстаффинг);
2. сервера(ов), обеспечивающего высокоуровневую обработку, сбор статистики, хранение информации и предоставляющего доступ операторам с удаленных рабочих мест;
3. клиентского программного обеспечения для рабочих мест операторов с наглядным пользовательским интерфейсом.

Программно-аппаратная реализация системы мониторинга

На основе выводов, полученных выше, можно составить общую структурную схему системы (рис. 1).

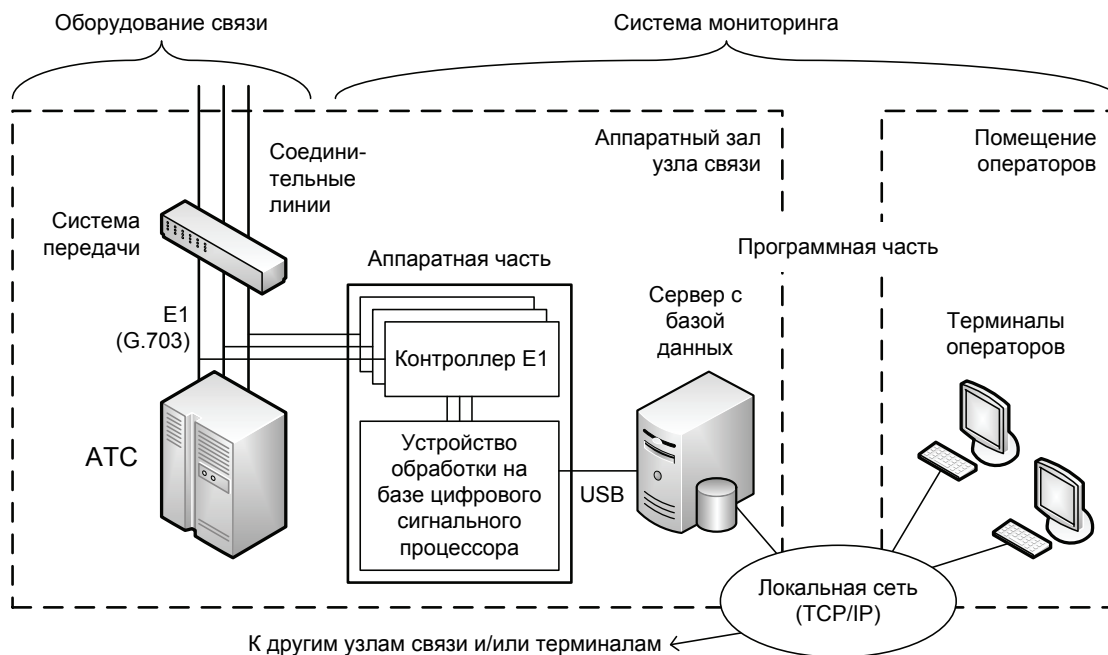


Рис. 1. Реализация системы мониторинга

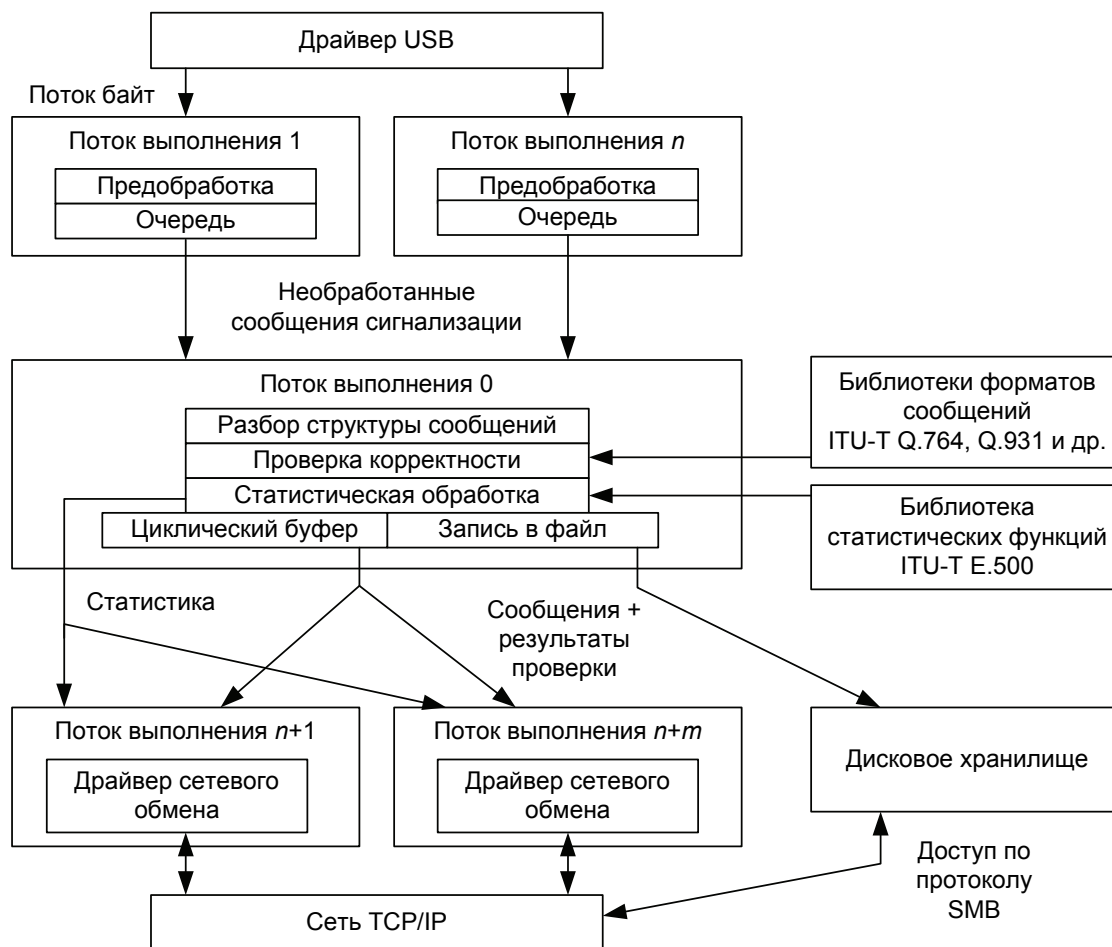


Рис. 2. Структура программного обеспечения сервера

Для обеспечения простоты разработки и максимальной совместимости между компонентами системы использованы стандартные интерфейсы – USB для сопряжения сервера с аппаратной частью и TCP/IP (на базе проводной сети Ethernet, беспроводной сети стандарта 802.11 и др.) для подключения терминалов операторов. Из-за использования TCP/IP возможна также работа и через сеть Интернет при наличии доступа с достаточной скоростью.

В зависимости от структуры сети связи и нагрузки на каналы сигнализации количество элементов каждого вида может быть разным. Так, в одном аппаратном блоке может располагаться от 2 до 8 контроллеров интерфейсов E1, а количество блоков и терминалов операторов, подключаемых к одному серверу, ограничено только его производительностью и может достигать десятков, что достаточно для обслуживания одним сервером самых крупных узлов связи.

На рис. 2 приведена структура программного обеспечения сервера. Для оптимизации работы системы на многопроцессорных серверах некоторые ресурсоемкие функции, а также функции, зависящие от внешних устройств, выносятся в отдельные потоки выполнения. С целью предотвращения потери данных при кратковременных перегрузках используется буферизация данных как на вводе, так и на выводе к терминалам операторов.

В соответствии с представленными структурными схемами разработан тестер межстанционной сигнализации, прошедший сертификацию для использования на сетях связи и используемый как в коммерческих организациях, так и для организации учебного процесса в лаборатории связи Петербургского государственного университета путей сообщения.

Заключение

Предложенные в работе принципы позволили создать программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить непрерывный мониторинг качества обслуживания в сети телефонной связи и своевременно устранять возникающие неполадки, не дожидаясь жалоб абонентов, что позволяет сократить расходы на обслуживание сети. Полученная система не уступает по характеристикам более дорогим аналогам и уже зарекомендовала себя как в практическом использовании на сетях операторов связи «Волга-телеком» и «Сибирьтелеком», а также при обучении студентов в лабораториях телефонной связи Петербургского государственного университета путей сообщения и Петербургского энергетического института повышения квалификации.

Литература

1. Павловский Е.А. Обзор систем сигнализации на цифровых сетях оперативно-технологической связи. // Сборник трудов научной конференции «Шаг в будущее-2005». – СПб: ПГУПС, 2005. – С. 183–185.
2. Ловягина О.Г. Эволюция распределенного мониторинга сети ОКС-7 // Вестник связи. – 2006. – № 12. – С. 26–32.
3. Villy B. Iversen. Teletraffic Engineering and Network Planning. – Technical University of Denmark, 2011. – 583 с.
4. Росляков А.В. ОКС № 7. Архитектура, протоколы, применение. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 320 с.

Павловский Евгений Алексеевич – Петербургский государственный университет путей сообщения, ст. преподаватель, mozgj@vast-arp.spb.ru

УДК 004.272.44

ПРИМЕНЕНИЕ ПОТОКОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Р.И. Попов

Представлен подход к проектированию специализированных процессоров на основе потоковой модели алгоритма. Рассмотрены основные классы потоковых моделей. Предложена модель с распределенным управлением, эффективная и простая в аппаратной реализации. Рассмотрены основные факторы, ограничивающие производительность потоковых процессоров.

Ключевые слова: потоковые процессоры, синтез специализированных процессоров, потоковые вычислительные модели, булевский поток данных.

Введение

Продолжающееся долгие годы эволюционное развитие полупроводниковых технологий сопровождается постоянным увеличением числа транзисторов в микросхемах и снижением их цены. Эффективное использование этих новых ресурсов для достижения большей производительности и энергоэффективности конечных решений с каждым годом становится все более сложной задачей. Традиционные архитектурные решения не всегда хорошо масштабируются, и проектировщикам приходится искать новые

подходы к организации вычислительного процесса в цифровых микросхемах. Одним из таких подходов является синтез специализированных процессоров из потоковой модели алгоритма.

Современные процессорные ядра общего назначения, как правило, построенные на базе суперскалярной архитектуры, оказываются очень эффективными в задачах с большим количеством ветвлений (за счет использования блока предсказания переходов) и в тех случаях, когда удастся добиться высокого уровня параллелизма на уровне машинных команд. Однако, когда приходится иметь дело с обработкой больших объемов данных в реальном времени, производительность традиционных архитектур оказывается недостаточной или достигается за счет радикального повышения тактовой частоты при использовании высокоскоростных техпроцессов с большими токами утечки [1]. К таким задачам относятся реализация коммуникационных протоколов, видео- и аудиообработка, компьютерная графика и множество других задач из разных прикладных областей. Характерным для таких задач является применение набора однородных вычислений к большому объему данных в памяти (к примеру, сжатие данных) или к непрерывно поступающему потоку данных (к примеру, обработка аудиопотока). Наиболее эффективно такие задачи решаются на специализированных процессорах, использующих пространственный параллелизм, заложенный в алгоритмах. Такие процессоры, часто называемые потоковыми процессорами, аппаратно реализуют одну из потоковых вычислительных моделей.

Алгоритм для потокового процессора можно представить в виде графа потока данных (dataflow graph, DFG). DFG описывает алгоритм в виде направленного графа, где вершины представляют вычисления (функции), а дуги описывают потоки данных (коммуникации между вершинами). DFG не содержит информации о том, в каком порядке должны запускаться вычисления в вершинах и каким способом передаются данные, эти правила (семантика) задаются потоковой вычислительной моделью. Первой такой моделью считается модель сети процессов, предложенная Каном в 1974 г. [2]. За прошедшие 40 лет было предложено множество потоковых моделей, нашедших применение в проектировании и программировании систем цифровой обработки данных. В работе рассмотрены те из них, которые пригодны для прямой аппаратной реализации.

Процесс проектирования специализированного потокового процессора (акселератора) можно разбить на следующие шаги:

1. разработка и верификация алгоритма на императивном языке высокого уровня, к примеру, на C++ или в среде Matlab;
2. построение и оптимизация модели алгоритма в виде DFG;
3. реализация модели в виде специализированного процессора.

В настоящее время шаги 2 и 3 могут быть частично или полностью автоматизированы. Над автоматизацией и оптимизацией этого процесса работают несколько исследовательских коллективов по всему миру. Цель этой работы – рассмотреть выразительные возможности различных потоковых вычислительных моделей и выделить наиболее пригодную для реализации в аппаратуре.

Потоковые модели вычислений

Потоковые модели можно условно разделить на 2 класса: статически диспетчеризуемые (statically schedulable), для которых можно заранее (до запуска модели) составить расписание запуска вычислений, и динамические, для которых запуск тех или иных вычислений зависит от потока данных, поступающего в процессе работы. Динамические модели плохо подходят для реализации в аппаратуре, так как требуют динамического выделения буферов для передаваемых в процессе работы вычислительной системы данных. Для статически диспетчеризуемых моделей можно определить размер буферов между вычислительными узлами заранее, в процессе проектирования вычислительной системы.

Классической статически диспетчеризуемой моделью является модель с синхронным потоком данных (synchronous data flow, SDF) [3]. В SDF вычислительный узел потребляет и производит заданный заранее объем данных при каждом запуске. Эта информация позволяет рассчитать расписание запуска вычислений и размеры FIFO-буферов между узлами. Другой важной особенностью модели SDF является возможность приведения любой мультитактовой системы к монотактовой, как показано на рис. 1.

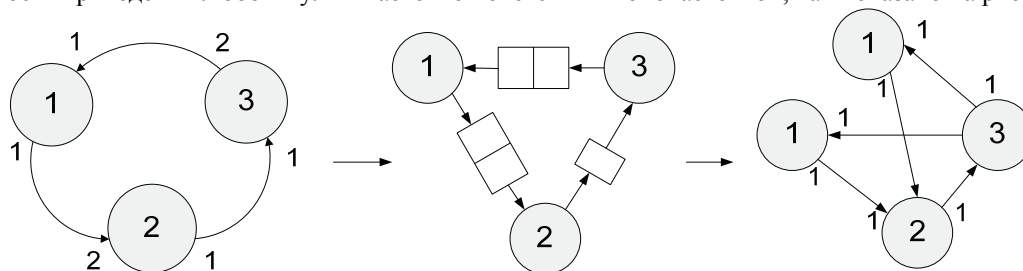


Рис. 1. Выделение FIFO-буферов в SDF модели и преобразование модели к монотактовой

Основным недостатком классической SDF модели является невозможность реализации ветвлений и циклов с переменным числом итераций. Узел, осуществляющий вычисления по условию, нарушает правила SDF, так как объем данных, производимых им, зависит от значения условия на входе.

Для реализации циклов и ветвлений для статически диспетчеризуемых моделей придумано несколько расширений, наиболее часто используемым из которых является булевский поток данных (Boolean Dataflow, BDF) [4]. Эта модель расширяет SDF двумя специальными узлами – SWITCH и SELECT, реализующими ветвления по булевому признаку. Пример реализации ветвления в BDF показан на рис. 2.

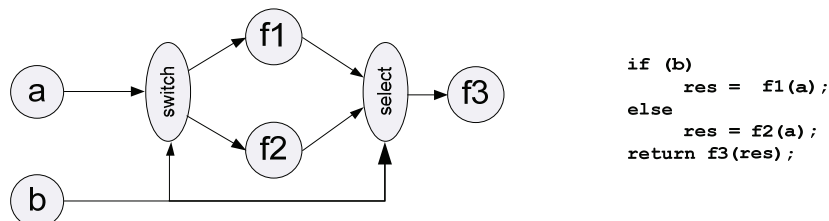


Рис. 2. Реализация ветвлений в BDF

В классических трудах, посвященных потоковым вычислениям, в качестве их приложения рассматривается задача программирования многопроцессорных систем. Предполагается, что вычисления в каждом узле занимают значительное время. Для каждой модели составляется расписание запуска вычислений, максимально эффективно использующее те процессорные ресурсы, которые доступны разработчику.

В отличие от реализации на многопроцессорной системе, прямая аппаратная реализация позволяет полностью реализовать граф вычислений в виде вычислительного конвейера, тем самым отпадает необходимость создавать модуль, реализующий исполнение расписания вычислений. Это также упрощает процесс трассировки межсоединений в микросхеме, так как большинство связей становятся локальными. Однако в этом случае система будет производить неправильные данные до того момента, пока конвейер не будет полностью прогружен. Чтобы избежать этого, можно добавить признак достоверности ко всем данным, передающимся по системе. В таком случае вычислительный узел, получивший на входе данные без признака достоверности, на выходе также должен производить недостоверные данные, а узлы с побочными эффектами, такие как порты памяти, должны игнорировать такие данные.

Подобную модель можно считать расширением BDF. Такое расширение также упрощает реализацию ветвления, как показано на рис. 3. В этом случае узел SELECT передает на выход данные, пришедшие с признаком достоверности.

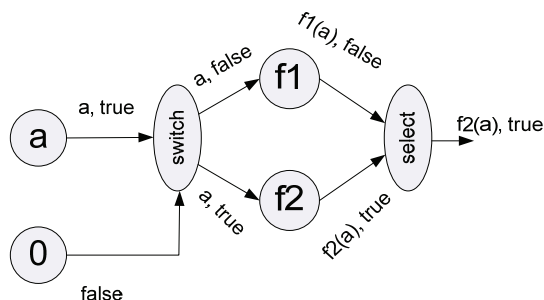


Рис. 3. Реализация ветвления в расширенной модели BDF

Еще одним полезным применением признака достоверности данных является его использование для отключения тактирования (clock gating) регистров в неактивных ветвях графа. Это позволяет значительно снизить динамическое энергопотребление в процессорах, реализующих алгоритмы с большим количеством ветвлений.

Далее рассмотрим на примере особенности реализации потоковой машины, реализующей данную вычислительную модель.

Аппаратная реализация потоковой машины

Вычислительную машину можно представить в виде тракта данных, состоящего из набора функциональных блоков различного назначения:

- вычислительных блоков, реализующих различные арифметические операции;
- портов ввода-вывода, используемых для получения данных из памяти (порты с адресом) и из различных каналов передачи данных (порты без адреса);
- конвейерных регистров.

Каждый функциональный блок может содержать от одного и более портов данных. Вычисления могут производиться с задержкой, укладывающейся в период тактового сигнала, или за несколько тактов. Пример функционального блока (двухстадийный умножитель) и его аппаратная реализация показаны на рис. 4.

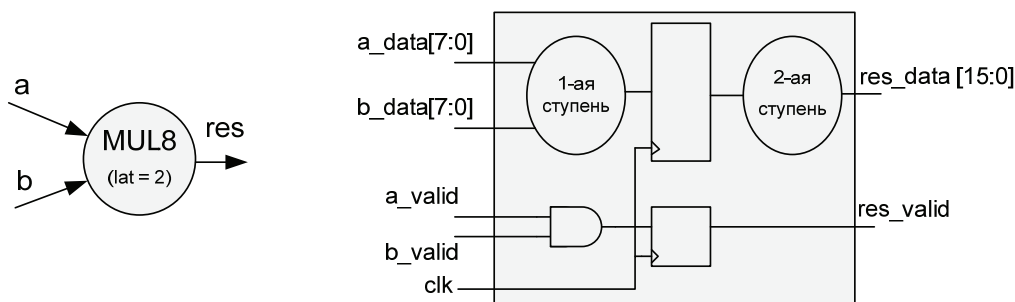


Рис. 4. Пример функционального блока – двухстадийный умножитель 8×8

В качестве примера акселератора рассмотрим модуль, вычисляющий следующую функцию:

```
void func (unsigned r, int *memory)
{
    for (i=0; i<r ; i++)
        if (i < r/2) memory[i] = memory[i] + i;
        else memory [i] = i;
}
```

Будем считать, что операция доступа к памяти занимает один такт, а все остальные операции выполняются в виде комбинационных схем и укладываются в период тактового сигнала. Модель одной из возможных реализаций этой функции показана на рис. 5.

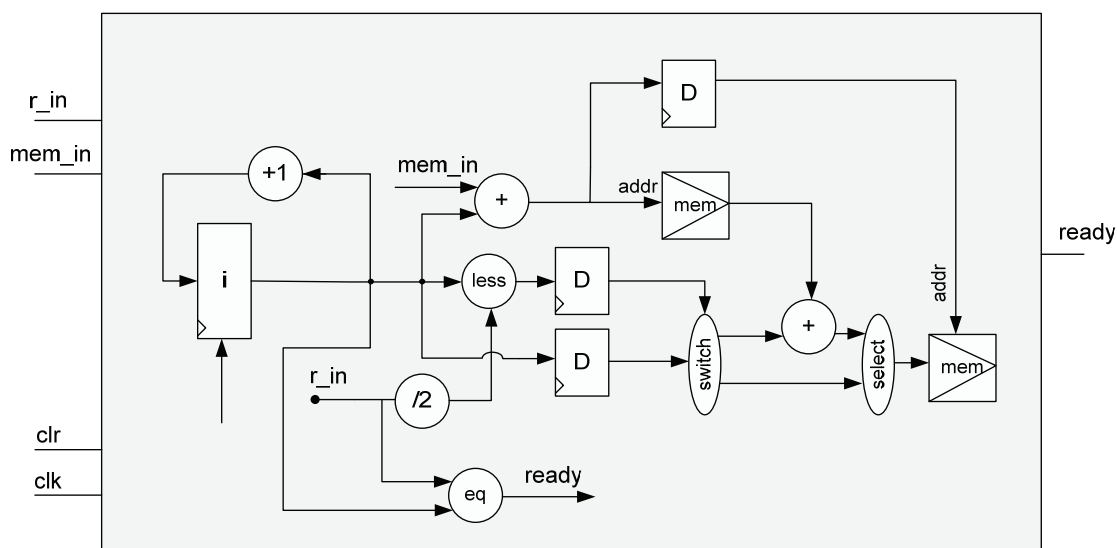


Рис. 5. Модель потокового акселератора

На схеме функциональные блоки комбинационного типа обозначены кругами, а функциональные блоки с внутренним состоянием и конвейерные регистры обозначены прямоугольниками.

Производительность потоковых акселераторов зависит от трех основных параметров.

1. Архитектура памяти. В случае, когда модель содержит несколько портов в общее адресное пространство, архитектура памяти (алгоритм работы кэша, количество банков и блоки предвыборки) должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить бесконфликтное обращение по всем портам. В случае возникновения конфликта, исполнение модели останавливается до его разрешения.
2. Межитерационные зависимости по данным, ограничивающие возможности по распараллеливанию итераций циклов. Если i -я итерация цикла зависит от данных, получаемых на $(i-1)$ -й итерации, это означает, что цикл не может быть полностью распараллелен.
3. Задержки на обратных связях. Предельно допустимая частота работы акселератора будет определяться максимальной задержкой на обратных связях. Во всех остальных случаях критические пути в схеме можно разбить конвейерными регистрами.

В показанном примере используются два порта в общее адресное пространство. Для обеспечения бесконфликтной работы памяти достаточно применить двухпортовую память или регистровый файл. В случае, когда доступна только однопортовая память, акселератор будет проводить половину времени работы в ожидании данных от памяти. В более сложных случаях для обеспечения высокой производительности алгоритм должен быть переработан для использования нескольких независимых банков памяти.

В показанном примере нет межитерационных зависимостей, поэтому он может быть легко распараллелен путем дублирования аппаратуры. Единственная обратная связь проходит через функциональный блок (+1) в счетчике итераций. Если задержка через этот функциональный блок составляет 5 нс, то акселератор сможет работать на частоте до 200 МГц при соответствующей конвейеризации остальной части тракта данных. Чтобы поднять частоту акселератора, потребуется разбить операцию на обратной связи на несколько стадий, однако это не приведет к увеличению производительности, так как счетчик итерации будет производить действительные данные только 1 раз за N тактов, где N – число конвейерных стадий на обратной связи.

Заключение

В работе представлены основные типы потоковых вычислительных моделей, пригодных для аппаратной реализации. Показан пример создания акселератора на основе расширенной BDF модели, являющейся одной из наиболее простых и эффективных при прямой реализации в аппаратуре. Выделены основные факторы, влияющие на производительность потоковых машин.

Потоковые модели обладают значительной выразительной мощностью, что позволяет с их применением описывать широкий класс алгоритмов из различных предметных областей. При этом полученные модели пригодны как для прямой аппаратной реализации, так и для отображения на различные реконфигурируемые машины [5]. Наиболее перспективной областью применения потоковых моделей является их использование в виде промежуточного представления в системах высокоуровневого синтеза. С их помощью можно выразить все вычислительные и управляющие конструкции, используемые в современных языках высокого уровня, при этом они позволяют максимально использовать возможности распараллеливания вычислений в специализированной аппаратуре.

Литература

1. Budiu M., Artigas P.V., Goldstein S.C. Dataflow: A Complement to Superscalar // Proc. of the IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software. – Washington, DC, USA, 2005. – P. 177–186.
2. Kahn G. The semantics of a simple language for parallel programming // Proc. of IFIP Congress. – Stockholm, Sweden, 1974. – P. 471–475.
3. Edward A. Lee, David G. Messerschmitt. Synchronous Data Flow // Proc. of the IEEE. – 1997. – V. 75. – № 9. – P. 1235–1245.
4. Buck J.T. A dynamic dataflow model suitable for efficient mixed hardware and software implementations of DSP applications // Proc. of the Third International Workshop on Hardware/Software Codesign. – France, 1994. – P. 165–172.
5. Swanson S., Michelson, K. WaveScalar // Proc. of the 36th annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture. – USA, 2003. – P. 291–302.

Попов Роман Игоревич

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

УДК 004.021

МЕТОД ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК В НАБОРЕ ЧТЕНИЙ НУКЛЕОТИДНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

А.В. Александров, С.В. Казаков, С.В. Мельников, А.А. Сергушичев, Ф.Н. Царев, А.А. Шалыто

Задача секвенирования и сборки больших геномов является одной из актуальных задач современной биоинформатики. Исходными данными для сборки генома являются так называемые чтения, получаемые с помощью машин-секвенаторов. Эти чтения могут содержать ошибки, вызванные тем, что секвенирование основано на выполнении ряда химических реакций. Часто одним из этапов сборки генома является исправление ошибок в наборе чтений. Большинство методов исправления ошибок в чтениях строят граф де Брюина. Предлагаемый метод не использует граф де Брюина, что позволяет существенно сократить использование памяти. Метод реализован и опробован при сборке генома в рамках проекта «*de novo Genome Assembly Project*».

Ключевые слова: геном, секвенирование, сборка генома, исправление ошибок.

Введение

Многие современные задачи биологии и медицины требуют знания генома живых организмов, который состоит из нескольких нуклеотидных последовательностей молекул дезоксирибонуклеиновой ки-

слоты (ДНК). В связи с этим возникает необходимость в дешевом и быстром методе секвенирования, т.е. определения последовательности нуклеотидов в образце ДНК.

Существующие технические средства (секвенаторы) не позволяют считать разом всю молекулу ДНК. Вместо этого они позволяют читать фрагменты генома небольшой длины. Длина фрагмента может варьироваться и является важным параметром секвенирования, так как от нее напрямую зависит стоимость секвенирования и время, затрачиваемое на чтение одного фрагмента: чем больше длина считываемого фрагмента, тем выше стоимость чтения и тем дольше это чтение происходит. В связи с этим сейчас получил распространение следующий дешевый и эффективный подход: сначала вычленяется случайно расположенный в геноме фрагмент длиной около 500 нуклеотидов, а затем считываются его префикс и суффикс (длиной около 80–120 нуклеотидов каждый). Эти префикс и суффикс называются *парными чтениями*. Этот процесс повторяется такое число раз, чтобы обеспечить достаточно большое покрытие генома чтениями.

Отметим, что описанные выше префикс и суффикс читаются с разных нитей ДНК: один – с прямой, другой – с обратно-комплементарной, причем неизвестно, который откуда. По этой причине удобно рассматривать геном и чтения, дополненные своими обратно-комплементарными копиями.

Описанный выше технологический процесс реализуется, например, секвенаторами компании Illumina [1]. При этом важной особенностью работы этих секвенаторов является возможность совершения ошибок при чтении. Это означает, что некоторые нуклеотиды секвенируются неверно (например, вместо нуклеотида А читается нуклеотид G). Ошибки замены – не единственный тип ошибок, допускаемый секвенаторами. Так, возможны также ошибки вставки и удаления. Однако эти ошибки встречаются в довольно специфических случаях и по сравнению с ошибками замены очень редки.

Кроме самой последовательности нуклеотидов, результатом работы секвенатора является информация о качестве прочтения каждого из нуклеотидов. По ней может быть вычислена вероятность того, что данный нуклеотид был прочитан неверно.

Для эффективной работы последующих стадий алгоритма очень важно исправить как можно больше ошибок в чтениях.

Существует большое число сборщиков, осуществляющих все или только некоторые из приведенных выше этапов. Все их можно разделить на две группы. Одни используют для исправления ошибок так называемый граф де Брюина [2], например ABySS [3], Velvet [4] или SOAPdenovo [5]. Другие проводят частотный анализ строк длины k (их обычно называют k -мерами) – для каждого k -мера считают, сколько раз он встретился в чтениях, и на основе этих данных исправляют ошибки. Так работают, например, ALLPATHS [6] и EULER [7]. Все эти методы довольно требовательны к вычислительным ресурсам и не очень хорошо масштабируются.

Целью настоящей работы является разработка метода, лишенного указанных недостатков, который будет использоваться в качестве первого этапа сборки генома из набора парных чтений.

Идея метода

Для эффективного исправления ошибок необходимо, чтобы каждая позиция генома была прочитана несколько раз, что, ввиду небольшой вероятности ошибки, дает право считать, что наибольшее число раз нуклеотид на каждой позиции был прочитан верно. На практике используются наборы чтений, покрывающие геном несколько десятков раз. Важно отметить, что не только отдельные позиции всего генома были прочитаны несколько десятков раз, но и небольшие его подстроки (не длиннее самих чтений) встречаются в чтениях несколько раз, причем чем длиннее подстрока, тем меньше шансов, что несколько различных чтений ее содержат. Последнее соображение вытекает не только из увеличения вероятности попадания чтения на конкретную подстроку при увеличении ее длины, но и из факта наличия в чтениях ошибок.

В работе рассматриваются строки одинаковой длины k (так называемые k -меры). Для каждого k -мера, присутствующего в чтениях (прямых или обратно-комплементарных) хотя бы раз, вычислим, сколько раз он встречается в чтениях. На основании этой статистики все k -меры можно разделить на 2 группы – «надежные» k -меры и «подозрительные». «Надежные» k -меры – это те, которые встречаются в чтениях достаточно большое число раз – не меньше значения некоторого порога t , которое является параметром алгоритма и выбирается вручную. С «надежными» k -мерами делать ничего не нужно, предполагается, что в них ошибок нет. «Подозрительные» же k -меры вызваны или плохим покрытием тех частей генома, откуда они были прочитаны, либо, что гораздо более вероятно, наличием в них одной или нескольких ошибок, которые надлежит исправить.

После выделения «подозрительных» k -меров для каждого из них необходимо определить, в какой именно позиции могла быть совершена ошибка. Для этого предлагается перебрать все позиции k -мера (их ровно k) и все возможные нуклеотиды, попробовать заменить имеющийся нуклеотид на перебираемый и проанализировать получившийся k -мер. Если новый k -мер попадает в группу «надежных», значит, возможно, рассматриваемый k -мер является результатом его ошибочного прочтения. Если в течение пе-

ребора был найден только один «надежный» k -мер, получающийся из «подозрительного» путем замены одного нуклеотида на другой, полагается, что данный «подозрительный» k -мер исправлен, а соответствующее исправление запоминается. Если таких k -меров несколько, неясно, какое из исправлений запоминать, поэтому в таких случаях «подозрительные» k -меры не исправляются. И, наконец, если не было найдено ни одного способа, исправить «подозрительный» k -мер, полагается, что в нем было совершено больше одной ошибки, после чего запускается аналогичная процедура, но с исправлением не одного, а сразу двух нуклеотидов. Аналогичным образом можно пытаться изменить не только пары, но и тройки, а также кортежи из большего числа нуклеотидов, однако данное обобщение ощутимо сказывается на быстродействии алгоритма.

При выборе значения параметра k следует учитывать следующие соображения.

- Величина k должна быть значительно меньше длины чтений. Если длина k -мера будет сравнима с длиной чтения, то большинство k -меров будет встречаться в чтениях один раз, что не даст никакой информации для исправления ошибок.
- Величина k должна быть достаточно большой, чтобы вероятность того, что случайный k -мер заданной длины встречается в геноме, была ничтожно малой. В противном случае некоторые k -меры, содержащие ошибку, не будут исправлены только потому, что есть достаточно большая вероятность того, что эти k -меры на самом деле встречаются в геноме, а тогда они могут много раз встречаться в чтениях.

Алгоритм исправления ошибок в чтениях

Для начала отметим, что качество нуклеотидов сильно ухудшается у конца чтения, поэтому для данного алгоритма имеет смысл обрезать куски чтений плохого качества, так как, с одной стороны, благодаря им образуется много «подозрительных» k -меров, с другой стороны, их невозможно исправить из-за большого числа ошибок.

Также важно заметить, что все k -меры можно разбить на группы на основании префикса небольшой длины, с которого они начинаются. Если при этом не исправлять ошибки в префиксе, то исправление не выводит k -меры из группы. Это не повлечет за собой неисправленные ошибки в префиксах, так как при обращении k -мера его префикс становится суффиксом.

Таким образом, алгоритм состоит из следующих шагов:

- обрезание k -меров на основании качества;
- разбиение k -меров на группы на основании префиксов;
- выполнение для каждой группы:
 - сбор статистики по k -мерам;
 - исправление ошибок.

Важно отметить, что алгоритм поиска ошибок в k -мерах легко распараллеливается, так как для обработки одного k -мера ему требуется только доступ на чтение к общей структуре данных, хранящей статистику по содержанию k -меров в чтениях, а также кратковременный доступ на запись для сохранения результата.

Экспериментальные результаты

Описанный подход был разработан и применен в рамках проекта dnGASP [8]. В этом проекте участникам предлагалось восстановить синтетический геном, содержащий около 1,8 миллиардов нуклеотидов, который был покрыт чтениями 44 раза. Этот геном являлся смесью геномов различных живых организмов. При реализации алгоритма для хранения k -меров использовалась хэш-таблица с открытой адресацией [9]. Это позволило осуществлять добавление нового k -мера и проверку «надежности» нового за константное время (последнее особенно важно для распараллеливания алгоритма). Ввиду того, что в рамках этого конкурса чтения имели длину 114, было выбрано значение k , равное 30.

По частотному распределению k -меров (рисунок) было выбрано значение порога t , равное четырем. Алгоритм исправления ошибок работал на компьютере с четырьмя шестиядерными процессорами Intel® Xeon® E7450 с тактовой частотой 2,4 ГГц и с 24 ГБ оперативной памяти. До запуска алгоритма в исходных данных было 6,5 миллиардов различных k -меров, из которых 3 миллиарда «надежных». Алгоритм работал около 24 часов, после чего в данных стало 3,9 миллиардов (что на 40% меньше, чем в начале) различных k -меров, из которых 3,3 миллиарда «надежных».

Заключение

Разработан метод исправления ошибок, основанный на частотном анализе k -меров. Проведено экспериментальное исследование метода, показавшее его работоспособность на данных, близких к реальным. Разработанный метод может эффективно использовать как достаточно малый, так и большой объем ресурсов. В настоящий момент исследуются возможные изменения, которые можно осуществить для улучшения эффективности и быстродействия предложенного метода. Например, планируется в

большей степени учитывать информацию о качестве прочитанных нуклеотидов, предоставляемую секвенаторами. Кроме того, рассматривается возможность учета взаимосвязи k -меров в чтениях.

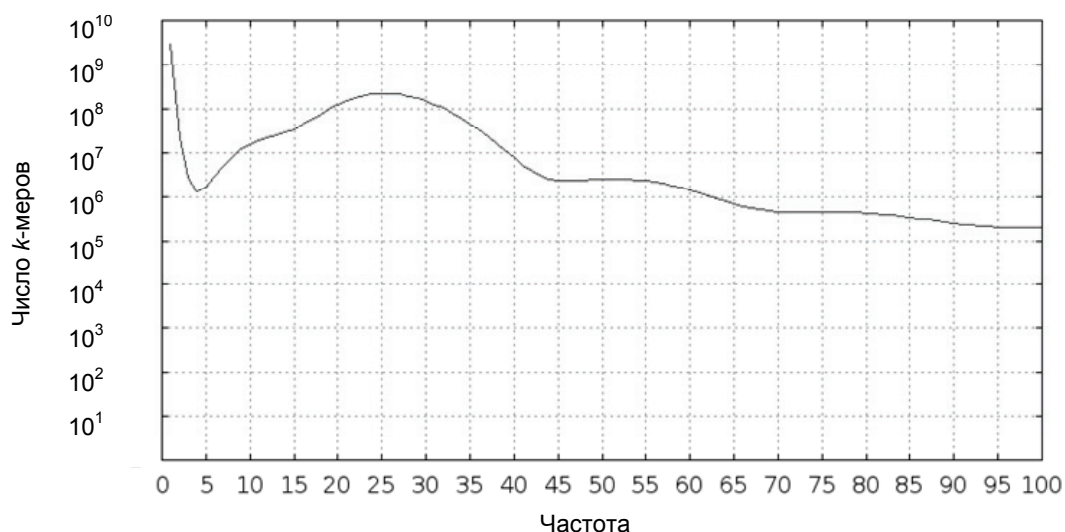


Рисунок. Зависимость числа k -меров от того, сколько раз они встречаются в чтениях

Литература

1. Illumina, Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.illumina.com/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 28.05.2011).
2. Pevzner P. A 1-Tuple DNA sequencing: computer analysis // J. Biomol. Struct. Dyn. – 1989. – V. 7. – P. 63–73.
3. Simpson J.T., Wong K., Jackman S.D., Schein J.E., Jones S.J., Birol I. ABySS: A parallel assembler for short read sequence data // Genome Res. – 2009. – V. 19 – P. 1117–1123.
4. Zerbino D.R., Birney E. Velvet: Algorithms for de novo short read assembly using de Bruijn graphs // Genome Res. – 2008. – V. 18 – P. 821–829.
5. Li R., Zhu H., Ruan J., Qian W., Fang X., Shi Z., Li Y., Li S., Shan G., Kristiansen K. et al. De novo assembly of human genomes with massively parallel short read sequencing // Genome Res. – 2010. – V. 20. – P. 265–272.
6. Butler J., MacCallum I., Kleber M., Shlyakhter I.A., Belmonte M.K., Lander E.S., Nusbaum C., Jaffe D.B. AllPaths: De novo assembly of wholegenome shotgun microreads // Genome Res. – 2008. – V. 18. – P. 810–820.
7. Pevzner P.A., Tang H., Waterman M.S. EULER: An Eulerian path approach to DNA fragment assembly // Proc. Natl. Acad. Sci. – 2001. – V. 98. – P. 9748–9753.
8. de novo Genome Assembly Project (dnGASP) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cnag.bsc.es/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 28.05.2011).
9. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ: Пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2007. – 1296 с.

Александров Антон Вячеславович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alexandrov@rain.ifmo.ru
Казаков Сергей Владимирович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, svkazakov@rain.ifmo.ru
Мельников Сергей Вячеславович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, melnikov@rain.ifmo.ru
Сергушичев Алексей Александрович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alserg@rain.ifmo.ru
Царев Федор Николаевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, fedor.tsarev@gmail.com
Шалыто Анатолий Абрамович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, shalyto@mail.ifmo.ru

УДК 616.12; 681.3:61

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ОПОРНЫХ ТОЧЕК QRS-КОМПЛЕКСОВ В ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЕ

О.О. Жаринов, И.О. Жаринов

Рассматривается применение корреляционно-экстремального метода для решения задач обнаружения и оценивания опорных точек QRS-комплексов в электрокардиограмме (ЭКГ). Получены рабочие характеристики обнаружения и точностные характеристики оценивания местоположений максимумов R-зубцов на ЭКГ.

Ключевые слова: электрокардиография, обнаружение и оценивание, QRS-комплекс.

Введение

При создании комплексов автоматизированной обработки электрокардиограмм (ЭКГ) одной из основных является проблема выделения желудочковых комплексов из регистрируемого процесса, объединяющая задачу обнаружения QRS-комплекса, т.е. установление факта его наличия на некотором участке сигнала, и задачу оценивания положений его опорных точек на оси времени, в первую очередь, точки максимума R-зубца k_R , используемой для измерения RR-интервалов, по которым оценивается ритм сердца. В настоящее время существует множество методов и алгоритмов решения таких задач [1–5], однако при их описании авторы, как правило, не приводят научного обоснования особенностей их практической реализации. В первую очередь это относится к обоснованию объемов анализируемых обучающих и контрольных выборок ЭКГ, уровня достоверности распознавания, точностных оценок.

Для решения задач обнаружения и оценивания положений QRS-комплексов в кардиограмме предлагается использовать корреляционный метод, основанный на расчете значений коэффициентов корреляции $r[k]$ между значениями массива $x_i[n]$, содержащего N дискретных отсчетов «эталонного» QRS-комплекса, задаваемого для каждого конкретного индивидуума из реализации его ЭКГ, и отсчетами обрабатываемого массива ЭКГ $x_j[n]$, содержащего $N_{ЭКГ}$ отсчетов ($N_{ЭКГ} \gg N$), в котором необходимо определить местоположения QRS-комплексов по формуле

$$r[k] = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} (x_i[n] - m_i)(x_j[n+k] - m_j[k])}{\sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} (x_i[n] - m_i)^2 \right] \left[\sum_{n=0}^{N-1} (x_j[n+k] - m_j[k])^2 \right]}}, \quad k=0, 1, \dots, N_{ЭКГ}-N-1,$$

где

$$m_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_i[n], \quad m_j[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_j[n+k]$$

на скользящем временном окне для всех отсчетов записи ЭКГ.

Принятие решения об обнаружении QRS-комплекса на анализируемом интервале ЭКГ производится в соответствии с правилами, принятыми в теории обнаружения, $r[k] > C$, и теории оценивания параметров, $k_R = \arg \max_k \{ \forall k : r[k] > C \} + N/2$. Характеристики метода существенно зависят от деталей

его практической реализации – выбора значения N и порогового уровня C , значения частоты дискретизации f_d , свойств сигнала и помех и отношения сигнал/шум q в обрабатываемом процессе.

Основной задачей исследования корреляционно-экстремального метода является обоснование минимально-достаточного количества отсчетов длины эталона N , при котором характеристики обнаружения и оценивания опорных точек QRS-комплекса будут не хуже заданных. Другой важной задачей является обоснование необходимого значения порогового уровня принятия решения C .

Метод исследования

Решающее правило обнаружения строится на основе критерия Неймана–Пирсона. Величина порогового уровня C определяется с учетом изначально заданного уровня вероятности допустимой ошибки P_F (ложного обнаружения QRS-комплекса на анализируемом интервале), характеристик распределения максимумов коэффициентов корреляции при текущем значении отношения сигнал/шум q и длины эталона N (рис. 1). При этом под P_F подразумевается интенсивность ложных срабатываний алгоритма – коли-

чество ошибочно принятых решений о наличии QRS-комплекса на участке реализации ЭКГ, где он объективно отсутствует, в единицу времени.

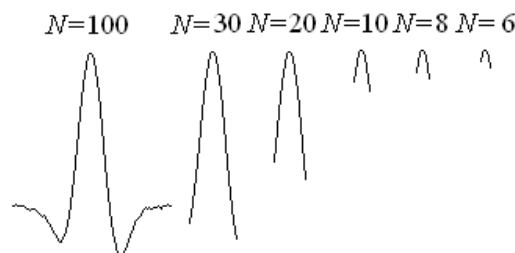


Рис. 1. Примеры реализаций эталонного QRS-комплекса ЭКГ (для стандартного значения частоты дискретизации ЭКГ $f_d = 1/\Delta t_d = 1000$ Гц, где Δt_d – интервал дискретизации) с различным числом отсчетов N

Экспериментальные исследования корреляционно-экстремального метода обнаружения и оценивания опорных точек положения QRS-комплексов проводились [6] на модельных реализациях ЭКГ для разных сочетаний $P_F = \langle 0,05; 0,01; 0,005; 0,001 \rangle$, $N = \langle 6; 8; 10; 20; 30; 100 \rangle$ и $q = \langle 1, 2, \dots, 15 \rangle$ при заданном значении частоты дискретизации $f_d = 1000$ Гц методом математического моделирования. Модель ЭКГ задавалась в виде аддитивной смеси детерминированного полезного сигнала QRS-комплекса с параметрами физиологической нормы и широкополосного гауссовского шума. Гипотеза о нормальности распределения шума имеет многочисленные экспериментальные подтверждения. Отношение сигнал/шум определено как отношение среднеквадратического значения сигнала полного QRS-комплекса длиной 100 отсчетов к среднеквадратическому значению шума (рис. 2).

Характеристики обнаружения и точности оценивания положения максимумов R-зубца на временной оси определялись по реализациям ЭКГ, содержащим 2000 QRS-комплексов.

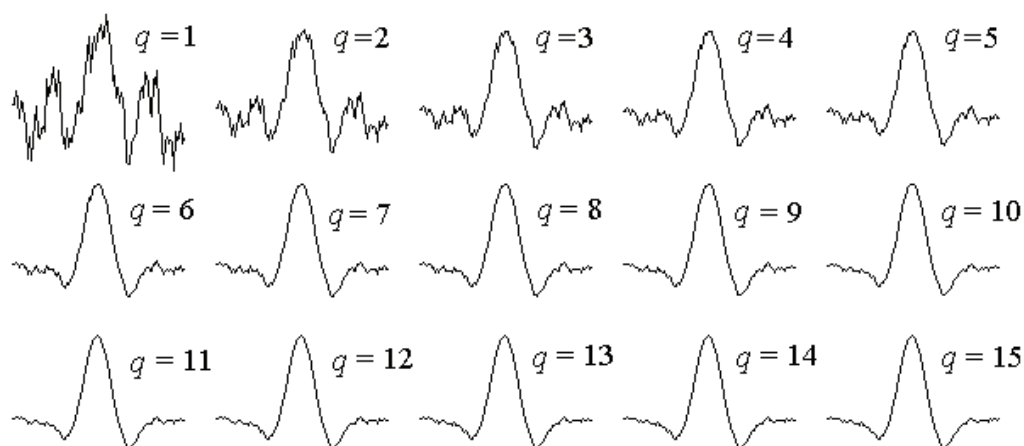


Рис. 2. Примеры реализаций ЭКГ человека на интервале наличия QRS-комплекса при различных отношениях сигнал/шум $q = \langle 1, 2, \dots, 15 \rangle$

Полученные результаты

Для выбора порогового уровня принятия решения C производилось исследование распределения максимумов коэффициентов корреляции при различных отношениях сигнал/шум q и длины временного окна N . Пример одного из практически важных результатов приведен на рис. 3. Для решения задачи выбора необходимого значения порогового уровня C и синтеза обнаружителя по критерию Неймана-Пирсона построено семейство зависимостей, представленных на рис. 4.

Семейство характеристик обнаружения $P_D(q)$ для корреляционно-экстремального метода обнаружения QRS-комплексов ЭКГ при различных значениях N и P_F приведено на рис. 5. Анализ представленных на рис. 5, а, и рис. 5, б, зависимостей показывает, что при $N > 30$ вероятность правильного обнаружения QRS-комплекса превышает 0,95 даже при весьма низком отношении сигнал/шум $q = 2$ – значении, характерном для записей нагрузочных ЭКГ и холтеровского мониторинга. Для ЭКГ покоя, при практически гарантированном $q > 10$ для достижения $P_D > 0,95$ возможно уменьшение длины эталона вдвое, что позволит сократить объем требуемых вычислений $r[k]$ в четыре раза, а при $N > 30$ обнаружение будет практически достоверным, с $P_D > 0,999$ при $P_F < 0,001$ (рис. 5, в).

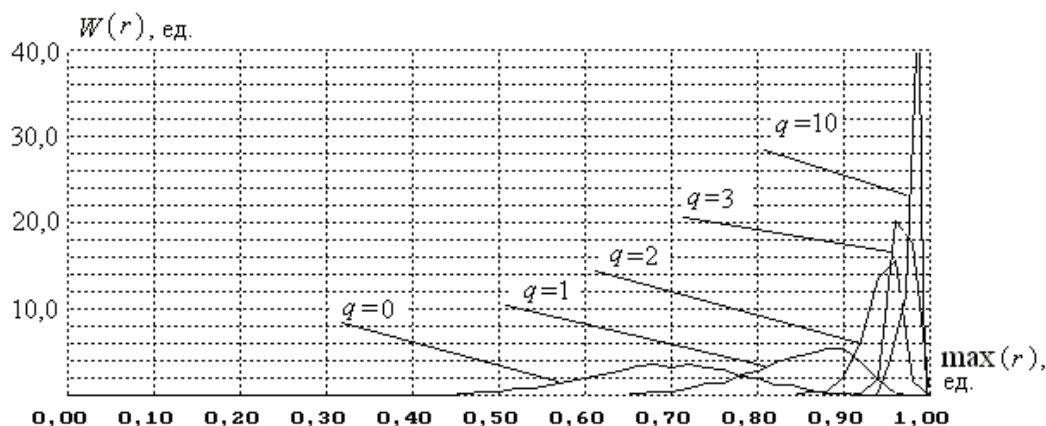


Рис. 3. Результат экспериментальной оценки распределения максимумов коэффициентов корреляции при различных отношениях сигнал/шум q для случая $N=30$

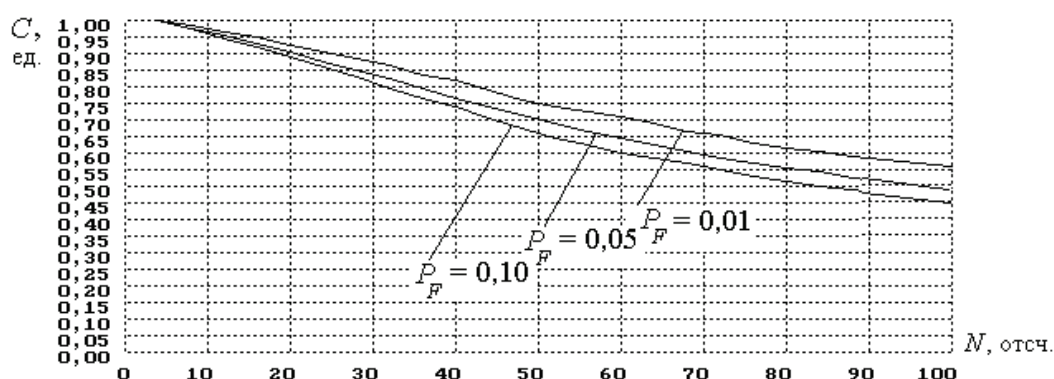


Рис. 4. Семейство зависимостей требуемого порогового уровня C для решающего правила алгоритма обнаружения ($r[k] > C$) от числа отсчетов N и вероятности P_F

Количественные характеристики точности оценивания на временной оси опорных точек обнаруженных QRS-комплексов определялись по следующим формулам:

– смещение

$$m = \frac{1}{N_{об}} \sum_{k=1}^{N_{об}} \Delta t[k],$$

– дисперсия

$$D = \frac{1}{N_{об} - 1} \sum_{k=1}^{N_{об}} (\Delta t[k] - m)^2.$$

Здесь $N_{об}$ – количество правильно обнаруженных QRS-комплексов; $\Delta t[k]$ – значение ошибки оценивания местоположения k -го обнаруженного QRS-комплекса на оси времени.

Гистограммы $W(\Delta t)$ значений ошибки оценивания положения максимума R-зубца QRS-комплекса электрокардиограммы корреляционно-экстремальным методом приведены на рис. 6. Анализ рис. 6, а–г, показывает, что при малых отношениях сигнал/шум и $N \leq 10$ закон распределения ошибок является полимодальным, но в случае $q \geq 3$ становится унимодальным, отражая тенденцию группирования оценок возле истинного значения оцениваемого параметра. При $N=30$ (рис. 6, д, е) распределение является унимодальным даже при малых отношениях сигнал/шум, что упрощает анализ погрешностей методов обработки ЭКГ в реальном времени, использующих, например, технологию усреднения QRS-комплексов [7].

Количественные характеристики полученных оценок приведены в таблице, из которой следует, что точностные характеристики корреляционно-экстремального метода оценивания положений R-зубцов на оси времени улучшаются при увеличении длины эталона N и отношения сигнал/шум q . Важно отметить, что смещение оценок не имеет принципиального значения, тогда как их дисперсия определяет степень искажения формы сигнал-усредненной ЭКГ. С этой точки зрения необходимо стремиться к получению ее минимально возможного значения, что достигается использованием больших значений N , однако величина дисперсии оценки положения опорной точки максимума R-зубца имеет нижний ненулевой предел вследствие погрешностей квантования аналогового сигнала по времени.

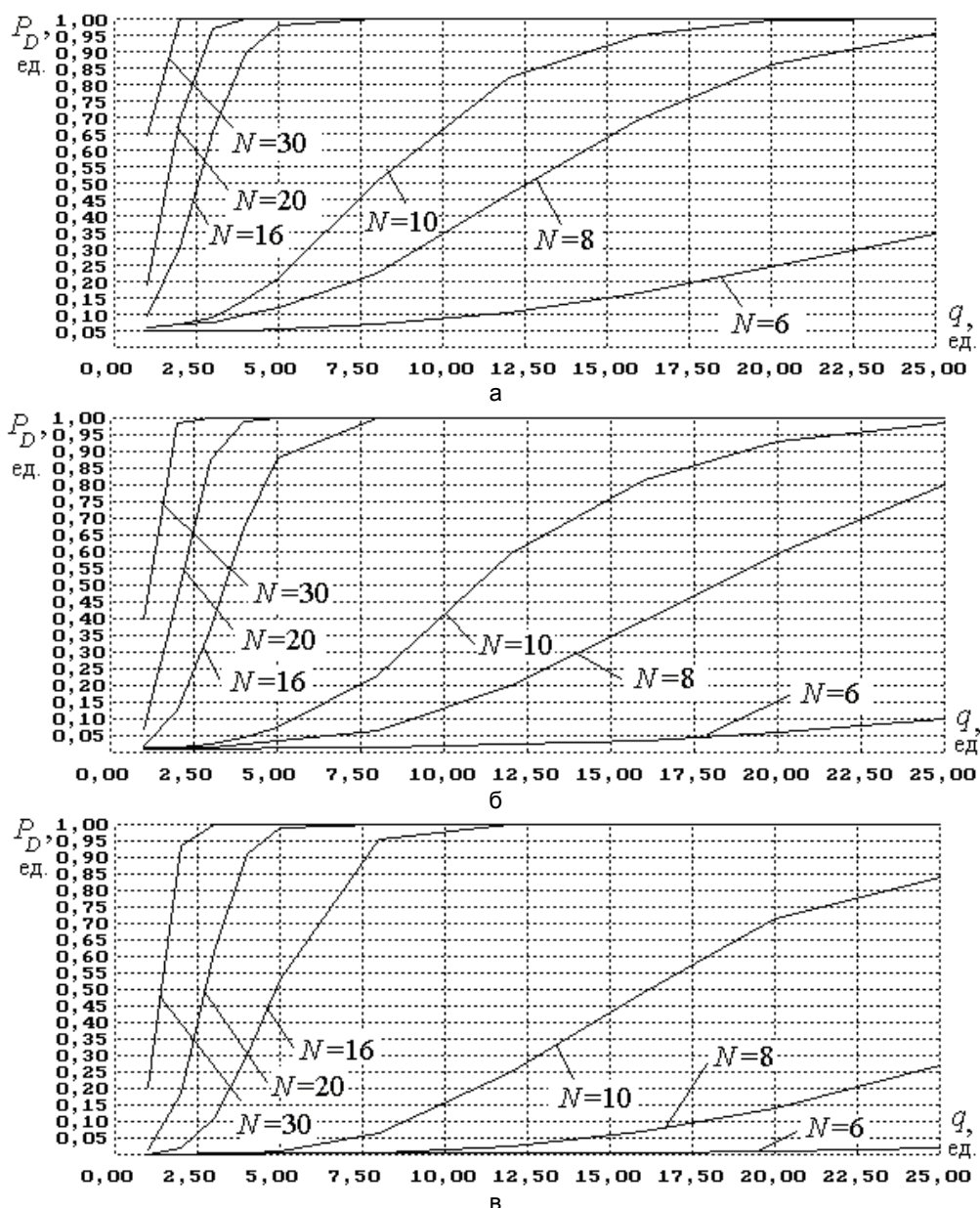


Рис. 5. Семейство характеристик обнаружения $P_D(q)$ для корреляционно-экстремального метода обнаружения QRS-комплексов ЭКГ при различных значениях N и фиксированном значении P_F : для $P_F=0,05$ (а); $P_F=0,01$ (б); $P_F=0,001$ (в)

$P_F=0,05$												
	m , отсч.						D , отсч ²					
	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$
$q=1$	3,56	2,76	2,18	0,77	0,44	0,04	4,27	3,98	3,17	1,81	1,61	1,43
$q=2$	3,32	1,67	0,96	0,26	0,07	0,04	2,68	1,98	1,64	0,97	0,89	0,73
$q=3$	2,06	0,96	0,40	0,07	0,03	0,03	1,86	1,27	1,07	0,73	0,61	0,50
$q=4$	1,31	0,58	0,28	0,02	0,02	0,02	1,34	1,03	0,77	0,56	0,46	0,35
$P_F=0,01$												
	m , отсч.						D , отсч ²					
	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$	$N=6$	$N=8$	$N=10$	$N=16$	$N=20$	$N=30$
$q=1$	3,94	3,00	2,19	0,74	0,51	0,04	4,32	3,70	3,33	1,89	1,57	1,40
$q=2$	3,15	1,76	0,94	0,26	0,07	0,03	2,62	2,25	1,62	0,97	0,87	0,74
$q=3$	2,13	0,90	0,43	0,09	0,03	0,02	1,99	1,19	1,08	0,72	0,61	0,50
$q=4$	1,12	0,55	0,28	0,02	0,02	0,01	1,36	1,07	0,77	0,56	0,46	0,36

Таблица. Оценки точностных характеристик определения положений максимумов R-зубцов на ЭКГ

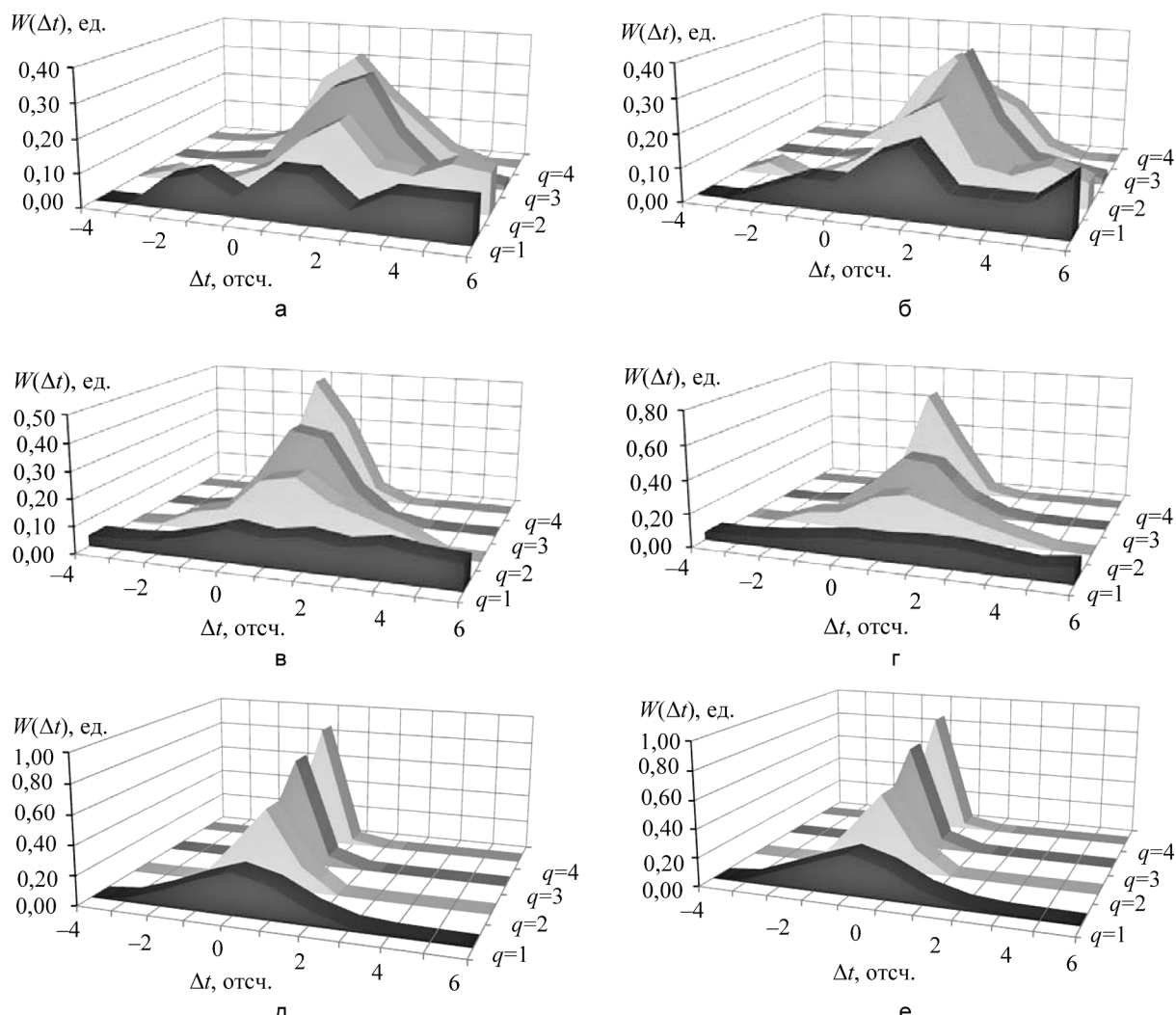


Рис. 6. Гистограммы $W(\Delta t)$ значений ошибки оценивания положения максимума R-зубца QRS-комплекса электрокардиограммы корреляционно-экстремальным методом для: $N=6, P_F=0,05$ (а); $N=6, P_F=0,01$ (б); $N=10, P_F=0,05$ (в); $N=10, P_F=0,01$ (г); $N=30, P_F=0,05$ (д); $N=30, P_F=0,01$ (е) при частоте дискретизации 1000 Гц

Заключение

Методы вторичной обработки реализаций ЭКГ-сигнала, к которым относится рассмотренный корреляционно-экстремальный метод обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы, предполагают использование в качестве исходных данных дискретных реализаций ЭКГ, прошедших процедуру первичной обработки как на аппаратном, так и на программном уровне (цифровая фильтрация в области верхних и нижних частот, аппроксимация дрейфа нулевой линии, режекторная фильтрация и т.д.). В итоге на практике для вторичной обработки предъявляется реализация ЭКГ при отношении сигнал/шум, превышающем 10–15 раз.

Анализ представленных на рис. 5, а–в, характеристик позволяет утверждать, что достоверное обнаружение QRS-комплексов в зашумленной ЭКГ корреляционно-экстремальным методом достигается при отношении сигнал/шум $q > 7$ по критерию Неймана–Пирсона на уровне вероятности ложной тревоги в диапазоне $P_F \in [0,05; 0,001]$ при задании формы эталонного QRS-комплекса 20-ю дискретными отсчетами. Как следует из рис. 1, последовательность из 20-ти отсчетов ЭКГ аппроксимирует участок зубца R не в полной мере, однако оказывается достаточной для гарантированного установления факта наличия QRS-комплекса на анализируемом участке реализации. Из рис. 6, а–е, и данных таблицы также можно сделать вывод, что точность оценивания максимума R-зубца на оси времени зависит от N , q , P_F и становится приемлемой для практики уже при $N > 10$ для $q > 4$.

Таким образом, при задании формы эталонного QRS-комплекса ЭКГ набором из 20-ти дискретных отсчетов (при $f_d=1000$ Гц), отношении сигнал/шум $q > 7$ и вероятности ложной тревоги на уров-

не $P_f \in [0,05; 0,001]$ возможно достоверное обнаружение на ЭКГ QRS-комплексов с характеристиками точности оценивания временного положения, близкими к потенциально достижимым при $f_d=1000$ Гц.

Представляется очевидным, что показатели качества корреляционно-экстремального метода обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы можно существенно улучшить при использовании одновременной регистрации нескольких отведений ЭКГ, их обработки и агрегировании решений, принятых в каждом отведении ЭКГ, в единое решающее правило, по аналогии с применяемыми в клинической медицинской практике методиками расшифровки ЭКГ.

Литература

1. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ / Под ред. А.Л. Барановского, А.П. Немирко. – М.: Радио и связь, 1993. – 248 с.
2. Микрокомпьютерные медицинские системы. Проектирование и применения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 544 с.
3. Выделение QRS-комплексов в компьютерных ЭКГ-системах / В.А. Нагин, И.В. Потапов, С.В. Селищев // Труды международной конференции по биомедицинскому приборостроению «Био-медприбор-2000». – М., 2000. – Ч. 1. – С. 120–121.
4. Friesen G.M. et al. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1990. – V. 37. – № 1. – P. 85–98.
5. Dotsinsky I.A., Stoyanov T.V. Ventricular beat detection in single channel electrocardiograms / BioMedical Engineering OnLine 2004. – V. 3. – № 3. – 9 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/3>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 10.01.2010.)
6. Жаринов О.О., Жаринов И.О. Программа исследования на ЭВМ корреляционно-экстремального алгоритма обнаружения QRS-комплексов электрокардиограммы. – М.: ВНТИЦ, № 50200300257. – 2003. – Авт. свид. ОФАП № 2466 от 17.06.2003.
7. Жаринов О.О., Жаринов И.О. Электрокардиография высокого разрешения: новый подход к обработке сигнала // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2006. – № 33. – С. 106–120.

Жаринов Олег Олегович – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кандидат технических наук, доцент, zharinov73@hotmail.ru
Жаринов Игорь Олегович – СПб ОКБ “Электроавтоматика” имени П.А. Ефимова, кандидат технических наук, доцент, igor_rabota@pisem.net

УДК 681.2-2

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ МАРКИРОВАНИИ РАСТРОВОГО РИСУНКА НА УЗЛАХ ГИРОПРИБОРОВ

О.С. Юльметова, А.Г. Щербак, Р.Ф. Юльметова

Приводятся результаты исследований химических взаимодействий при формировании рисунка методом лазерного маркирования на поверхности бериллиевых узлов giroприборов с применением в качестве инструментария исследований термодинамического анализа. Выявлена принципиальная возможность управления электропроводностью контрастного рисунка, полученного методом лазерного маркирования, путем варьирования состава и парциальных давлений компонентов газовой среды. Приведены результаты рентгеноэлектронного анализа, подтверждающие данные аналитических расчетов.

Ключевые слова: лазерное маркирование, термодинамический анализ, изобарно-изотермический потенциал, электропроводность, парциальные давления компонентов газовой среды.

Введение

Создание технологии прецизионного формирования функциональных элементов на узлах giroприборов определяется выявлением оптимальных параметров процесса в системе инструмент–изделие. Как правило, это связано с варьированием параметров инструмента, т.е. средств воздействия на обрабатываемое изделие. Примером может служить выполнение растрового рисунка на сферической поверхности сплошного бериллиевых ротора бескарданного варианта электростатического гироскопа [1], где использована находящая все более широкое применение технология лазерного маркирования, в которой регулируемые параметрами являются мощность, частота и длительность импульса, скорость сканирования и плотность линий.

Очевидно, что точность и диапазоны варьирования параметрами во многом определяют обеспечение жестких технических требований, предъявляемых к растру, таких как контрастность, уровень шероховатости и электропроводность раstra, фактически представляющего собой нанопокрyтие на базовой поверхности ротора. Однако управление параметрами оборудования, в данном случае режимами лазерной обработки, не всегда достаточно для выполнения специфичных требований к растровому рисунку, в частности, электропроводности. Эта характеристика во многом определяется фазовым составом нанопокрyтия, образующегося в результате воздействия на бериллиевую поверхность лазерных импульсов.

Требование к соизмеримой электропроводности базовой поверхности ротора и нанесенного рисунка обусловлено тем, что любая неоднородность негативно сказывается на динамике ротора при его вращении в электростатическом подвесе, вызывая появление тормозящих моментов. В связи с этим целью работы является разработка и исследование методов регулирования фазового состава и свойств растрового рисунка, формируемого на поверхности бериллиевых узлов методом лазерного маркирования.

Исследование химических взаимодействий при лазерном маркировании

Регулирование фазового состава, определяющего уровень проводимости рисунка, предложено осуществлять путем варьирования основных характеристик газовой среды при лазерном маркировании, которыми являются ее состав и парциальные давления компонентов. Очевидно, что процессы, протекающие на обрабатываемой поверхности при нагреве, что имеет место при лазерном маркировании, связаны с гетерофазными химическими взаимодействиями. Наиболее объективными для анализа и оценки указанных процессов являются такие методы и подходы, которые основаны на единых принципах и критериях, в частности, на энергетических характеристиках [2], что связано:

- с термодинамическим анализом, определяющим принципиальную разрешенность конкретного взаимодействия;
- с кинетической оценкой, использующей известные уравнения Аррениуса, которые описывают практически каждый из протекающих в данном случае термически активируемых процессов.

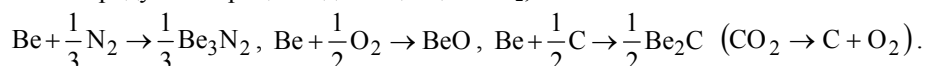
Наиболее объективным методом оценки вероятности протекания какого-либо химического взаимодействия является определение изобарно-изотермического потенциала данной реакции. Расчет изобарно-изотермического потенциала ΔZ_T^0 реакции как разности суммы ΔZ_T^0 продуктов и суммы ΔZ_T^0 исходных компонентов, можно производить по выражению

$$\Delta Z_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T C_p dt - T \cdot \int_{298}^T 1/T \Delta C_p dt,$$

где ΔH_T^0 – тепловой эффект процесса (изменение энтальпии); ΔS_T^0 – изменение энтропии системы; C_p – теплоемкость; T – температура. Или, допуская изменение теплоемкости от температуры равным нулю, $\Delta C_p = 0$, расчет изобарно-изотермического потенциала можно осуществлять по формуле [2, 3]

$$\Delta Z_T^0 = \Delta H_{298}^0 - T \cdot \Delta S_{298}^0. \quad (1)$$

Если лазерная обработка осуществляется на воздухе, то в процессе формирования растрового рисунка на доведенной поверхности бериллия наиболее вероятно протекание реакций взаимодействия металла с кислородом, азотом, а также с углеродом, который в реальных условиях лазерной обработки может являться продуктом процесса диссоциации CO_2 , т.е.



Определим разрешенность этих реакций путем расчета изобарно-изотермического потенциала ΔZ_T^0 реакции как разности суммы продуктов ΔZ_T^0 и суммы ΔZ_T^0 исходных компонентов по выражению (1). Исходные данные для расчета приведены в табл. 1 [4].

Вещество и состояние	ΔH_{298}^0 , кДж/моль	ΔS_{298}^0 , Дж/(моль · К)
Be (кристалл)	0	9,50
N_2 (газ)	0	191,5
Be_3N_2 (кристалл)	-587,9	34,3
O_2 (газ)	0	205,04
BeO (кристалл)	-609,2	13,77
Be_2C (кристалл)	-99,7	16,8
C (газ)	715,1	157,99

Таблица 1. Стандартные энтальпии ΔH_{298}^0 и энтропии ΔS_{298}^0 веществ при 298 К

На рис. 1 приведены кривые зависимости изобарно-изотермического потенциала от температуры, полученные на базе уравнения (1) и данных табл. 1. Для каждой реакции образования (оксида, нитрида и карбида бериллия) расчет изобарно-изотермического потенциала осуществлялся в четырех точках: 298 К, 500 К, 1000 К и 2000 К.

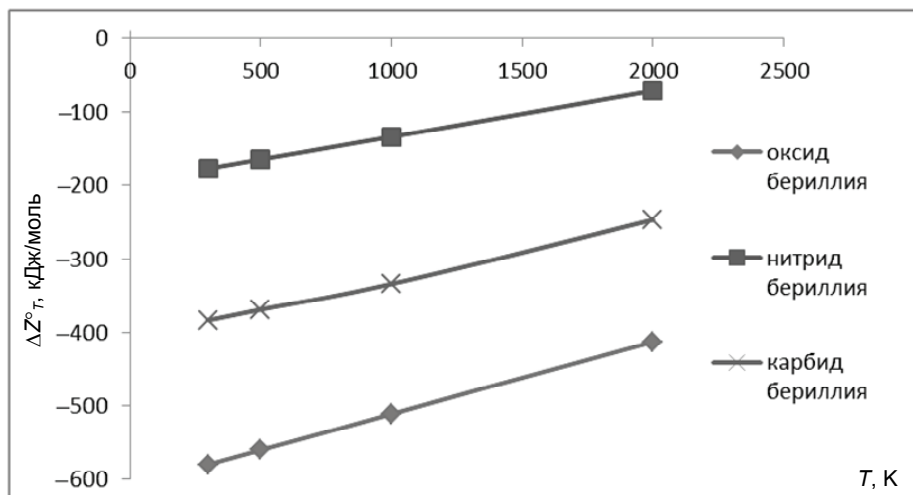


Рис. 1. Температурная зависимость изобарно-изотермического потенциала реакций образования Be_3N_2 , Be_2C и BeO на воздухе

Отрицательный знак изобарно-изотермического потенциала свидетельствует о разрешенности всех трех реакций в пределах температурного диапазона 300–2000 К, причем величина изобарно-изотермического потенциала реакции бериллия с кислородом во всем диапазоне значительно меньше, чем с азотом или углеродом, следовательно, образование оксида бериллия более вероятно. Следует отметить, что диссоциация углекислого газа термодинамически разрешена при температурах, превышающих температуру в зоне лазерного маркирования, и, как следствие, образование карбида бериллия маловероятно. Температура в зоне обработки, необходимая для термодинамических расчетов, определялась по формуле

$$T_{\text{Be}} = \frac{2 \cdot q_0 \cdot (1 - R) \cdot \sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_{\text{H}},$$

где a – температуропроводность бериллия, равная $5,56 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; k – теплопроводность бериллия, $184 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; R – коэффициент отражения доведенной бериллиевой поверхности, $0,4$; q_0 – плотность мощности, $10^9 \text{ Вт}/\text{м}^2$; τ – время воздействия, $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; T_{H} – начальная температура, 300 К [5].

Таким образом, растры, полученные при лазерной обработке на воздухе, вероятнее всего, представляют собой оксид бериллия, хотя возможно образование и нитрида бериллия, т.е. двухфазного состава растра, где присутствуют и Be_3N_2 и BeO .

Представляет интерес оценка величины и знака изобарно-изотермического потенциала для реакций взаимодействия бериллия с кислородом, углеродом и азотом в среде азота. При этом расчет изобарно-изотермического потенциала осуществляется с учетом парциальных давлений компонентов газовой среды обработки (кислорода, азота и углекислого газа) по формуле

$$(\Delta Z_T^0)_0 = \Delta Z_{298}^0 + RT \ln P_g^{-k}, \quad (2)$$

где k – стехиометрический коэффициент; ΔZ_T^0 – изобарно-изотермический потенциал при нормальном давлении ($10,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$); R – универсальная газовая постоянная, равная $8,3 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$.

На рис. 2 представлены результаты расчетов изобарно-изотермических потенциалов реакций образования Be_3N_2 , Be_2C и BeO в среде азота 99,99%. Все три реакции образования карбида, нитрида и оксида бериллия имеют отрицательный изобарно-изотермический потенциал в диапазоне температур 300 – 2000 К , что свидетельствует о разрешенности протекания реакций.

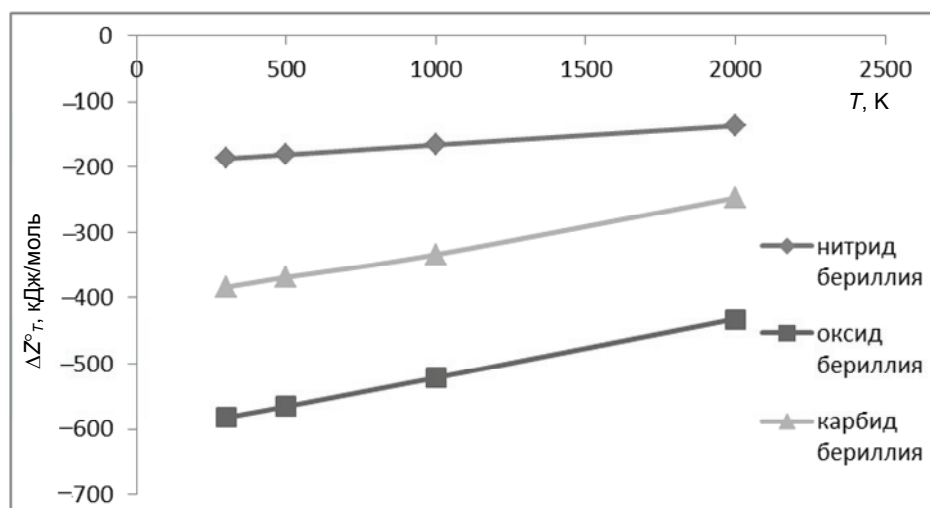


Рис. 2. Температурная зависимость изобарно-изотермического потенциала реакций образования Be_3N_2 , Be_2C и BeO в среде воздуха и азота 99,99%

Из рис. 2 видно, что наименьшее значение изобарно-изотермического потенциала имеет реакция образования оксида. Однако, наряду с оценкой разрешенности протекания реакции, важна кинетическая оценка скорости ее протекания.

Как отмечалось ранее, кинетическую оценку принято осуществлять на основе уравнения Аррениуса

$$K_T = A \cdot \exp(-E / (R \cdot T)),$$

где K_T – константа скорости реакции при данной температуре T ; A – коэффициент уравнения Аррениуса; E – энергия активации.

Постоянные уравнения Аррениуса (A и E) имеют большое значение: их сопоставление позволяет сравнивать кинетическую активность различных химических процессов – при равных условиях реакция, которой соответствуют меньшее значение E и большее значение коэффициента A , протекает быстрее, и наоборот [6]. В табл. 2 представлены значения постоянных в уравнениях Аррениуса, рассчитанные для реакций образования оксида, нитрида и карбида бериллия в среде воздуха и среде азота. Подробная методика определения постоянных A и E приведена в [6, С. 163–164]. Необходимые для расчетов графические зависимости скорости реакций от температуры получены на основе справочных данных, представленных в [7, С. 170; 8, С. 30–43]. Из таблицы видно, что на воздухе наименьшим значением энергии активации E и наибольшей постоянной скорости A обладает реакция образования нитрида бериллия, затем карбида и оксида.

Реакция образования	Энергия активации E , кДж/моль		Постоянная скорости A , $\text{г}^2/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	
	Воздух	Азот	Воздух	Азот
BeO	587	590	10^{-5}	10^{-6}
Be ₃ N ₂	192	187	10^{-3}	10^{-2}
Be ₂ C	403	402	$10^{-4,5}$	$10^{-4,5}$

Таблица 2. Расчетные значения постоянных уравнения Аррениуса для реакций образования оксида, нитрида и карбида бериллия в среде воздуха и азота

В среде азота значения энергий активации для всех реакций изменяются незначительно по сравнению со значениями, полученными для воздушной среды, а постоянная скорости в среде азота для реакции образования нитрида возрастает на порядок, в то время как для кислорода значение постоянной скорости уменьшается также на порядок. Это свидетельствует о том, что в среде азота скорость протекания реакции образования нитрида преобладает при разрешенности протекания всех трех реакций.

Таким образом, в соответствии с проведенным термодинамическим анализом и кинетической оценкой, в среде азота наиболее вероятно получение нитрида бериллия. В то же время на воздухе возможно получение двухфазного состава раstra, нанесенного лазерным маркированием.

Фазовый состав раstra во многом определяет электрофизические свойства полученной структуры. В качестве примера в табл. 3 приведены справочные данные об удельных сопротивлениях бериллия и его соединений [7].

Бериллий и его соединения	Удельное сопротивление ρ , мОм·м
Be	0,066
Be ₂ C	0,010 при 20°C – 0,00063 при 30°C
BeO	10^{13} при 25°C
Be ₃ N ₂	$2 \cdot 10^6$ при 25°C

Таблица 3. Удельные сопротивления бериллия и его соединений

Из табл. 3 видно, что для трех рассматриваемых соединений бериллия наименьшим сопротивлением обладает карбид бериллия, затем нитрид бериллия и оксид.

Допущение о том, что в тонких слоях тенденция изменения проводимости сохранится, подтверждается исследованиями локальных электрических свойств поверхности на сканирующем зондовом микроскопе NANOEDUCATOR. На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики и кривые дифференциальной проводимости раstra, формирование которого осуществлялось на воздухе (1) и в среде азота (2), а также базовой поверхности доведенного бериллиевого образца (3). Из рис. 3 видно, что проводимость раstra, полученного в среде азота (кривая 2 на рис. 3, б) выше проводимости раstra, формирование которого осуществлялось в воздушной среде (кривая 1 на рис. 3, б).

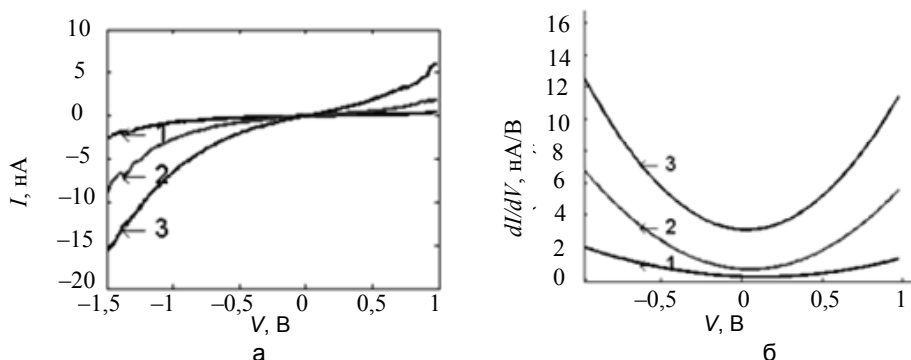


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики (а) и кривые дифференциальной проводимости (б) поверхности рисунка, формирование которого осуществлялось методом лазерного маркирования на воздухе (1) и в среде азота (2), а также базовой поверхности доведенного бериллиевого образца (3)

Данный пример показывает возможность управления электрофизическими свойствами наносимого раstra путем изменения его фазового состава. Расчетно-аналитическим методом определения фазового состава может служить термодинамический анализ и кинетическая оценка реакций, протекающих в газовой среде, где происходит формирование рисунка. В предельном случае термодинамический анализ позволяет рассчитать условия, при которых не будут идти реакции, описывающие появление цветовой пленки, т.е. знак изобарно-изотермического потенциала реакций взаимодействия будет больше нуля. При этом контрастность раstra можно получить за счет локального изменения шероховатости, а электрофизические свойства раstra в данном случае будут идентичны свойствам базовой поверхности ротора.

Результаты рентгеноэлектронного анализа

Для оценки достоверности результатов термодинамического анализа химических взаимодействий при формировании рисунка методом лазерного маркирования бериллиевых поверхностей, был проведен рентгеноэлектронный анализ. Результаты анализа, подтверждающие основные положения, сделанные на базе расчета изобарно-изотермического потенциала и кинетической оценки химических взаимодействий, представлены в табл. 4.

Элемент	Химический состав выявленных элементов в процентном соотношении		
	бериллиевый образец до обработки	образец после нанесения рисунка на воздухе	образец после нанесения рисунка в среде азота
O	62,98	91,23	60,94
N	4,17	5,89	35,75

Таблица 4. Данные рентгеноэлектронного анализа рисунка, полученного методом лазерного маркирования в среде воздуха и азота

В табл. 4 приведены данные рентгеноэлектронного анализа поверхности бериллиевого образца, а также растрового рисунка, полученного методом лазерного маркирования в среде воздуха и среде азота. Из табл. 4 видно, что на воздухе металлический образец имеет естественную окисную пленку, таким образом, фоновое содержание кислорода составляет около 62,98%, азота – около 4,17%.

После маркирования на воздухе содержание кислорода в образце значительно увеличивается. Содержание азота относительно фонового изменяется лишь на 1,72%. Таким образом, на воздухе рисунок, полученный методом лазерного маркирования, имеет двухфазный состав с преобладанием оксида бериллия. После маркирования бериллиевого образца в среде азота содержание азота увеличивается почти в 9 раз, в то время как содержание кислорода относительно фонового состава почти не изменяется.

Эти данные в целом согласуются с представленными ранее расчетными графическими зависимостями, полученными на базе термодинамического анализа и кинетической оценки химических реакций.

Заключение

Выявлена принципиальная возможность управления электропроводностью растрового рисунка, полученного методом лазерного маркирования на поверхности бериллиевого узла, путем варьирования состава и парциальных давлений компонентов газовой среды при лазерной обработке. Предложен инструментальный метод оценки фазового состава наносимого раstra, основанный на термодинамическом расчете изобарно-изотермического потенциала и кинетической оценке комплекса химических реакций, протекающих в процессе лазерного маркирования. Перспективы дальнейших исследований связаны с применением технологии нанесения покрытия нитрида титана на поверхность бериллиевого узла до операции лазерного маркирования, формирующей функциональный рисунок, что расширит диапазон регулирования поверхностной проводимости за счет управления стехиометрией нитрида титана.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00158а.

Литература

1. Юльметова О.С., Щербак А.Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного раstra посредством лазерного маркирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 28–34.
2. Щербак А.Г., Кедров В.Г. Технология прецизионной диффузионной сварки в точном приборостроении. – СПб: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 1997. – 166 с.
3. Войтович Р.Ф. Тугоплавкие соединения. Термодинамические характеристики: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1971. – 220 с.
4. Термические константы веществ: Справочник / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Изд-во ВИНТИ АН СССР, 1965–1982. – Вып. I–X. – 635 с.
5. Вейко В.П., Шахно Е.А. Сборник задач по лазерным технологиям. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 67 с.
6. Ахметов Б.А., Новиченко Ю.П., Чапурин В.И. Физическая и коллоидная химия. – Л.: Химия, 1986. – 320 с.
7. Папилов И.И. Структура и свойства сплавов бериллия: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
8. Папилов И.И. Окисление и защита бериллия. – М.: Металлургия, 1968. – 121 с.

Юльметова Ольга Сергеевна – ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, www.ralli@rambler.ru
Щербак Александр Григорьевич – ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, a_sch@gtn.ru
Юльметова Рафия Фагимовна – Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, кандидат технических наук, преподаватель, www.ralli@rambler.ru

УДК 620.18; 669.2/.8.017

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТОК
НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СПЛАВА 40ХНЮ-ВИ****С.А. Яковлева, А.Г. Щербак**

Исследованы основные свойства дисперсионно-твердеющего сплава 40ХНЮ-ВИ, влияние режимов последовательных термических обработок на его структурно-фазовое состояние, а также на механические свойства, в том числе на характеристики размерной стабильности, которые определяют получение и сохранение высокой точности прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа. Установлены оптимальные режимы закалки сплава и выявлена корреляция условий старения и показателей размерной стабильности, таких как прецизионный предел упругости $\sigma_{0,0001}$. Определен диапазон температур старения 400–550°C, который является перспективным для получения повышенных значений прецизионного предела упругости с сохранением требуемого уровня пластичности сплава.

Ключевые слова: размерная стабильность, дисперсионно-твердеющий сплав, микроструктура, прецизионный предел упругости, закалка, старение.

Введение

В настоящее время прецизионные гироскопические приборы, такие как поплавковые гироскопы, достигли исключительно высокой точности, которую они должны обеспечивать в течение всего рабочего ресурса без какой-либо регулировки. Одним из важнейших узлов поплавкового гироскопа является гироскоп, который выполняет функцию носителя кинетического момента и представляет собой ротор, разгоняемый статором и взвешенный с помощью газодинамических обращенных подшипников. Постоянство рабочего зазора между деталями подшипника является одним из основных факторов, определяющих надежность и точностные характеристики как гироскопа, так и прибора в целом [1]. В связи с этим к прецизионным деталям газового подшипника, которые изготавливаются из дисперсионно-твердеющего сплава 40ХНЮ-ВИ, предъявляются требования по геометрической точности размеров и формы на уровне десятых долей микрометра, которая должна сохраняться в течение длительного периода эксплуатации при осевом вращении со скоростью 12000 об/мин при рабочей температуре 55°C.

На сегодняшний день высокая точность прибора и постоянство рабочих характеристик в течение периода хранения, постановки прибора в навигационную систему и эксплуатации обеспечиваются в недостаточной степени. Исследование стабильности геометрических параметров деталей подшипникового узла показало, что даже при вылеживании при комнатной температуре на части деталей происходит изменение их формы: в течение года отклонение от круглости сферической поверхности деталей меняется от 0,3 мкм до 0,8 мкм.

Основной причиной изменения геометрических параметров прецизионных деталей, изготовленных из металлических сплавов, является энергетическая метастабильность структурно-фазового состояния сплава, как термодинамической системы, связанная с наличием структурных остаточных напряжений, возникающих в результате термической, механической и других видов обработок. При переходе сплава (под действием рабочих нагрузок, вибраций, температуры) в более стабильное энергетическое состояние происходит релаксация напряжений, приводящая к деформации детали [2]. По этой причине для сохранения высоких точностей прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа в течение длительного времени необходимо повышение размерной стабильности сплава 40ХНЮ-ВИ и разработка технологии изготовления деталей, обеспечивающей уровень остаточных напряжений, не превышающих значений характеристик стабильности сплава.

Можно считать, что совершенствование режимов термической обработки позволит получить микроструктуру сплава, при которой обеспечивается требуемая стабильность размеров и достигается заданный уровень механических свойств. Выявление критериев, связывающих параметры микроструктуры с характеристиками размерной стабильности сплава, позволит выбирать более эффективные режимы термической обработки при проектировании технологического процесса изготовления прецизионных деталей.

Целью работы является исследование влияния режимов термических обработок сплава 40ХНЮ-ВИ на его структурно-фазовое состояние и показатели размерной стабильности для определения режимов, обеспечивающих повышение стабильности геометрических параметров прецизионных деталей и получение требуемых прочностных свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- выявление микроструктурных параметров и характеристик, определяющих размерную стабильность дисперсионно-твердеющего сплава;

- исследование влияния режимов термообработок, включающих закалку и старение (дисперсионное твердение), на формирование микроструктуры сплава 40ХНЮ-ВИ и на его механические характеристики, в том числе характеристики размерной стабильности.

Характеристика сплава 40ХНЮ-ВИ

Сплав 40ХНЮ-ВИ является дисперсионно-твердеющим на основе системы хром–никель, содержащий 39–40% хрома, 3,5–3,8% алюминия, остальное – никель. В сплаве возможно присутствие следующих фаз: α -Cr, γ -Ni, γ' – интерметаллид Ni_3Al [3].

По существующей технологии изготовления деталей сплав подвергается следующей термообработке: закалка (нагрев до 1150°C с выдержкой после полного прогрева 30 мин, быстрое охлаждение в воде) и старение (дисперсионное твердение) в вакууме при температуре 760°C, выдержка 5 ч.

После закалки сплав представляет собой γ -Ni твердый раствор с включениями первичной фазы α -Cr (рис. 1, а). Размер кристаллического зерна матрицы составляет 10–25 мкм. После старения сплав содержит три фазы: помимо γ -Ni и α -Cr присутствует интерметаллидная фаза γ' – Ni_3Al (рис. 1, б).

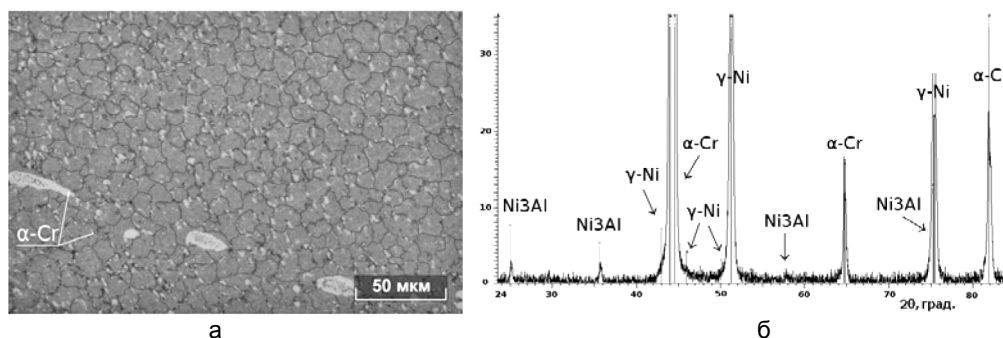


Рис. 1. Микроструктура сплава 40ХНЮ-ВИ в закаленном состоянии (а); фрагмент дифрактограммы образца после старения (б)

Как видно на рис. 1, а, частицы α -фазы сохраняются в закаленном состоянии и присутствуют в форме достаточно крупных вытянутых включений и в виде сферических выделений, расположенных как в теле, так и по границам зерен.

Факторы, определяющие размерную стабильность дисперсионно-твердеющего сплава

Этап 1 – закалка. На этапе закалки необходимо перевести различные составляющие сплава в твердый γ -раствор с тем, чтобы при последующей операции старения произошло выделение интерметаллидной фазы при пониженных температурах в высокодисперсном состоянии. Сохранение в закаленном состоянии включений фазы α -Cr значительно влияет на последующие процессы распада матрицы и равномерность выделения интерметаллидных частиц и соответственно на изотропность материала и его свойства, в том числе на сопротивление микропластическим деформациям, которое является характеристикой размерной стабильности сплава и, как следствие, изготавливаемых прецизионных деталей.

Для улучшения показателей стабильности дисперсионно-твердеющего сплава необходимо обеспечение следующих условий:

- получение однофазного твердого раствора (исключение фазы α -Cr);
- сохранение размера зерна.

В то же время на основании анализа изотермических разрезов тройной системы Al-Cr-Ni при разных температурах [4] можно сделать вывод, что при достижении системой фазового равновесия температура закалки сплава 1150° достаточна для растворения α -фазы и перехода системы в однофазную область.

Этап 2 – старение. Показатели сопротивления микропластическим деформациям сплава во многом характеризуют стабильность его размеров. Чем больше напряжение, при котором начинается пластическое течение материала, т.е. движение дислокаций, тем выше его размерная стабильность. В связи с этим для повышения характеристик стабильности дисперсионно-твердеющего сплава на этапе старения необходимо создавать эффективные препятствия для движения дислокаций.

Как известно, дислокации могут преодолевать эти препятствия или перерезая их, или обходя вокруг [5]. При действии механизма перерезания деформация идет по меньшему числу систем скольжения, где действуют достаточно высокие приведенные напряжения сдвига, поэтому повышаются значения напряжения, необходимого для начала пластической деформации. Для реализации этого механизма и, следовательно, получения более высоких значений сопротивления микропластическим деформациям в качестве основных параметров оптимальной микроструктуры, с учетом данных работ [5, 6], можно определить следующие:

- частичная когерентность структур выделения и их дисперсность;
- минимизация расстояния между частицами, чтобы дислокация не могла пройти между ними;
- равномерное распределение частиц выделений по объему сплава.

Такая микроструктура обычно характерна для ранних стадий старения.

Исследование влияния режимов термообработок на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава 40ХНЮ-ВИ

Этап 1 – закалка. Для исключения α -фазы исследовалось изменение микроструктуры сплава при повышении температуры закалки до 1200°C , так как более высокая температура закалки способствует более полному прохождению диффузионных процессов. Как показали практические результаты, хотя с увеличением температуры закалки на 50°C объемная доля α -фазы уменьшается с 5,45% до 1,2%, но происходит значительный рост зерна: закалка от 1150°C (рис. 2, а) – зерно 10–25 мкм, от 1200°C (рис. 2, б) – 20–100 мкм.

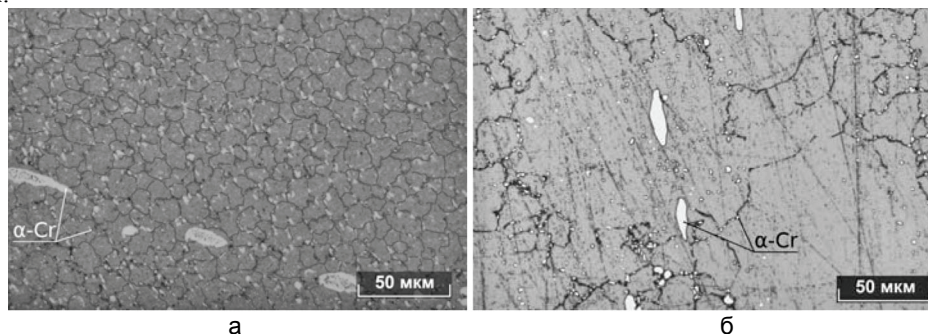


Рис. 2. Микроструктура сплава 40ХНЮ-ВИ после закалки: от 1150°C , выдержка 30 мин (а); от 1200°C , выдержка 30 мин (б)

Увеличение времени выдержки при закалке от 1200°C до 2,5 ч также не приводит к полному растворению α -фазы, а способствует дальнейшему росту зерна, что связано с рекристаллизацией, и отрицательно сказывается на пластичности сплава после последующего старения, сводя ее практически до нуля. В этом случае наиболее эффективной для закалки является температура 1150°C , позволяющая сохранить мелкое зерно и, что согласуется с теоретическими данными (изотермические разрезы тройных систем), получить однофазный раствор. Для достижения системой максимально равновесного состояния и полного растворения α -фазы при этой температуре закалки исследовалось влияние времени выдержки на микроструктуру сплава.

На рис. 3 приведена микроструктура сплава после закалки от 1150°C с выдержкой при закалке в течение 10 ч.

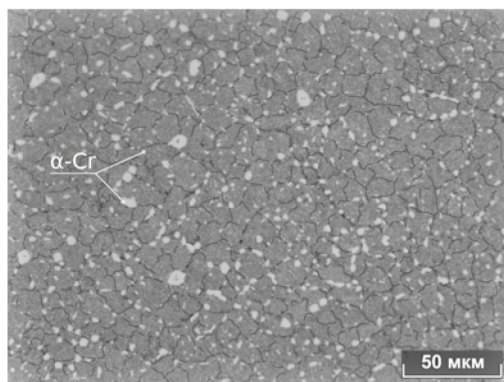


Рис. 3. Микроструктура сплава 40ХНЮ-ВИ после закалки от 1150°C , выдержка 10 ч

С увеличением времени выдержки при закалке происходит растворение мелких частиц α -Cr и укрупнение частиц на границах зерен. Данные рентгеноструктурного анализа показывают, что доля α -фазы уменьшается с 5,45% (при выдержке 30 мин) до 4,2% при выдержке 10 ч. Все это свидетельствует о крайне медленных диффузионных процессах, что делает увеличение времени выдержки под закалку как способ растворения α -фазы, недостаточно эффективным.

Для получения однофазного γ -твердого раствора может являться эффективным применение метода высокотемпературной термоциклической обработки сплава, который за счет интенсификации процессов диффузии, фазовых и структурных превращений позволит сократить длительность термической обра-

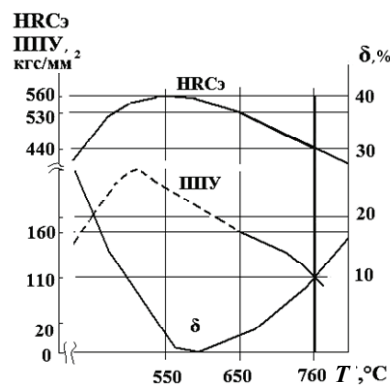
ботки и растворить выделения α -фазы, что положительно скажется на свойствах сплава после старения, в том числе на его размерной стабильности.

Этап 2 – старение. Рентгеноструктурные исследования закаленных и состаренных образцов показывают (рис. 4, а), что при старении происходит распад γ -твердого раствора с выделением интерметаллида Ni_3Al и фазы α -Cr. Причем, объемное содержание и распределение преимущественно по границам или в теле зерна фазы α -Cr в закаленном состоянии влияет на процессы распада и соотношение объемных долей выделяющихся фаз – α -фазы и интерметаллидной. В связи с этим для операции закалки важно предусмотреть дополнительные термические обработки, которые позволили бы уменьшить долю первичной α -фазы и не приводили бы к укрупнению зерна матрицы. Но, даже если в производственных условиях такие режимы будут малоприменимы, улучшить показатели размерной стабильности сплава можно за счет правильного выбора режимов старения.

В работе исследовалось изменение механических характеристик, таких как твердость и относительное удлинение, в зависимости от температуры старения при одинаковых выдержках 5 ч и предварительной закалке с 1150°C. Результаты изменения этих свойств представлены на рис. 4, б, где отражены как экспериментальные данные, так и значения из известных источников [2].

Состояние	γ -Ni, %	α -Cr, %	Ni_3Al , %
Закалка 1150°C, 30 мин	94,6	5,4	-
Закалка 1150°C, 30 мин + старение 760°C, 5 ч	68	21,2	10,8
Закалка 1150°C, 3 ч	94,75	5,25	-
Закалка 1150°C, 3 ч + старение 760°C, 5 ч	68,7	18,5	12,8

а



б

Рис. 4. Результаты рентгеноструктурных исследований (а); изменение свойств сплава 40ХНЮ-ВИ от температуры старения, закалка с 1150°C (б) (пунктиром выделено предположительное изменение ППУ)

В качестве характеристики размерной стабильности сплава измерялся прецизионный предел упругости (ППУ) $\sigma_{0,0001}$. Значение ППУ для сплава, состаренного при 760°C, составило 1120 МПа, а для режима 650°C – 1615 МПа. На основе аналитических расчетов и предположений и результатов известных экспериментальных исследований других дисперсионно-твердеющих сплавов [7] была построена кривая изменения ППУ (показана пунктиром), где пик значений приходится на начальные стадии процесса старения, позволяющие создавать в микроструктуре сплава эффективные препятствия для движения дислокаций и повышать напряжения начала пластической деформации. Следует отметить, что пик ППУ будет более острым и не полностью совпадающим с пиком твердости (57–60 HRC₃), так как ППУ характеризует поведение сплава в микрообъемах и является более чувствительным к структурным и фазовым изменениям, чем твердость, которая является относительно условным показателем происходящих в сплаве процессов.

В настоящее время старение проводится при температуре 760°C с выдержкой 5 ч. Этот режим соответствует стадиям перестаривания сплава, поэтому интерметаллидные частицы некогерентны матрице, расстояние между ними достаточно большое, и движущиеся дислокации обходят частицы; соответственно, пластическая деформация начинается при сравнительно меньших напряжениях, что снижает размерную стабильность сплава.

Перспективной областью исследования температур старения, позволяющих повысить размерную стабильность сплава и соответственно повысить стабильность геометрических параметров прецизионных деталей, является диапазон 400–550°C. Эти ранние стадии процесса старения позволяют формировать структуру сплава, более близкую к структуре, соответствующей высоким значениям характеристик размерной стабильности при сохранении значений относительного удлинения. По этой причине в дальнейшем целесообразно исследовать именно этот диапазон температур с определением величин времени выдержки при старении, оптимальных с точки зрения образования когерентных или полукogerентных частиц, чтобы достигнуть максимального ППУ сплава 40ХНЮ-ВИ без снижения его пластичности (и относительного удлинения δ как показателя пластичности), а соответственно – и более высокой размерной стабильности прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа, изготавливаемых из этого сплава.

Заключение

В результате проведенной работы исследованы основные свойства сплава 40ХНЮ-ВИ, влияние режимов термических операций закалки и старения на его структурно-фазовое состояние, а также на механические свойства, в том числе на характеристики размерной стабильности, которые важны для сохранения высоких точностей прецизионных деталей газового подшипника поплавкового гироскопа.

Выявлено, что наилучшим режимом закалки сплава является температура 1150°C с выдержкой 30 мин после полного прогрева заготовки. Установлено, что увеличение времени выдержки при закалке до 10 ч в незначительной мере обеспечивает растворение включений первичной фазы α -Cr, также как и повышение температуры закалки до 1200°C, приводящее к резкому росту зерна и ухудшению пластических свойств сплава. Перспективным для улучшения свойств размерной стабильности является дальнейшее исследование и применение дополнительных термических операций, таких как, например, высокотемпературная термоциклическая обработка.

Установлено, что применяемый в технологии изготовления прецизионных деталей режим старения при температуре 760°C с выдержкой 5 ч требует уточнения, поскольку не обеспечивает достаточно высокие параметры размерной стабильности сплава, такие как ППУ, необходимые для формообразования прецизионных узлов поплавкового гироскопа и сохранения их точности в течение длительного времени эксплуатации. Определен диапазон температур 400–550°C, который является перспективным для получения повышенных значений ППУ с сохранением пластичности сплава и требует дальнейшего исследования с установлением оптимальной температуры и времени выдержки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 10-08-00158а.

Литература

1. Сипенков И.Е., Филиппов А.Ю., Болдырев Ю.Я., Григорьев Б.С., Заблоцкий Н.Д., Лучин Г.А., Панич Т.В. Прецизионные газовые подшипники. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – 504 с.
2. Марингер (Maringer R.E.), Имгрэм (Imgram A.G.). Влияние некоторых факторов на стабильность размеров (Effects of Some Processing Variables on Dimensional Stability) // Проблемы трения и смазки: Пер. с англ. – М.: 1968. – № 4. – С. 212–215.
3. Молотиллов Б.В. Прецизионные сплавы. – М.: Металлургия, 1983. – 439 с.
4. Raghavan V. Aluminum – Chromium – Nickel // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2006. – V. 27. – № 4. – P. 381–388.
5. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов: Пер. с англ. – М., 1972. – 408 с.
6. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
7. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. – М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.

Яковлева Светлана Анатольевна – ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», аспирант, yorkunoi@gmail.com
Щербак Александр Григорьевич – ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, a_sch@gtn.ru

УДК 65.011.56:621.9

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВА

Б.С. Падун, М.А. Рябов

Рассматривается новая концепция построения автоматизированной системы управления сборочным производством на основе адаптивно-селективной сборки. Эта концепция обеспечивает новые методы проектирования и организации автоматизированных систем управления исходя из особенностей подобных производств, таких как соблюдение строгих математических моделей обеспечения функциональной точности прибора, неточное задание особенностей работы линии, эффективная и безаварийная работа разнообразных устройств линии в не определенных заранее ситуациях и т.д.

Ключевые слова: метод проектирования, метод сборки, технологический процесс, автоматизированная система управления, структура автоматизированной системы управления, синхронизация, реальное время, нештатные ситуации.

Введение

Автоматизация сборки точных приборов при небольших партиях их выпуска невозможна без создания специальных методов сборки и интеллектуальной автоматической системы управления [1, 2]. Управление линией осуществляется по результатам виртуальной сборки, которая должна базироваться на строгих математических моделях обеспечения функциональной точности прибора [3]. Но в настоящее время используемые модели не всегда адекватны, поэтому в процессе сборки могут возникнуть ситуации, требующие оперативного решения. Кроме этого, необходимо обеспечить эффективную и безаварийную работу разнообразных устройств линии в не определенных заранее ситуациях, возникающих на

линии [4, 5]. Следовательно, требуется разработать метод построения систем управления технологическими процессами, которые характеризуются неточным заданием особенностей работы линии.

Характеристика объекта управления

В технологической системе (ТС) сборки оптических изделий используется оборудование с программным управлением. ТС построена по модульному принципу [5, 6]. К основным элементам ТС сборки относятся: 1) роботы-манипуляторы, контрольно-измерительные устройства и установки, автоматы для выполнения сборочных операций, локальные хранилища; 2) шатлы, траки, стрелки и фиксирующие устройства транспортных линий; 3) складское оборудование. Назовем указанные элементы модулями первого уровня.

Из модулей первого уровня собираются модули второго уровня: станции сборки и измерений; автоматические склады; транспортные системы. Модули второго уровня объединяются в модули третьего уровня – зоны сборки и складская система, в которую входят стационарные и мобильные склады. Модули третьего уровня объединяются в линию сборки. Назовем его модулем четвертого уровня.

Постановка задачи

Необходимо построить автоматизированную систему управления (АСУ) ТС сборки микрообъектива (МО), обеспечивающую в соответствии с заданной программой простое и надежное управление разнородными устройствами, действия которых не синхронизированы во времени, и возможность оперативного изменения процесса сборки.

Структура АСУ ТС

В качестве управляющего автомата используется вычислительная сеть, включающая персональные компьютеры и контроллеры [6]. На этой сети реализуется АСУ, в задачи которой входят:

- прием данных о технологическом процессе сборки (ТПС) от автоматизированной системы проектирования (САПР) ТПС;
- декомпозиция ТПС на технологические процессы зон, станций, модулей;
- загрузка программ и данных на соответствующие компоненты ТС сборки;
- выполнение программ управления;
- синхронизация работы оборудования;
- формирование сообщений о нормальном завершении операций;
- контроль исправности управляющих устройств и объектов управления;
- распознавание нештатных ситуаций;
- передача сообщений о нештатных ситуациях, возникающих в работе ТС, в САПР.

Модули линии сборки – это, в общем случае, самостоятельные единицы оборудования, способные работать независимо и параллельно. Например, устройства первого уровня независимо друг от друга выполняют действия по выполнению переходов, станции независимо друг от друга выполняют предписанные им технологические операции, в зонах независимо друг от друга выполняются части технологического процесса [6]. В единое целое оборудование станции объединяет система управления станцией, оборудование зоны – система управления зоной, ТС сборки как единое целое – АСУ всей линией.

Таким образом, АСУ линией сборки строится как четырехуровневая система (рис. 1):

- на первом уровне средствами управления модулей решаются локальные задачи управления стендами, устройствами и т.п.;
- на втором уровне координируются работы модулей первого уровня, из которых состоит станция или автоматический склад. Координация осуществляется либо от компьютера станции, либо от компьютера линии сборки, которые загружают в системы управления модулей первого уровня необходимые программы и данные (технологические процессы). Одной из основных функций второго уровня управления является функция синхронизации работы компонентов исполнительной системы с темпом работы оборудования согласно заданной технологии изготовления изделий. Синхронизация выполняется путем инициирования работы соответствующих компонентов в заданные моменты времени согласно циклограмме функционирования исполнительного оборудования ТС линии сборки и программ системы управления линией сборки и текущему состоянию каждого компонента ТС линии сборки;
- на третьем уровне координируется работа станций конкретных зон и складской зоны. Координация в этом случае осуществляется от компьютера линии сборки, загружающего в системы управления станциями необходимые программы и данные (технологические процессы), а также выполняющего программу (технологический процесс), обеспечивающую необходимую дисциплину эксплуатации зоны. На этом уровне также выполняется синхронизация работ станций путем инициирования их работы в заданные моменты времени согласно текущему состоянию станций и по определенной временной диаграмме;

- на четвертом уровне выполняется координация работ стационарного склада и зон сборки от компьютера линии сборки, выполняющего сформированную дисциплину работы линии сборки в целом. Особо важна синхронизация работ робота-штабелера с состоянием позиций приема и съема тары в зонах.

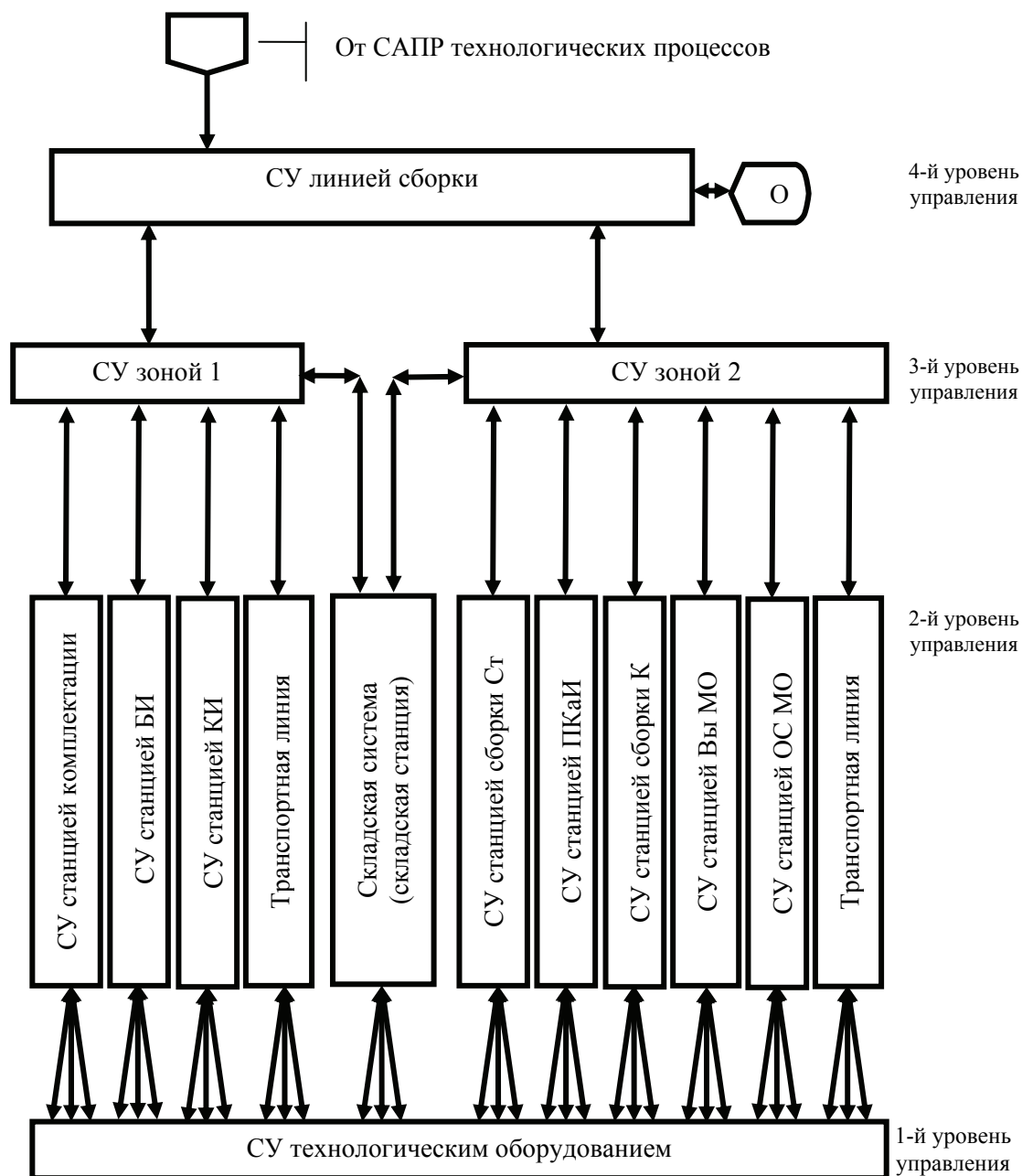


Рис. 1. Структура автоматизированной системы управления линией сборки:
 СУ – система управления; О – оператор; БИ – бесконтактное измерение; КИ – контактное измерение;
 Ст – внутренний стакан; ПКай – проверки качества изображения; Вы – высота; К – корпус;
 ОС – окончательная сборка

Инициирование работы компонентов и контроль их состояния достигается за счет передачи сообщений (данные для программ и данные о состояниях оборудования) между компьютерами разных уровней управления. Информационные связи между компьютерами организованы иерархически. Сообщения о состояниях оборудования линии сборки могут передаваться между компьютерами разных уровней.

Для выполнения виртуальной сборки, проектирования ТПС и повышения гибкости линии сборки предназначена программная система проектирования технологии сборки изделий (САПР технологических процессов), способная, при выполнении некоторых требований, обеспечить такой вариант ТПС, который может быть оптимальным образом реализован на ТС линии. Данная система связана с системой управления линией сборки по вычислительной сети.

Программное обеспечение АСУ

Учитывая задачи и конфигурацию ТС линии сборки, в программное обеспечение АСУ включаются следующие компоненты (рис. 2): монитор АСУ; система управления и контроля сборки изделий; банк данных. Система управления и контроля сборки изделий делится на комплексы и модули, что позволяет повысить адаптивные и эволюционные свойства программного обеспечения (ПО) АСУ.

АСУ технологической системой сборки работает в двух режимах:

- в режиме реального времени, когда она управляет ТС или принимает данные от станций измерения;
- в диалоговом режиме, когда выполняется настройка системы, анализируется работа или состояние компонентов технологической системы или формируются отчеты по выполнению производственных функций.

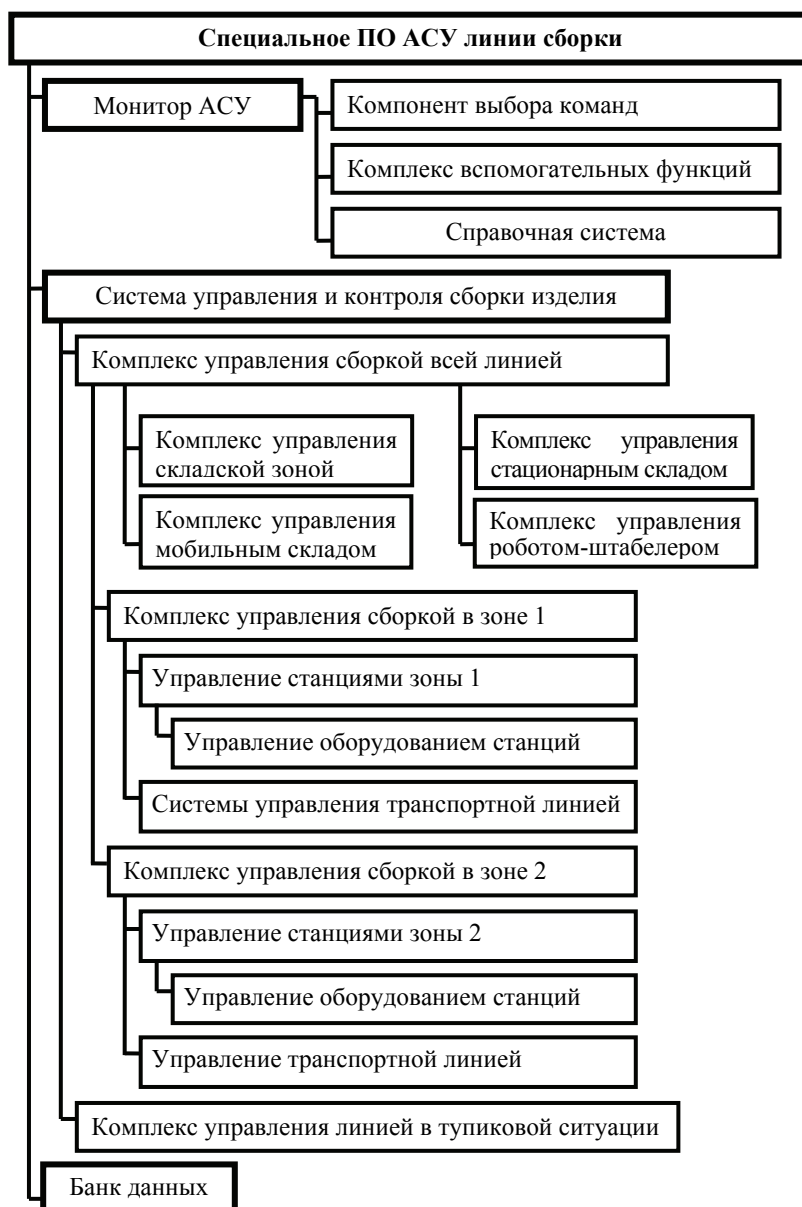


Рис. 2. ПО АСУ ТС

Информационное обеспечение АСУ

Управление и контроль над процессом сборки ведется на базе результатов моделирования сборки, которое проводится в САПР ТПС. В АСУ данные о ТПС поступают в виде структурированной записи:

<ТПС> ::= <имя ТПС> <данные о ТПС> <конец ТПС>

<данные о ТПС> ::= <ТПС для зоны> | <ТПС для зоны> <данные о ТПС>

<ТПС для зоны> ::= <имя зоны> <данные о ТПС в зоне> <конец ТПС в зоне>

Будем называть ТПС для станции технологической операцией сборки (ТОС), тем самым подчеркивая важность синхронизации работы оборудования на станциях линии сборки.

<данные о ТПС в зоне> ::= <ТОС станции> | <ТОС станции><данные о ТПС в зоне>

<ТОС станции> ::= <имя станции> <данные о ТОС станции> <конец ТОС>

<данные о ТОС станции> ::= <ТПС для конкретного устройства> | <ТПС для конкретного устройства>
<данные о ТОС станции>

<ТПС для конкретного устройства> ::= <имя устройства> <данные для программы> <признак конца>

Структура данных для программы управления конкретным устройством оригинальна.

Синхронизация работы оборудования линии

Синхронизация основана на применении механизмов семафоров и прерываний [6, 7]. С помощью семафора распределяются критические ресурсы на станциях, например, пространство обслуживания тар при работе робота-перекладчика и робота-манипулятора. Если значение семафора равно нулю, то ресурс свободен. При захвате ресурса к нему прибавляется единица, при освобождении – вычитается единица. С помощью прерываний обеспечивается синхронизация устройств разных станций и зон.

Внештатные ситуации

Внештатные ситуации (если исключить выход из строя оборудования) возникают при взаимодействии модулей между собой. Например:

- необходимо со станции снять тару на подошедший шатл, но на шатле находится тара;
- на столик станции надо поставить тару, но на столике находится тара;
- тара к станции подвезена, но в ней находятся не те детали, которые должны участвовать в сборке, и т.д.

Для работы алгоритмов выявления нештатных ситуаций необходимы данные о текущем состоянии линии. Для этого вводятся дескрипторы модулей. Для станций и зон дескрипторы оригинальны. Рассмотрим в качестве примера дескриптор одной из станций.

<дескриптор станции> ::= <состояние устройства> | <состояние устройства> <дескриптор станции>

<состояние устройства> ::= <имя устройства> <характеристики устройства>

<характеристики устройства> ::= <характеристика устройства> | <характеристика устройства> <характеристики устройства>

<характеристика устройства> ::= <рабочее состояние> | <ожидание> | <расположение> | <что хранится>

Заключение

Автоматизированная система управления линией сборки микрообъектива имеет децентрализованное управление, обеспечивает эффективную эксплуатацию устройств технологической системы сборки, синхронизирует работу устройств с различным временем выполнения действий, обеспечивает контроль и выявление нештатных ситуаций.

Литература

1. Азбель В.О., Егоров В.А., Звоницкий А.Ю. и др. Гибкое автоматическое производство / Под общ. ред. С.А. Майорова, Г.В. Орловского, С.Н. Халкиопова. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1985. – 454 с.
2. Замятин В.К. Технология и автоматизация сборки: Учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1993. – 464 с.
3. Лебедовский М.С., Вейц В.Л. Федотов А.И. Научные основы автоматической сборки. – Л.: Машиностроение, 1985. – 316 с.
4. Митрофанов С.П. Групповая технология машиностроительного производства. – Л.: Машиностроение, 1983. – Т. 1. – 404 с.; Т. 2. – 376 с.
5. Парамонов Ф.И. Автоматизация управления групповыми поточными линиями. – М.: Машиностроение, 1973. – 392 с.
6. Федотов А.В. Автоматизация управления в производственных системах: Учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. – 368 с.
7. Шишмарев В.Ю. Автоматизация технологических процессов: Учеб. пособие для студ. сред. проф. образования. – М.: Академия, 2005. – 352 с.

- | | |
|-----------------------------------|---|
| Падун Борис Степанович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, bsp.tps.ifmo@mail.ru |
| Рябов Максим Александрович | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, maximryabov@gmail.com |

УДК 004.4'22:67.05

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

М.Я. Афанасьев, А.А. Саломатина, Е.Е. Алёшина, Е.И. Яблочников

Рассматривается возможность применения многоагентных технологий для решения задачи анализа заказов на технологическую подготовку производства и выбор исполнителей. Предложена методика многоуровневой оценки условий реализации заказа предприятиями.

Ключевые слова: многоагентные технологии, интегрированная распределенная среда, анализ заказов, выбор исполнителей.

Введение

В процессе технологической подготовки производства (ТПП) приборов используется большой объем информации, применяются различные инструментальные средства и информационные системы. В условиях кооперации предприятий успех проекта зависит от действий всех участников виртуального предприятия (ВП). Отсутствие централизованного управления данными, процессами и специалистами организаций приведет к возникновению неопределенностей по многим показателям (и, как следствие, к увеличению рисков), будет препятствовать эффективному комплексному решению всех задач подготовки производства.

Одной из основных задач системы управления ВП является задача анализа заказа и выбора исполнителей. Реализация методики поиска исполнителей, предложенной в [1], характеризуется множественными решениями и потребует значительного времени, если будет осуществляться исключительно силами специалиста. Для таких задач целесообразно использовать многоагентные технологии, применяемые для динамического управления сетевыми ресурсами, которые имеют преимущества при использовании их в распределенной среде [2]. Предлагается методика выбора исполнителей для решения задач ТПП на основе использования многоагентных технологий.

Выявление функций агентов многоагентной системы

Применительно к решению задачи конфигурирования ВП для поиска исполнителей на программные агенты целесообразно переложить следующие задачи:

- анализ услуг и ресурсов предприятий для поиска потенциальных исполнителей;
- упорядочивание предприятий по «привлекательности» условий реализации заказа для координационного центра.

Рассмотрим принципы построения многоагентной системы (МАС), позволяющей решать указанные задачи на основе децентрализованного управления.

Результатом решения первой задачи должен стать список предприятий, предлагаемые услуги которых соответствуют требованиям заказа. Для этого предлагается поиск исполнителей осуществлять по сопоставлению кодов заказов и кодов услуг, а также на основе анализа требований заказа и характеристик ресурсов компаний. Формализация последовательности данных действий позволит разработать метод для программного агента, по которому последний будет осуществлять преобразование входных данных, а именно – характеристики заказа, в выходную информацию в виде списка предприятия. В основе разрабатываемого метода программного агента лежит алгоритм анализа заказа [1], для уточнения которого необходимо определить функции программного агента. Данный агент, которого условно назовем А, предназначен для выявления круга потенциальных исполнителей для некой работы по ТПП и рассылки им уведомлений о появлении нового заказа. При получении такого сообщения предприятие-партнер может ознакомиться с более подробной информацией о предлагаемой работе на сайте компании-заказчика. Тем самым такой вид агентов позволяет автоматизировать взаимодействие участников виртуального предприятия и ускорить процессы формирования активной сети для совместной реализации какого-либо проекта. Кроме этого, агент А должен активировать к работе и обеспечить входными данными других агентов.

Таким образом, за агентом А закрепляются следующие функции:

- сопоставление значений кодов заказов и услуг и вывод предварительной ведомости с указанием предприятий, услуги которых соответствуют заказам;
- анализ требований заказа и характеристик ресурсов предприятий;
- вывод ведомости предприятий, удовлетворяющих требованиям заказа, в виде перечня идентификаторов предприятий;
- вывод оператору сообщения о завершении анализа;
- активизация последующих агентов.

Процедура поиска исполнителей представлена на рис. 1–3. В данном алгоритме предусмотрена возможность анализа характеристик оборудования не только по количественным, но и качественным

значениям атрибутов. Вместе с тем, реализация процедуры возможна лишь в том случае, если сформирована база правил и определены функции принадлежности нечетких переменных.

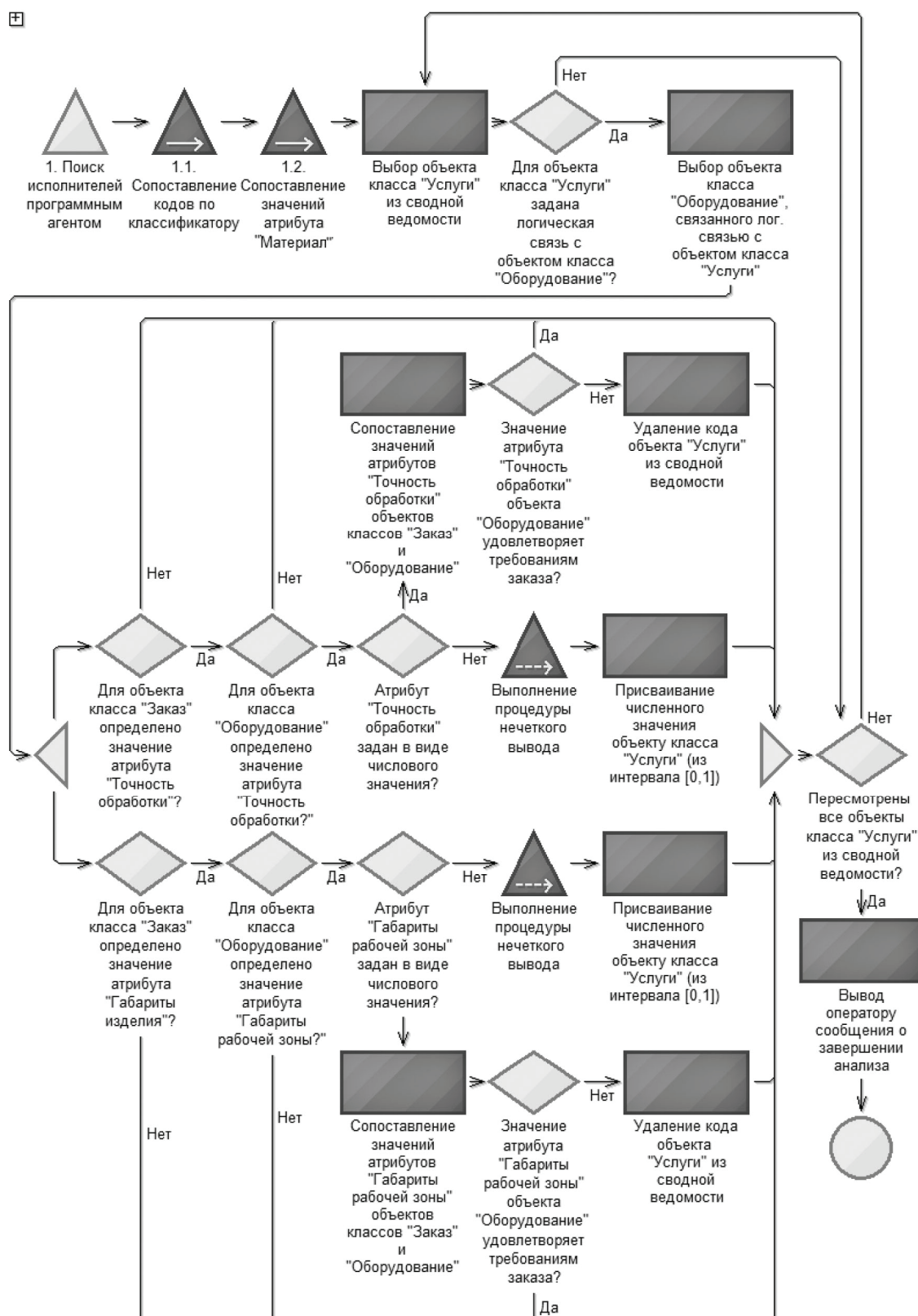


Рис. 1. Алгоритм поиска исполнителей программным агентом

По результатам работы агента А специалист ВП осуществляет рассылку уведомлений потенциальным исполнителям. Выполнение данного действия не закрепляется за агентом А, поскольку в алго-

ритме предусмотрен анализ качественных характеристик оборудования, который предполагает принятие решения оператором о возможности реализации заказа предполагаемым исполнителем на основе полученных численных значений параметров ресурсов после выполнения процедуры нечеткого вывода.

По истечении определенного промежутка времени, отведенного на ожидание заявок от предприятий, требуется сформировать ведомость предложений. Мониторинг состояния регистрации предложений в интегрированной распределенной среде (ИРС) ВП от участников на выполнение заказа можно также осуществлять с помощью программного агента, за которым будут закреплены функции отслеживания количества заявок потенциальных исполнителей на выполнение работ по ТПП.

Получив сводную ведомость заявок предприятий на реализацию заказа, оператор должен осуществить выбор в пользу той или иной организации при условии, что на один заказ приходится больше одной компании. Специалист будет принимать решение по результатам анализа условий реализации заказа, которые готовы предложить потенциальные исполнители. Очевидно, что наибольшее значение будет иметь информация о стоимости и времени выполнения работ. Кроме того, возможно, оператору будет интересна дополнительная информация о ресурсах предприятий (текущая загрузка ресурсов, фирма-производитель оборудования и т.п.). На основе анализа предоставляемых данных требуется выявить те компании, условия которых являются наиболее предпочтительными.

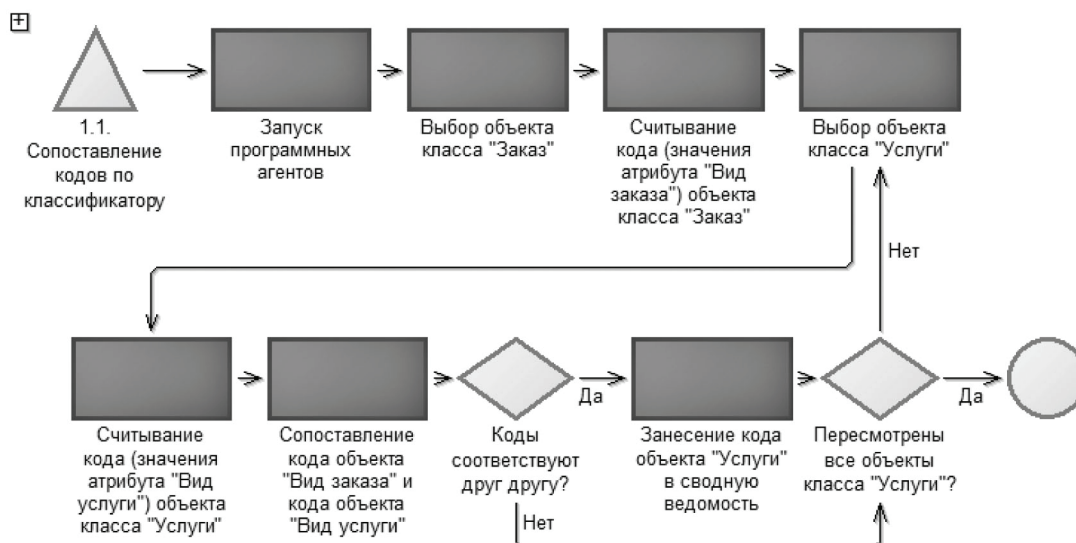


Рис. 2. Процедура сопоставления кодов программным агентом

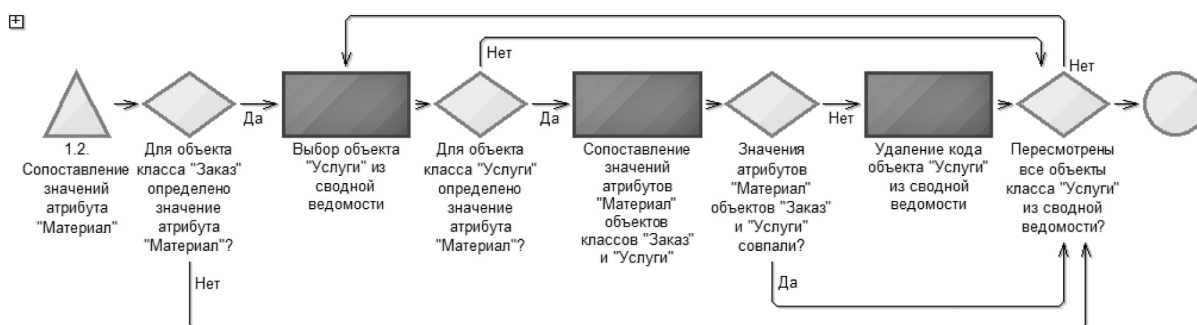


Рис. 3. Процедура сопоставления значений атрибута «Материал» программным агентом

Если результат мониторинга заявок показал большое число потенциальных исполнителей, то достаточно сложно обработать предложения от всех предприятий и выявить оптимальный вариант. Решение данной задачи предлагается частично переложить на программного агента, а именно, реализовать автоматическое упорядочивание организаций по рейтингам, рассчитываемым на основе анализа условий выполнения заказа. К ключевым критериям успешности любого проекта относят время, стоимость и качество. В отличие от первых двух характеристик, показатель качества в прямом действии не сводится к количественному критерию и требует уточнения. Качество результатов можно установить по ответной реакции заказчика: при отсутствии возвратов на доработку изделия или ремонт следует считать, что данный участник кооперации «качественно» выполнил заказ. Исходя из этого, качество будет определяться историей работы с соисполнителем.

Методика расчета рейтингов потенциальных исполнителей

Анализ предложений только по приведенным выше параметрам приводит к возникновению крайне затруднительных условий для вступления новых участников в кооперационную среду. В связи с этим следует предусмотреть некий поддерживающий фактор для новых членов кооперации и на поддержку тех участников, которые могли бы выполнить данный заказ, но не имеют в данном виде работ большого опыта (такая поддержка имеет определенную аналогию с принципами антимонопольной политики).

Кроме того, учет такого фактора, как принадлежность организации к отечественной промышленности, позволит снизить риск возникновения дополнительных стоимостных и временных издержек (например, на транспортировку, таможенную пошлину и др.). Принятие во внимание данного критерия не обязательно приведет к однозначному выбору не в пользу предприятия зарубежной промышленности, поскольку услуги таких компаний могут выигрывать в качестве или по другим показателям.

Таким образом, оптимальное решение будем определять следующими показателями:

- временем реализации заказа;
- стоимостью реализации заказа;
- наличием положительного опыта работы с соисполнителем;
- периодом времени участия в кооперационной среде;
- принадлежностью к отечественной промышленности.

Степень влияния значений представленных выше параметров на выбор исполнителей определяется весовыми коэффициентами, величины которых в зависимости от текущего заказа (условий заказчика) не всегда будут одними и теми же и в каждой конкретной ситуации могут варьироваться. По этой причине значения весовых коэффициентов показателей приводить не будем.

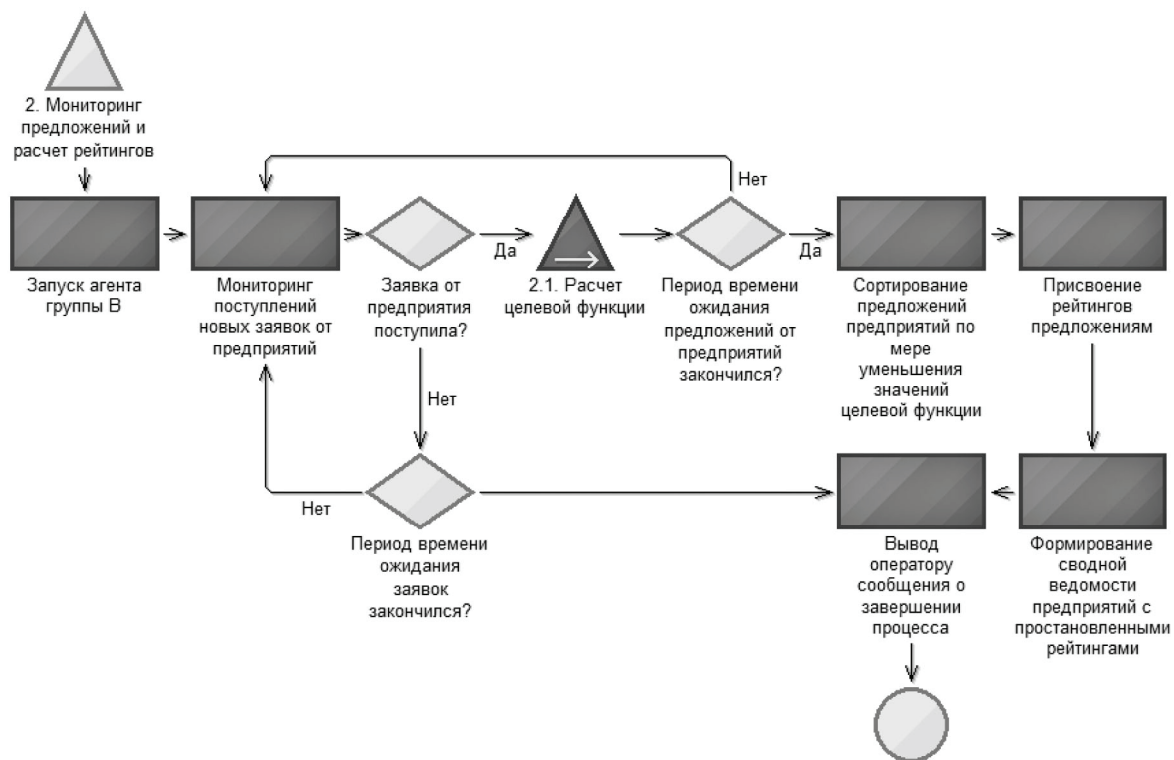


Рис. 4. Алгоритм мониторинга предложений и расчета рейтингов программным агентом

Математически оптимальное решение будет определяться следующим образом:

$$P = \sum_{M=1}^n \max \left(\frac{\omega_t}{t_M} + \frac{\omega_c}{C_M} + \omega_e \times e_M + \omega_q \times (\omega_{q1} \times G_M + \omega_{q2} \times O_M) + \omega_U \times U_M \right),$$

где n – число поступивших предложений от предприятий; $\omega_t, \omega_c, \omega_e, \omega_q, \omega_{q1}, \omega_{q2}, \omega_U$ – весовые коэффициенты; t_M, C_M – соответственно значения времени и стоимости, которые предлагает предприятие M для реализации заказа; e_M – значение, характеризующее наличие положительного опыта работы с предприятием M (определяется по результатам реализации заказов: каждый успешно выполненный проект увеличивает значение e_M). Данный атрибут предусмотрен в паспорте предприятия; G_M – число лет, в течение

которых предприятие M является членом кооперационной среды; O_M – число заказов, выполненных предприятием M ; U_M – значение, характеризующее принадлежность предприятия M к отечественной промышленности ($U_M = 1$ – для отечественных предприятий и $U_M = 0$ – для зарубежных предприятий). $\square$

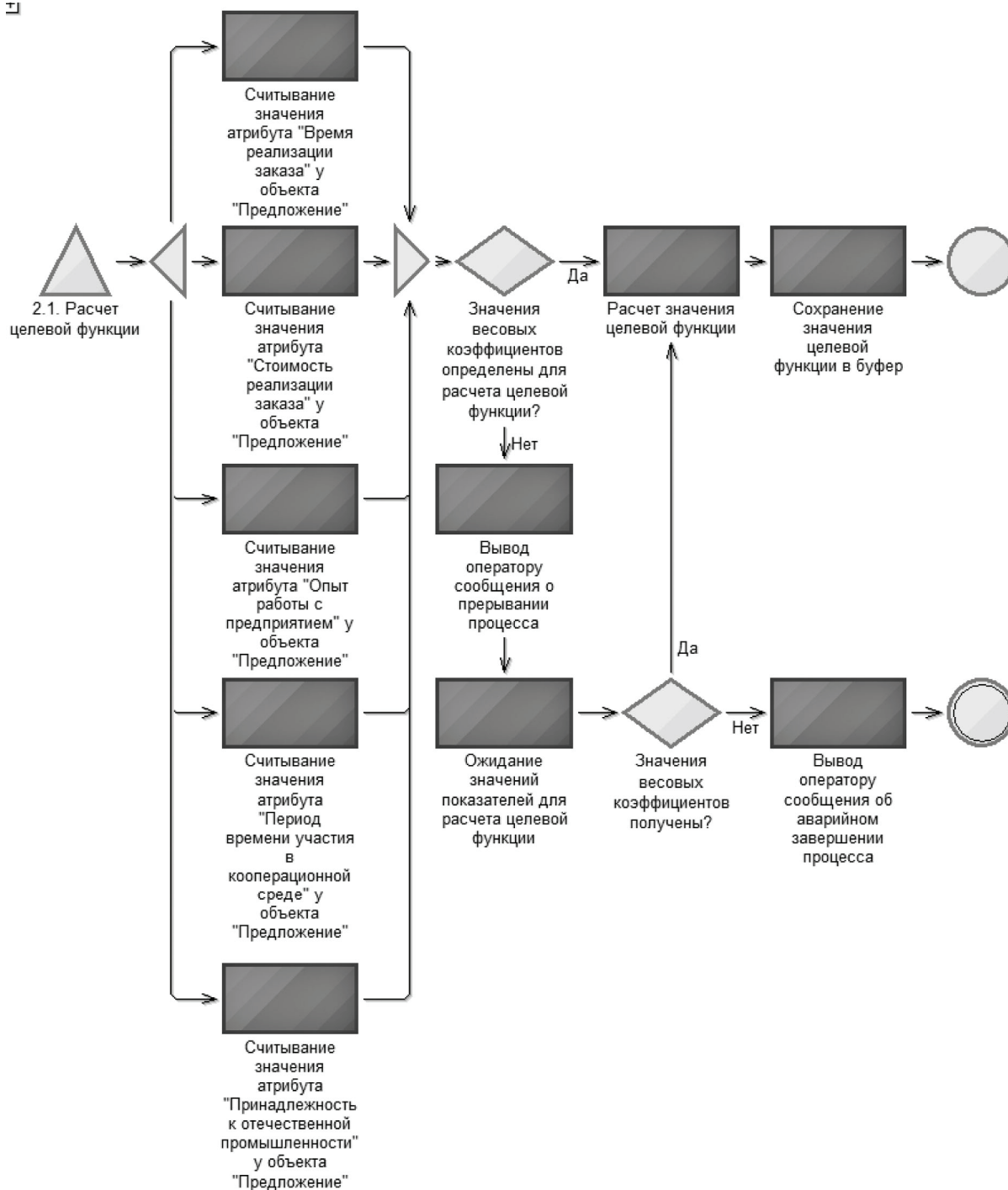


Рис. 5. Алгоритм расчета целевой функции

Таким образом, по представленной выше формуле требуется посчитать значение целевой функции для каждого предприятия, т.е. определить «привлекательность» условий организаций для реализации заказа, а затем отсортировать их по мере уменьшения значений данного показателя.

В результате оператор ВП, определив значения весовых коэффициентов перед запуском мониторинга и анализа предложений от потенциальных исполнителей, получит ведомость предприятий с рассчитанными рейтингами. Компания, рейтинг которой имеет наибольшее значение, будет в первую очередь рассматриваться в качестве исполнителя реализации заказа. На окончательный выбор предприятия специалистом координационного центра может оказать влияние дополнительная, слабо формализуемая

информация о ресурсах компаний, для предоставления которой следует предусмотреть специальные текстовые поля (атрибуты) у объектов в структуре базы данных ИРС.

Следовательно, за программным агентом, которого отнесем к группе **В**, будут закреплены следующие функции:

- мониторинг заявок от предприятий на реализацию заказа;
- расчет рейтингов предприятий по результатам анализа условий реализации заказа;
- формирование сводной ведомости предприятий и присвоенных рейтингов.

Процедура мониторинга предложений и расчета рейтингов представлена на рис. 4, а расчет целевой функции – на рис. 5.

Реализация описанного алгоритма возможна лишь в том случае, если информация об условиях реализации заказа со стороны предприятий предоставляется в формализованном виде [3]. Оптимальное распределение заказов будет зависеть не только от рейтингов предприятий, но и от того, как сформированы пакеты заказов на выполнение задач ТПП. Очевидно, что заказчику работ по ТПП удобнее иметь дело с меньшим числом исполнителей, т.е. формировать крупные пакеты заказов. Однако далеко не все исполнители могут взяться за выполнение крупных заказов. Причины этого могут быть как в том, что исполнитель не может решить некоторые из входящих в пакет задач, так и в том, что исполнитель не может выполнить крупный заказ в намеченные сроки из-за ограниченных производственных мощностей. Это резко сужает круг возможных исполнителей, в результате чего стоимость выполнения работ по ТПП может оказаться существенно больше той, которая имела бы место при формировании более «мелких» пакетов заказов.

Для решения задачи оптимизации формирования пакетов можно воспользоваться методом полного перебора, но при условии, что число возможных вариантов комплектования заказов не превышает 50. В противном случае должны использоваться различные формы так называемого направленного перебора. В исследовании [4] предлагается методика решения «задачи коммивояжера» с использованием генетических алгоритмов для работ ТПП. В представленном подходе результаты работы схемы не всегда будут корректными, поскольку, как правило, процессы ТПП, а также производство осуществляется на одном предприятии. Применение же данной методологии для выбора исполнителей на реализацию более крупных заказов является вполне оправданным, поскольку позволяет учесть различные варианты распределения работ.

Заключение

Использование многоагентных технологий для анализа заказов на технологическую подготовку производства и ресурсов предприятий позволит сократить время поиска исполнителей заказов. Разработанный алгоритм поиска исполнителей предоставляет возможность анализировать характеристики оборудования не только по количественным, но и по качественным параметрам. В настоящее время ведется исследование практического применения описанной методики.

Литература

1. Саломатина А.А., Субботин И.А., Яблочников Е.И. Разработка алгоритма формирования пакетов заказов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 72–75.
2. Фомина Ю.Н. Многоагентные технологии при решении производственных задач // Программные продукты и системы. – М.: МНИИПУ, 2008. – № 2. – С. 66–68.
3. Фомина Ю.Н., Яблочников Е.И. Разработка методов и средств построения информационно-управляющей среды для реализации технологической подготовки производства в условиях виртуального предприятия // Вестник компьютерных и информационных технологий. – М.: Машиностроение, 2009. – № 5. – С. 33–40.
4. Саломатина А.А., Фомина Ю.Н., Яблочников Е.И. Оптимизация конфигурирования и распределения заказов виртуального предприятия // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – Вып. 48. – С. 151–155.

<i>Афанасьев Максим Яковлевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ichiro.kodachi@gmail.com
<i>Саломатина Анна Алексеевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Salomatina.Anna@gmail.com
<i>Алешина Екатерина Евгеньевна</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Aleshina.Ekaterina@gmail.com
<i>Яблочников Евгений Иванович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, eij@mail.ifmo.ru

УДК 621.81.004.17:620.191.355.001.5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

А.Ю. Иванов, Д.Б. Леонов

Обосновывается целесообразность повышения качества изделий за счет оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей и механических напряжений в поверхностных слоях их материала. Излагается принципиальная методика использования непараметрических критериев оценки и контроля этих характеристик поверхностного слоя деталей в процессе их изготовления.

Ключевые слова: шероховатость поверхности, механические напряжения, оптимизация характеристик поверхностного слоя деталей, качество изделий.

Введение

В зависимости от назначения, условий эксплуатации, ремонта и утилизации изделий к ним предъявляются различные требования. Эти требования обеспечиваются при их проектировании и, особенно, при их изготовлении. На этапе проектирования к числу важнейших факторов относятся правильный выбор материалов, назначение требований по геометрической точности и шероховатости поверхностей деталей.

Свойства конструкционных материалов играют огромную роль, и исходное их состояние должны гарантировать поставщики этих материалов. Однако, не умаляя роли конструкционных материалов, отметим, что основные характеристики качества изделий формируются в процессе их изготовления. Именно в процессе изготовления обеспечиваются обоснованные при проектировании требования по геометрической точности, качеству поверхности и поверхностного слоя материала изделий.

Технологическая управляемость механическими напряжениями в материале изделий

Очевидно, что повышение геометрической точности изделий повышает их качество, но одновременно повышается и себестоимость их изготовления, поэтому возможности влияния геометрической точности на качество изделий ограничены объективными факторами. Кроме того, при изготовлении изделий из металлов и сплавов во многих случаях имеют место механические и (или) термические воздействия, вызывающие пластическую деформацию кристаллических решеток материала изделия, что приводит к возникновению (или изменению) механических напряжений в деформируемом слое материала изделия. Возможные последствия:

- напряжения, превышающие предел прочности материала, в изделиях высокой жесткости вызовут возникновение трещин в материале;
- при малой жесткости изделий даже незначительные механические напряжения могут вызвать деформацию (коробление) изделия, т.е. нарушить его геометрическую точность;
- при напряжениях, меньших предела прочности материала, и высокой жесткости изделий внешних изменений в изделии не обнаруживается, но при совпадении знака остаточных напряжений и эксплуатационных силовых воздействий разрушение изделий происходит при нагрузках ниже расчетных.

Установлена технологическая управляемость механическими напряжениями в материале изготавливаемых изделий, т.е. величина и распределение этих напряжений по глубине материала зависят от видов и режимов технологических воздействий. В связи с этим важнейшее значение приобретает приемлемый в метрологическом и экономическом отношениях неразрушающий метод измерения и (или) контроля этих напряжений.

На кафедре технологии приборостроения СПбГУ ИТМО разработан и изготовлен измерительный комплекс СИТОН, позволяющий измерять механические напряжения в любых токопроводящих материалах, что дает возможность «строить» технологический процесс изготовления, на выходе которого механические напряжения будут иметь приемлемую величину и форму эпюры их распределения по глубине материала. В качестве примера на рис. 1, 2 показаны эпюры распределения остаточных напряжений при шлифовании на различных режимах и при обработке поверхностей на различных станках [1].

Шероховатость поверхностей деталей и эксплуатационные свойства изделия

Как указывалось выше, чем точнее изделие, тем лучше его функциональные свойства. По аналогии с этим существует убеждение, что чем меньше шероховатость поверхности, тем лучше. На самом деле это далеко не всегда так. Но важно другое: если шероховатость поверхности существенно влияет на конкретное функциональное свойство поверхности, то это влияние целесообразно оптимизировать. На эту тему опубликовано много статей, докладов и книг, где изложены практически все аспекты проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей. Отметим здесь лишь необходимость выполнения четырех условий для решения этой проблемы:

1. оптимальную шероховатость поверхности для ее конкретного функционального свойства нужно знать;

2. известную оптимальную шероховатость нужно обозначить (нормировать) на чертеже;
3. известную и обозначенную на чертеже оптимальную шероховатость нужно технологически обеспечить при обработке поверхностей;
4. шероховатость, полученную после обработки поверхности, нужно сравнительно быстро, удобно и дешево проконтролировать на соответствие заданной (оптимальной).

Как выполнить эти четыре условия, подробно изложено, например, в [2–10].

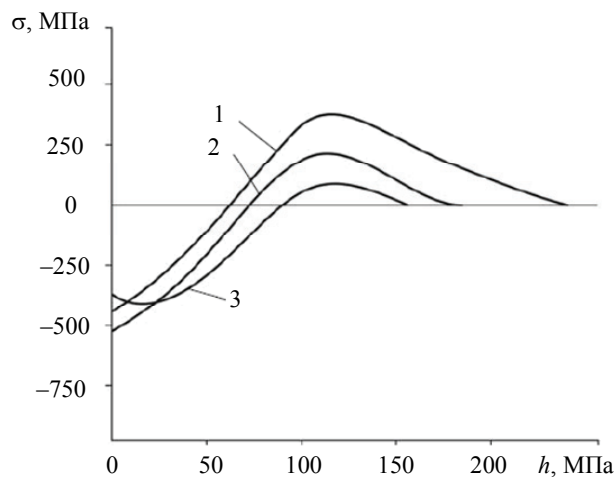


Рис. 1. Влияние режимов шлифования на остаточные напряжения $\sigma(h)$:
1 – скорость резания $v=10$ м/с; подача $S=0,3$ м/с; давление инструмента на обрабатываемую поверхность $P=100$ Н; 2 – $v=20$ м/с; $S=0,2$ м/с; $P=150$ Н; 3 – $v=40$ м/с; $S=0,1$ м/с; $P=200$ Н

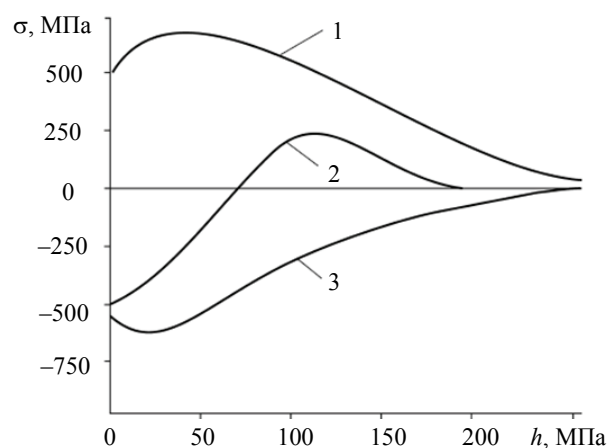


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений $\sigma(h)$ в стали 20Х13 после обработки:
1 – ручное шлифование на станке ЛШ-95 (Германия); 2 – шлифование лентой на станке Metabo (Германия); 3 – фрезерование на станке Forest (Германия)

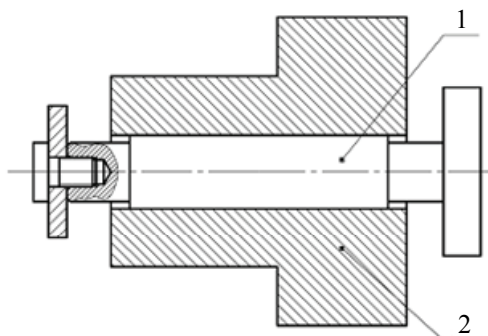


Рис. 3. Схема перемещения штока (1) во втулке (2) в запорном клапане

В данном случае рассмотрим влияние шероховатости сопрягаемых поверхностей на время перемещения штока 1 относительно втулки 2 в запорном клапане (рис. 3).

Наличие или отсутствие такого влияния проверялось в процессе сравнительно простого эксперимента. Было изготовлено пять комплектов сопрягаемых деталей (шток и втулка) по пять пар в каждом комплекте (для повышения статистической достоверности эксперимента). В каждом из пяти комплектов при минимально возможной одинаковости компонентов геометрической точности сопрягаемых поверхностей, существенно различалась их шероховатость. Результаты эксперимента приведены в таблице.

Группа	Деталь	Размер детали (диаметра), мм					Время передвижения штока во втулке, с				
1	2	3					4				
1	втулка	13,015	13,015	13,015	13,015	13,015	0,035/ 0,036	0,047/ 0,049	0,058/ 0,050	0,058/ 0,045	0,050/ 0,047
	втулка повернута на 90°	13,020	13,020	13,020	13,020	13,020					
	шток	12,999	13,001	13,000	13,001	13,003					
	шток повернут на 90°	13,001	13,002	13,001	13,004	13,004					
2	втулка	13,015	13,015	13,015	13,015	13,015	0,055/ 0,058	0,049/ 0,051	0,057/ 0,059	0,056/ 0,060	0,052/ 0,054
	втулка повернута на 90°	13,020	13,020	13,020	13,020	13,020					
	шток	13,001	13,003	13,003	12,999	13,002					
	шток повернут на 90°	13,001	13,001	13,003	13,003	13,002					
3	втулка	13,015	13,015	13,015	13,015	13,015	0,058/ 0,056	0,053/ 0,055	0,055/ 0,049	0,058/ 0,061	0,061/ 0,063
	втулка повернута на 90°	13,020	13,020	13,020	13,020	13,020					
	шток	13,003	13,003	13,001	13,001	13,001					
	шток повернут на 90°	13,003	13,003	13,002	13,002	13,001					
4	втулка	13,015	13,015	13,015	13,015	13,015	0,085/ 0,078	0,066/ 0,076	0,085/ 0,092	0,088/ 0,095	0,078/ 0,086
	втулка повернута на 90°	13,020	13,020	13,020	13,020	13,020					
	шток	13,000	13,000	13,001	13,000	13,000					
	шток повернут на 90°	13,000	13,000	13,001	13,000	13,000					
5	втулка	13,015	13,015	13,015	13,015	13,015	0,090/ 0,105	0,091/ 0,104	0,099/ 0,098	0,101/ 0,108	0,103/ 0,106
	втулка повернута на 90°	13,020	13,020	13,020	13,020	13,020					
	шток	13,002	13,001	13,000	13,000	13,000					
	шток повернут на 90°	13,001	13,000	12,999	12,999	13,000					

Таблица. Результаты экспериментов

В таблице втулки и штоки, изготовленные с шероховатостью, указанной на рабочих чертежах, помещены в 4-ю группу. В первую группу объединены втулки и штоки, шероховатость которых значительно грубее, чем на чертеже. Во вторую группу входят втулки с шероховатостью, указанной на чертеже, а шероховатость штоков грубее, чем на чертеже. В третью группу входят втулки с шероховатостью грубее, чем на чертеже, и штоки с шероховатостью, указанной на чертеже. В пятую группу вошли втулки и штоки с шероховатостью более низкой, чем указана на чертеже.

Как видно из таблицы, существенное влияние шероховатости на исследуемую характеристику очевидно, хотя есть отклонение от преобладающей закономерности.

Однако задача оптимизации шероховатости не решается с использованием стандартных параметров шероховатости, так как изменения параметров Ra или Rz не характеризуют фактического изменения структуры микрорельефа. При обеспечении экспериментально найденного и заданного на чертеже предпочтительного параметра шероховатости в разное время можно использовать либо разное оборудование, либо разные инструменты, что приведет к изменению структуры микрорельефа поверхностей при обеспечении указанных на чертеже параметров и, как следствие, к изменению их свойств, в частности, времени их относительного перемещения.

Важность оптимизационных задач вообще и в технологии приборостроения, в частности, не требует доказательств, но при наличии многопараметрических факторов влияния на интересующие функциональные свойства поверхностей изделий необходимо использовать так называемый непараметрический подход. Это означает, что изложенный выше эксперимент с подвижным сопряжением запорного клапана не решает задачу оптимизации микрогеометрии его контактирующих поверхностей, и необходимо продолжить исследование с использованием в качестве критериев оценки и контроля шероховатости поверхностей графических изображений, функций плотности распределения тангенсов углов наклона профилей, ординат профилей или, хотя бы, опорных кривых профиля (кривых Аббота) [2, 3, 5–7, 10], а оптимизацию механических напряжений и технологические методы управления ими необходимо реализовывать с помощью графических изображений эпюры их распределения по глубине поверхностного слоя [1, 10].

Заключение

Экспериментально установлено существенное влияние шероховатости контактирующих поверхностей штока и втулки (рис. 3 и таблица) на время их взаимного перемещения на одинаковой величине хода, что позволит с помощью непараметрических критериев оценки и контроля шероховатости установить лучшую из возможных микроструктуру этих поверхностей. Предложенная методика позволяет решить и другие оптимизационные задачи аналогичного характера.

Литература

1. Валетов В.А., Иванов С.Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин и приборов // *Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем.* – СПб, 2002. – С. 164–167.
2. Валетов В.А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // *Труды ЛКИ.* – 1976. – Вып. 108. – С. 135–140.
3. Валетов В.А. Использование новых критериев для оценки микрогеометрии поверхностей деталей машин // *Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами машин.* – Киев: Институт сверхтвердых материалов АН УССР, 1980. – С. 23–25.
4. Валетов В.А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндро-поршневой группы судовых дизелей в процессе их работы // *Трение и износ.* – 1983. – Т. 4. – № 6. – С. 1104–1107.
5. Валетов В.А. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. – Л.: ЛИТМО, 1989. – 100 с.
6. Валетов В.А. Целесообразность изменения стандарта на шероховатость поверхностей деталей // *Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб.* – СПб: СЗПИ, 1997. – № 6. – С. 118–121.
7. Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 191 с.
8. Waletow W., Stauffert G. Moderne Methoden der Oberflaechenforschung // *Technische Rundschau.* – 1981. – № 10. – Р. 5–7.
9. Valetov W.A., Grabow J. Neue Verfahren auf dem Gebiet der Analyse und Kontrolle der Oberflaechenmikrogeometrie // *41 Internationales wissenschaftliches Kolloquium.* – 1996. – Bd. 2. – Р. 622–625.
10. Валетов В.А., Иванов А.Ю. Непараметрический подход к оценке качества изделий // *Металлообработка.* – 2010. – № 6. – С. 55–59.

Иванов Андрей Юрьевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, проректор, auivanov@mail.ifmo.ru

Леонов Димитян Божидаров

– ВМЗ АО Сопот, Болгария, заместитель директора, dimilqn@mail.ru

УДК 621.311.25

МОДЕРНИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ СЕПАРАТОРОВ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ НА ЛЕНИНГРАДСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

М.Ю. Егоров

Представлены результаты испытаний модернизированных сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 с жалюзийными пакетами «Powervane», разработанными германской фирмой Balcke-Durg. Анализируются результаты определения влажности нагреваемого пара на выходе из сепарационной части СПП и его температуры между ступенями перегрева.

Ключевые слова: сепаратор-пароперегреватель, сепарация, теплообмен, влажность, температура, жалюзийные пакеты.

Введение

В состав турбоустановок АЭС с реакторами РБМК-1000, работающих на насыщенном паре, входят промежуточные сепараторы-пароперегреватели (СПП).

Однокорпусные вертикальные аппараты СПП-500-1 включают входную камеру (прием влажного пара из цилиндра высокого давления (ЦВД) и отделение крупнодисперсной влаги от пара), сепарационную часть (дальнейшая более тонкая сепарация влаги) и перегревательную часть (перегрев осушенного пара до температуры, обеспечивающей надежную работу цилиндра низкого давления (ЦНД)). Сепаратор расположен в верхней части аппарата, а в нижней – две ступени перегревателя-теплообменника, в котором греющий конденсируемый пар высокого давления передает теплоту пару низкого давления.

Одним из основных требований, предъявляемых к СПП, является эффективная и надежная работа сепарационных устройств на всех режимах. Признаки повышенного уровня влажности пара у за сепарационными блоками (рис. 1) возникли с первых лет эксплуатации СПП-500-1 и связаны, по мнению автора, с особенностями конструкции сепарационной части в целом. Другие проблемы эксплуатации данных аппаратов и причины их возникновения были проанализированы в работе [1].

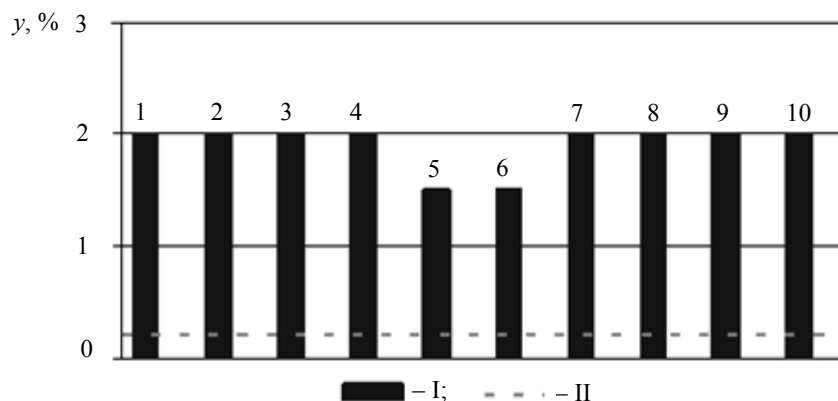


Рис. 1. Влажность y за сепарационными блоками на турбоустановках Смоленской АЭС (1–6) и Курской АЭС (7–10): I – значения по данным работы [2]; II – проектное значение

Цель настоящей работы, входящей в общий цикл исследований по тематике СПП, – анализ результатов проведенной модернизации и разработка предложений по дальнейшему совершенствованию аппаратов СПП-500-1, направленному на повышение надежности, экономичности и увеличение эффективности работы как СПП, так и турбоустановки и энергоблока с реактором РБМК-1000 в целом.

Модернизация сепарационной части СПП-500-1

Модернизация СПП-500-1 основана на замене отечественных жалюзийных сепарационных пакетов на жалюзийные пакеты типа «Powervane» фирмы Balcke-Durg. Также в совместном проекте Balcke-Durg и ОАО «НПО ЦКТИ» была изменена схема движения пара во входной камере, расположение сепарационных пакетов и системы коллекторов. Изменение конструкции сепарационной части обеспечило улучшение условий работы жалюзийных пакетов. Перегревательная часть модернизации не подвергалась.

Схема модернизированной СПП-500-1 выглядит следующим образом. Пар поступает во входную камеру 1 (рис. 2), образованную крышкой и дырчатым листом 2 с коническими лунками малой глубины 3, обеспечивающими сбор и отвод 4 (минуя жалюзи) крупнодисперсной влаги при минимуме гидравлического сопротивления. Выбор параметров отверстий, их конфигурации и шагов между отверстиями был основан на результатах экспериментального моделирования. Организован отдельный отвод влаги 5 (через отверстия 6), осаждающейся на стенках входной камеры, во внешний круговой коллектор. Из входной камеры пар направляется в 12 сепарационных блоков 7 типов А, В, С, D, E, F с пакетами «Powervane», представляющими собой наборы волнообразных профилей. Блоки расположены в кольцевом пространстве между корпусом и выходной трубой 11 и отличаются степенью перфорации металлических листов 8 на входе влажного пара, что обеспечивает определенное выравнивание потоков влажного пара через блоки. Наибольшей является площадь сечения перфорации блоков F, расположенных с противоположной стороны по отношению к входу пара во входную камеру 10. Блоки состоят из трех сепарационных пакетов типов I, II, III, также отличающихся степенью перфорации входных дырчатых листов в зависимости от изменения давления пара по высоте сепарационного блока вследствие коллекторных эффектов. Подбор степени перфорации входных листов снизил угловую неравномерность удельного расхода пара на входе в сепарационные пакеты «Powervane». Отсепарированная на жалюзи влага стекает во внутренний сливной кольцевой коллектор 9 и далее – в сепараторосборник.

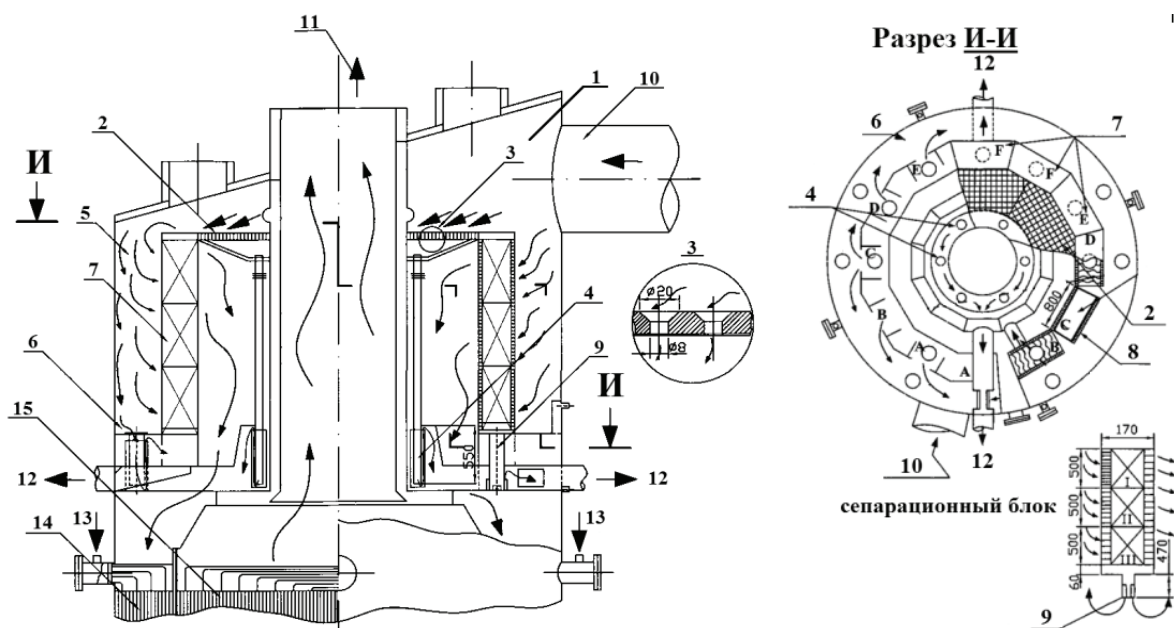


Рис. 2. Общий вид модернизированной сепарационной части СПП-500-1: 1 – входная камера; 2 – дырчатый лист; 3 – лунки; 4 – отверстия для отвода сепарата от перфорированного листа, 6 шт.; 5 – отвод влаги от стенок входной камеры; 6 – отверстия отвода сепарата во внешний кольцевой коллектор, 6 шт.; 7 – сепарационные блоки; 8 – входной дырчатый лист сепарационного блока; 9 – отверстия для отвода сепарата от сепарационных пакетов во внутренний кольцевой коллектор, 12 шт.; 10 – вход влажного пара из ЦВД; 11 – выход перегретого пара в ЦНД; 12 – отвод сепарата в сепараторосборник; 13 – подвод греющего пара второй ступени; 14 – модули первой ступени; 15 – модули второй ступени

Успех модернизации СПП-500-1 был в значительной части обусловлен созданием отдельного отвода влаги, осаждающейся на стенках входной камеры, отвода влаги со дна входной камеры через перфорированный лист, отверстия которого располагались в центрах сферических лунок. Снижение влажности пара на входе в сепарационные блоки и улучшение распределения потока по периметру СПП уменьшило нагрузку на жалюзи и обеспечило высокую эффективность осушения потока пара.

Результаты испытаний модернизированных СПП-500-1

Ниже представлены результаты испытаний модернизированных аппаратов СПП-500-1 турбоустановки № 7 четвертого блока Ленинградской АЭС, проведенные в мае–июне 2010 г. В ходе этих испытаний были получены данные по распределению по периметру аппарата влажности отсепарированного пара и его температуры в поворотной камере (после первой ступени перегрева), а также расхода сепарата нагреваемого пара и конденсата греющего пара первой ступени.

Определение влажности нагреваемого пара за сепарационными блоками. В ходе проведенных ранее работ по модернизации СПП была разработана и внедрена система определения влажности нагреваемого пара на выходе из сепарационных блоков с помощью дроссель-калориметра конструкции ОАО «НПО ЦКТИ». Ввод зондов для отбора влажного пара осуществлялся через люк-лаз, снабженный модернизированной крышкой.

Для определения искомой влажности пара использовался простой и удобный метод – дросселирование влажного пара из двухфазной области в область перегретого пара.

В ходе испытаний были определены значения влажности отсепарированного пара на четырех СПП-500-1 турбоустановки № 7. Для аппарата СПП-74 в таблице представлены результаты для двух серий опытов. Как видно из таблицы, имеет место соответствие результатов, полученных в I и II сериях испытаний (интервал – 25 дней).

	Значение влажности на определяемом участке					
	стенка	Е	D	B	C	низ C
I серия (05.2010 г.)	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7
II серия (06.2010 г.)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7
Среднее значение	0,6					
Проектное значение	0,5					

Таблица. Результаты определения влажности у отсепарированного пара СПП-74, %

Анализ полученных данных показывает, что распределение влаги по периметру аппарата во всех четырех СПП носит достаточно равномерный характер. Кроме того, определение влажности у одного из блоков (С) с помощью двух отборов, расположенных на различной высоте, также показало достаточно равномерное распределение влажности по высоте парового пространства.

По результатам проведенных испытаний среднее значение влажности на выходе из сепарационных блоков по всем четырем СПП составило около 0,5%, что близко к проектному значению.

Измерения температуры нагреваемого пара в поворотной камере. В рамках данного исследования для оценки работы сепарационных блоков и модулей пароперегревателей первой ступени по периметру корпуса поворотной камеры СПП были установлены термометры сопротивления с длиной защитной гильзы 400 мм. В СПП-71 и СПП-73 было установлено по четыре термометра сопротивления, а в СПП-72 и СПП-74 – по пять.

Пароперегреватель СПП-500-1 состоит из двух ступеней перегрева. Теплообменная поверхность выполнена из жесткотрубных теплообменников – модулей. Первая ступень перегревателя расположена в периферийной части поперечного сечения аппарата. Греющий пар раздается по пароперегревательным модулям от двух входных камер, расположенных на противоположных сторонах корпуса СПП. Из-за особенностей трассировки труб разводки длина отдельных труб различается в несколько раз, что приводит к разверке температур по периметру поворотной камеры и повреждению труб разводки и модулей первой ступени перегрева. На рис. 3 представлены данные по количеству заглушенных модулей СПП-74 перед планово-предупредительным ремонтом, во время которого проводилась модернизация. В первой ступени СПП-74 было заглушено 32% модулей.

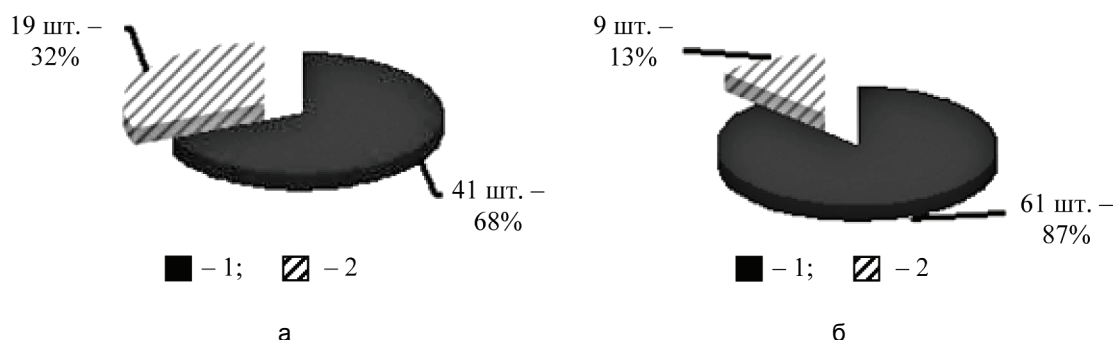


Рис. 3. Количество работающих (1) и заглушенных (2) модулей СПП-74: первая ступень (а), вторая ступень (б)

На рис. 4 приведены результаты измерения температуры t в поворотной камере СПП-74. Видно, что распределение температуры имеет два максимума. Это обстоятельство объясняется тем, что для групп модулей с более длинными линиями подвода расход греющего пара оказывается меньше, чем для коротких линий, и часть поверхности оказывается выключенной из теплообмена.

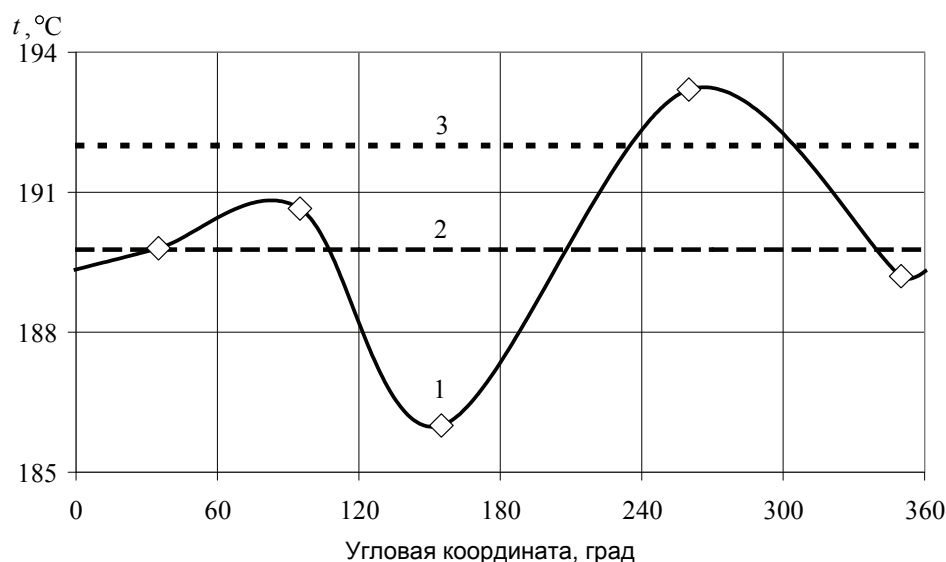


Рис. 4. Результаты измерения распределения температуры нагреваемого пара t в поворотной камере СПП-74: 1 – фактические значения температуры; 2 – среднее значение фактической температуры; 3 – проектное среднее значение температуры

Измерения расхода сепарата и конденсата греющего пара первой ступени. На СПП турбоустановки № 7 были проведены измерения расхода сепарата и конденсата греющего пара первой ступени с помощью ультразвукового расходомера РТ 878 фирмы GE Panametrics.

Перед каждым СПП установлен пленочный предсепаратор – дополнительное сепарационное устройство для отделения влаги со стенок трубопровода, подводящего нагреваемый пар к СПП. В ходе испытаний измерялись расходы сепарата на пленочных предсепараторах $G_{\text{пс}}$, результаты которых для предсепаратора СПП-74 приведены на рис. 5.

Испытания проводились на четвертом блоке Ленинградской АЭС группой специалистов ОАО «НПО ЦКТИ» (М.А. Готовский, М.Я. Беленький, М.А. Блинов, К.В. Соколов), Ленинградской АЭС (Г.А. Кайсин) с участием автора.

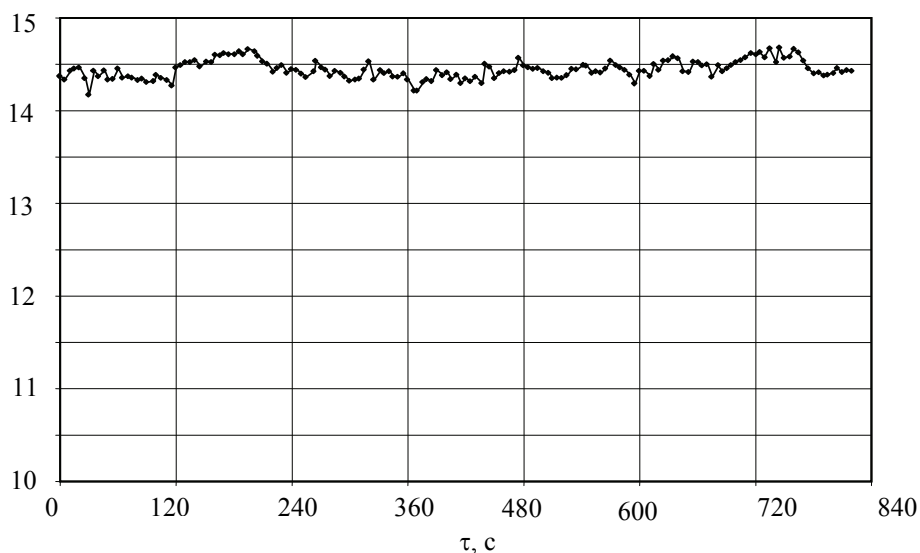


Рис. 5. Результаты измерения расхода сепарата предсепаратора СПП-74

Заключение

Анализ результатов выполненных промышленных испытаний модернизированных аппаратов, позволяет сделать следующие выводы.

1. В результате проведенной модернизации путем замены сепарационных блоков старой конструкции на блоки с жалюзийными пакетами «Powervane» и изменения схемы движения нагреваемого пара удалось устранить неравномерность влажности по периметру и высоте парового пространства за сепарационными блоками, доведя ее значения до величин, близких к проектным.

2. Система определения влажности отсепарированного пара по периметру парового пространства и замера температурных полей в поворотной камере позволила существенно увеличить объем получаемой информации и обеспечила возможность выполнения более детального анализа исследуемых процессов.
3. Результаты определения влажности показали, что проведенная модернизация позволила снизить неравномерность распределения влажности по периметру и высоте парового пространства за сепарационными блоками, так что все ее замеренные значения оказались близкими к проектным.
4. Результаты измерения температуры в поворотной камере показали, что распределение температуры обусловлено тем обстоятельством, что разные группы перегревателей модулей имеют различную длину линий подвода греющего пара.
5. Расчеты показывают, что одним из способов дальнейшего повышения температуры нагреваемого пара является шайбование труб подвода греющего пара, приводящее к выравниванию расходов.

Литература

1. Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. Совершенствование системы промежуточной сепарации и перегрева влажнопаровых турбин АЭС: анализ теплогидравлических процессов в конструкциях сепараторов-пароперегревателей на основе опыта эксплуатации // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 37. – С. 339–350.
2. Давиденко Н.Н., Соломеев В.А., Кругликов П.А. и др. Совершенствование технико-экономических показателей технологического оборудования действующих АЭС // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 14–16.

Егоров Михаил Юрьевич

– Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, аспирант, egorov12m2u@mail.ru

УДК 519.86

МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ НА ОСНОВЕ
СОЦИАЛЬНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ

А.И. Фетинина

На основе анализа социальных различий общества Кировской области выделено шесть страт, взаимодействие которых обеспечивает полное описание экономической сферы региона. Создана математическая модель, учитывающая социально-экономические предпочтения общества. Для идентификации модели удобно использовать параллельные вычисления. По идентифицированной модели сделаны первые прогнозы поведения и реакции каждой из страт и определены общие тенденции развития.

Ключевые слова: социальная стратификация, динамическая модель, развивающаяся экономика, идентификация, параллельные вычисления, валовой региональный продукт, прогноз.

Введение

Настоящая работа находится на стыке двух различных научных дисциплин: 1) математического моделирования социальных и экономических процессов; 2) параллельных алгоритмов. Связь этих дисциплин проявляется в процессе идентификации параметров модели, а также при построении модели, структура которой облегчает процесс идентификации. Исследование методов построения и идентификации моделей экономических систем, учитывающих социальную стратификацию, начатое в [1], развивается здесь в направлении математического моделирования региональной экономики переходного периода.

Имеющаяся литература по упомянутым научным дисциплинам обширна, ограничимся только упоминанием работ, оказавших влияние на исследование. Теория региональной экономики и ее основные понятия представлены в [2]. О проблемах моделирования экономики переходного периода говорится в монографии [3], где дано описание модели региональной экономики, основанной на системном анализе развивающейся экономики. Модели региональной экономики, основанные на описании динамики материальных и финансовых балансов, представлены в [4–5]. Социальная стратификация современного российского общества и ее динамика обсуждаются в [6]. Ключевые проблемы параллельных вычислений, включая методы параллельного программирования для кластерных суперкомпьютеров, представлены в [7].

Построенная в работе математическая модель региональной экономики, как и модель [1], основана непосредственно на учете социальной стратификации, однако здесь, в отличие от [1], страты связываются с отраслями региональной экономики. Такое дополнение модели привело к сокращению числа страт до шести. Связывание страт с отраслями экономики полезно отчасти потому, что позволяет более точно и по отдельности идентифицировать экономические параметры каждой из выделенных страт.

Верхний слой включает реально правящий слой, к которому относятся элитные и субэлитные группы, занимающие наиболее важные позиции в системе государственного управления, в экономических и силовых структурах. Средний слой сегодня целесообразно рассматривать как протослой, из которого в будущем сформируется полноценный средний слой в западном понимании этого термина. В него входят такие социальные группы, как мелкие предприниматели, менеджеры средних и небольших предприятий, среднее звено бюрократии, старшие офицеры, наиболее квалифицированные и дееспособные специалисты и рабочие. Базовый социальный слой охватывает более двух третей российского общества. Его представители обладают средним профессионально-квалификационным потенциалом и относительно ограниченным трудовым потенциалом. Нижний слой замыкает основную, социализированную часть общества. Отличительными чертами его представителей являются низкий деятельностный потенциал и неспособность адаптироваться к жестким социально-экономическим условиям переходного периода.

Использование параллельных вычислений позволяет за приемлемое время оценить параметры математических моделей сложных социально-экономических систем. Количество параметров, не имеющих статистических аналогов, в описываемой модели очень высоко, что обуславливает необходимость применения высокопроизводительных вычислений. В работе на базе статистики Кировской области решается задача определения параметров новой региональной модели, описывающей взаимодействие экономических, социальных и демографических процессов на основе социальной стратификации.

Постановка задачи

Модель региональной экономики строится на основе выделения социальных страт, связанных с определенными секторами региональной экономики. Предполагается, что каждая страта производит добавленную стоимость в соответствующем секторе экономики, а взаимодействие страт и секторов экономики сводится в модели к перераспределению добавленной стоимости.

В экономике Кировской области выделим ведущие секторы:

- отрасль сферы управления;
- промышленность (в том числе химическая и биохимическая, а также информационные технологии);
- отрасли торговли, связи, транспорта и сервиса, включая финансовые;
- образовательная сфера (в нее объединены три сферы – наука, культура и образование);
- отрасль сельского хозяйства;
- теневая экономика.

Этим секторам соответствуют следующие страты:

1. властные структуры области, элита (элитные группы в управлении, политике, экономике (крупные предприниматели, СЕО, олигархи), силовых структурах), менеджеры (предприниматели, управляющие среднего звена, старшие офицеры, высококвалифицированные специалисты, новые русские);
2. глобалисты (участники глобальных международных рынков, программисты, off-shore работники, которые легко перемещаются по странам мира), работники массовых профессий (офисные служащие, работники добывающих и перерабатывающих предприятий);
3. работники торговли и сервиса (персонал торговли и общественного питания, финансового и страхового сервиса);
4. интеллигенция – работники науки, образования, медицины и культуры;
5. работники натуральных хозяйств (сельскохозяйственные работники, кустари, самозанятые), неработающие пенсионеры, безработные, беженцы;
6. социальное дно (преступники, пьяницы, наркоманы, бродяги, бомжи и прочий андеграунд).

Между описанными социальными стратами и секторами экономики существует движение материальных и финансовых потоков. При идентификации модели вначале оцениваются параметры каждой страты-сектора отдельно друг от друга. Естественная декомпозиция модели по стратам позволяет снизить время расчета параметров до приемлемого уровня.

Математическая модель

Дадим математическое описание образования добавленной стоимости внутри каждой страты по схеме [1] с учетом специфики региональной модели, в частности, количества страт и их специализации. Для простоты предполагаем, что инфляция описывается заданным извне региона дефлятором валового регионального продукта $p(t)$, а все остальные макропоказатели фиксированного года t описываем после дефлирования на этот единый в модели индекс цен.

Стоимость $y_i(t)$, добавленная в году t к региональному валовому продукту стратой i ($i = 1, \dots, 6$), определяется численностью занятых в экономике людей страты $L_i^E(t)$ и их производительностью труда $u_i(t)$ – нормой выхода добавленной стоимости на единицу живого труда:

$$y_i(t) = u_i(t) L_i^E(t).$$

Производительность труда $u_i(t)$ в страте i зависит от среднего оборотного капитала $k_i(t)$ в ней и среднего уровня образования $o_i(t)$ [1]:

$$u_i(t) = u_i(k_i(t), o_i(t)). \quad (1)$$

Численность занятых в экономике людей $L_i^E(t)$ страты i определяется ее человеческим потенциалом – численностью людей трудоспособного возраста $L_i^T(t)$, принадлежащим данной страте:

$$L_i^E(t) = v_i(t) L_i^T(t), \quad L_i^T(t) = \sum_{a=18}^{65} l_i(t, a).$$

Здесь $v_i(t) \in (0, 1)$ – доля трудоспособных лиц, занятых в экономике, а $l_i(t, a)$ – численность населения возраста a в i -ой страте.

Пусть q_i – доля теневых доходов в i -ой страте; n_i – уровень налогообложения в ней (налогообложение доходов разных страт различно в силу принятой в России регрессионной шкалы); m_i – уровень собираемости штрафов за уклонение от налогов. Тогда $q_i y_i(t)$ – теневые доходы; $(1 - q_i) y_i(t)$ – легальные доходы; $n_i (1 - q_i) y_i(t)$ – налоговые отчисления, а $m_i q_i y_i(t)$ – штрафные санкции с i -ой страты. Налоговые отчисления и штрафные санкции поступают в консолидированный бюджет региона, образуя доходы бюджета, которыми распоряжается элита – страта 1. Элита формирует расходы бюджета, осуществляя трансферты во все страты. Доходы консолидированного бюджета $D(t)$ и его расходы $R(t)$ определяются соотношениями

$$D(t) = \sum_{i=1}^6 (n_i - (n_i - m_i) q_i) y_i(t), \quad R(t) = \sum_{i=1}^6 b_i D(t),$$

где b_i – доля доходов бюджета, идущая страте i . Заметим, что $\sum_{i=1}^6 b_i = 1$ в редком случае сбалансированно-

го консолидированного регионального бюджета.

Для замыкания модели формирования доходов страт будем считать, что коррупционные доходы $C_1(t)$ части элиты пропорциональны числу чиновников, определяемых числом занятых в экономике лиц первой страты $L_1^E(t)$, а коррупционные расходы других страт ограничены их теневыми доходами:

$$C_1(t) = r_1(t)L_1^E(t) + \sum_{i=2}^6 \min(r_i(t)L_1^E(t), (1-m_i)q_i y_i),$$

где $r_i(t)$ – норма прибыли на одного занятого в экономике члена первого слоя, включая взятки, для страты i . Теперь можно определить реальные располагаемые доходы страт $d_i(t)$ после налогообложения, штрафных санкций и бюджетных трансфертов:

$$d_1(t) = C_1(t) - r_1(t)L_1^E(t) + b_1 D(t) + (1-n_1 + (n_1 - m_1)q_1)y_1(t),$$

$$d_i(t) = b_i D(t) + (1-n_i + (n_i - m_i)q_i)y_i(t), \quad (i = 2, \dots, 6).$$

Средние доходы страт $\delta_i(t) = d_i(t)/L_i(t)$ определяют не только их положение в обществе, но также их демографические показатели [1] и показатели $k_i(t)$, $o_i(t)$ производительности труда (1). Последние представлены здесь соотношениями

$$k_i(t) = \kappa_i \delta_i(t), \quad o_i(t) = \rho_i \sum_{a=0}^{A_i} \delta_i(t-a),$$

где κ_i, ρ_i – положительные константы; A_i – средний возраст обучения в данной i -й страте. При этом в качестве функции (1) возьмем производственную функцию леонтьевского типа: $u_i(k_i(t), o_i(t)) = \min(k_i(t), o_i(t))$.

Динамику населения в каждой страте описываем подобно [1]. В каждый момент времени t численность населения страты i , имеющей возраст a , определяется ее численностью в предыдущий момент времени и силой смертности $\mu_i(t, a)$:

$$l_i(t, a) = (1 - \mu_i(t, a))l_i(t-1, a-1).$$

Зависимость силы смертности от социальных и биологических параметров будем описывать по формуле, подобной формуле Гомперца–Мейкема:

$$\mu_i(t, a) = \min(1, \sigma_i(t) + \eta \exp(\gamma a)),$$

где положительные параметры η, γ описывают биологическую, а $\sigma_i(t)$ – социальную составляющую смертности. Социальная составляющая смертности зависит от страты и уровня ее текущих доходов. Если уровень доходов превысит некий минимальный уровень δ_i^0 , то социальная составляющая смертности начинает снижаться. Опишем здесь эту зависимость функцией [1]

$$\sigma_i(t) = \xi_i \exp(-\lambda_i (\delta_i(t) - \delta_i^0)_+),$$

где ξ_i – максимальный уровень социальной смертности. Здесь и далее используется обозначение $x_+ = \max(0, x)$. Это означает, что социальная составляющая силы смертности падает только тогда, когда этот уровень превысит заданную величину δ_i^0 .

Численность новорожденных в страте i определяется коэффициентами рождаемости, которые также зависят от уровня доходов. Здесь для простоты описания эту зависимость представим с помощью коэффициента рождаемости и численности населения в детородном возрасте:

$$l_i(t, 0) = \beta_i(t) \sum_{a=15}^{50} l_i(t, a),$$

где функция рождаемости зависит от текущего среднего дохода и некоторого уровня дохода δ_i^1 ,

$$\beta_i(t) = \chi_i \exp(\theta_i (\delta_i(t) - \delta_i^1)_+).$$

Перемещение населения между стратами, связанное с получением образования, в модели пока не учитываем, т.е. рассматриваем крайнюю ситуацию полностью закрытых «социальных лифтов».

На основании полученных данных по имеющимся материально-сервисным и соответствующим им финансовым потокам определяем валовой региональный продукт (ВРП) Кировской области как сумму первоначальных доходов отдельных ее отраслей-страт, исключив при этом добавленную стоимость по нерыночным коллективным услугам (оборона, государственное управление):

$$Y(t) = \sum_{i=1}^6 y_i(t).$$

В качестве задачи исследования выделим определение параметров модели и реального ВРП области, включающего не только официальные статистические данные, но и теневой доход каждой сферы.

Результаты идентификации модели

Параметры каждой страты определены косвенным образом при сравнении результатов расчета по модели с данными региональной статистики на 2000–2009 г.г. по выпускам секторов и ВРП. Близость статистических $X(t)$ и расчетных $Y(t)$ данных сравнивалась по критерию неравенства Тейла для временных рядов с 2000 г. по 2009 г.:

$$T = \sqrt{\sum_t (X(t) - Y(t))^2 / \sum_t (X^2(t) + Y^2(t))}.$$

Необходимо было идентифицировать 108 параметров модели: 48 экономических – $v_i, r_i, q_i, b_i, k_i, \rho_i, n_i, m_i$ ($i = 1, \dots, 6$), 54 демографических – $\eta, \gamma, \xi_i, \lambda_i, \delta_i^0, \beta_i(t), \chi_i, \theta_i, \delta_i^1$ ($i = 1, \dots, 6$), а также 6 параметров, определяющих долю каждой страты в численности населения. Оценка значений параметров проводилась на базе экспертных общероссийских оценок [1] путем декомпозиции по стратам. При переборе вариантов значений параметров на заданных интервалах их изменений применялись параллельные вычисления.

Полученные значения демографических параметров таковы: $\xi = 0,013$; $\lambda = 0,015$; $\eta = 0,00002$;

$\gamma = 0,1$; $\delta_i^0 = \delta_i^1 = \delta_i$; $\chi = 0,015$; $\beta = 0,1$; $\theta_1 = 0,001$; $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4 = \theta_5 = 0,01$; $\theta_6 = 0,02$; $\delta_1 = 300$; $\delta_2 = 80$; $\delta_3 = 60$; $\delta_4 = 40$; $\delta_5 = 30$.

Полученные значения экономических параметров приводятся для $i=1, \dots, 6$:

- штрафные санкции $m_i = 0$,
- уровень налогообложения $n_i = 0,22$.
- доли населения по стратам от суммарного $\alpha = (0,03; 0,15; 0,2; 0,25; 0,27; 0,1)$.
- доли теневых доходов по стратам $q = (0,8; 0,5; 0,5; 0,2; 0,3; 0,8)$.
- показатель влияния образования на доход $\rho = (9,0; 1,5; 0,5; 5,0; 0,5; 0,4)$. При оценке использованы экспертные показатели числа лет обучения $A = (20; 17; 15; 17; 10; 7)$, доли занятых в экономике $v = (0,6; 0,6; 0,6; 0,6; 0,6; 0,3)$, бюджетные трансферты $b = (0,3; 0,05; 0,05; 0,3; 0,28; 0,02)$.
- параметры коррумпированности $r = (0,3; 0,05; 0,05; 0,3; 0,28; 0,02)$.
- коэффициент оборотного капитала в доходах страт $k = (0,7; 1,1; 1,12; 0,98; 1,14; 0,94)$.

Коэффициент несовпадения Тейла для ВРП статистического и расчетного составил 0,0383, что говорит о достаточно высокой степени совпадения временных рядов.

Полученные оценки параметров можно использовать в дальнейшей работе, например, изучая взаимодействие страт.

Заключение

В работе идентифицирована модель региональной экономики Кировской области, построенная на основе социальной стратификации с учетом связи страт и секторов экономики. Удалось достичь хорошего совпадения модели с реальными статистическими данными. Идентифицированная модель может использоваться для оценки различных сценариев развития региональной экономики, включая оценку того, кто и как прореагирует на сценарий модернизации, а также оценку динамики неравенства.

Использование суперкомпьютера ВятГУ позволило получить более точную оценку параметров и, как следствие, более реалистичные оценки динамики макропоказателей экономики. Уточнение значений параметров будет сделано при учете переходов между стратами. При этом планируется использовать методы глобальной оптимизации, разрабатываемые в Вычислительном центре им. А.А. Дородницына РАН и в Нижегородском государственном университете.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 10-01-90723-моб_ст, 11-01-90724-моб_ст, 11-07-97017-р_поволжье_а). Автор благодарит научного руководителя Н.Н. Оленева за помощь в работе.

Литература

1. Оленев Н.Н. Параллельные вычисления в моделировании российской экономики с учетом социальной стратификации // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ-2010): Труды межд. науч. конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – С. 276–286.
2. Гранберг А.Г. Основы региональной экономики. – М.: ГУ ВШЭ, 2006. – 496 с.
3. Автухович Э.В., Гуриев С.М., Оленев Н.Н., Петров А.А., Поспелов И.Г., Шананин А.А., Чуканов С.В. Математическая модель экономики переходного периода. – М.: ВЦ РАН, 1999. – 143 с.

4. Оленев Н.Н., Фетинина А.И. Моделирование экономики Кировской области с применением технологий параллельного программирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 1 (65). – С. 108–113.
5. Оленев Н.Н., Стародубцева В.С. Исследование влияния теневого оборота на социально-экономическое положение в Республике Алтай // Региональная экономика: теория и практика. – 2008. – № 11 (68). – С. 32–37.
6. Заславская Т.И. Социальная структура современного российского общества // Общественные науки и современность. – 1997. – № 2. – С. 5–23.
7. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.

Фетинина Анна Игоревна

– Вятский государственный университет, аспирант, annafet87@rambler.ru

УДК 339.137.22

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ КАПИТАЛ – СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ В УСЛОВИЯХ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ О.В. Чернышева

Представлены основные результаты исследования интеллектуального капитала, используемого в хозяйственной деятельности предприятий в условиях инновационной экономики. Особое внимание уделено анализу влияния интеллектуального капитала на конкурентоспособность предприятия в целом.

Ключевые слова: интеллект, конкуренция, инновации, персонал, финансы.

Введение

Задачами исследования являются анализ процесса использования интеллектуального капитала, который оказывает значительное влияние на конкурентоспособность и эффективность деятельности предприятия, а также выработка предложений по совершенствованию использования данного вида капитала в условиях эволюционно развивающейся рыночной среды.

Взаимосвязь интеллектуального капитала, инноваций и кризисных явлений в экономике

Финансово-экономическое положение хозяйствующего субъекта в условиях современной сервисно-ориентированной экономики зависит от степени его инновационности, адаптивности к факторам внешней среды, модернизации, а также качества привлекаемого интеллектуального капитала. Главной составляющей успешной хозяйственной деятельности являются именно знания, опыт и навыки, т.е. интеллектуальный капитал. На современном этапе экономического развития состояние предприятия и эффективность его работы во многом зависят от количества и качества привлекаемых интеллектуальных ресурсов.

Россия по показателям инновационности во многом отстает от мировых лидеров. На протяжении многих лет отечественный бизнес был ориентирован на быстрое привлечение денег без ощутимых вложений в развитие. Развитие бизнеса носило экстенсивный характер. Интенсивный путь на тот момент был нерационален, требовал значительных временных затрат и финансовых вложений. Сырьевые ресурсы были основным источником для получения прибыли. Только спустя значительный промежуток времени со стороны бизнеса и власти были предприняты попытки переориентации на инновационное развитие страны. Одной из причин кризисов, происходящих в экономике России, стало фактическое отсутствие инноваций в экономике, наличие которых, в свою очередь, позволяет стабилизировать социально-экономическую ситуацию. Кризисы последних лет являются лишь закономерным следствием того, что на протяжении многих десятилетий в экономике России происходило поэтапное нарастание проблем в данной области [1].

Для повышения инновационности государства необходимо соблюдение ряда требований. Во-первых, необходима свобода перемещения квалифицированных кадров, а соответственно, необходима и финансовая поддержка разработок. Во-вторых, для развития творческого потенциала одаренной молодежи необходимо развитие целевого финансирования со стороны государства. На сегодняшний день большинство разработок не находят своего практического применения из-за невозможности их дальнейшего приобретения заинтересованными субъектами бизнеса. Как правило, образцы апробируются, но не применяются на практике из-за недостатка финансовых ресурсов. Иногда идея не может воплотиться в опытный образец по причине отсутствия материально-технической базы у предприятия. Значительное налоговое бремя также негативным образом сказывается на инновационном потенциале предприятия и перспективах его развития.

Роль инноваций для экономики страны в целом и предприятия, в частности, велика. Инновации позволяют снизить временные затраты на выполнение работ или услуг, высвободить дополнительные денежные средства, развивать предприятие по экстенсивному и интенсивному пути, модернизировать процессы, происходящие на предприятии, повысить степень информированности целевой аудитории.

Интеллектуальный капитал и эффективность работы предприятия

На современном этапе экономического развития все большую роль начинает играть продукт (результат) интеллектуальной деятельности человека. Трудовые ресурсы с высоким интеллектуальным потенциалом наиболее конкурентоспособны как на региональном, так и на мировом рынке труда. Для поддержания социальной стабильности и прогрессивного развития необходима модель развития предприятия, которая основана на привлечении высококвалифицированных кадров, научных работников, первоклассных менеджеров, экономистов. Совокупность интеллектуальных ресурсов формирует интеллектуальный потенциал страны в целом. Развитие экономики любой страны основано главным образом на интеллектуальном капитале. Для формирования кадрового потенциала с необходимыми характеристиками требуется грамотно выстроенная система стимулирования труда персонала с целью повышения их мотивации.

Внедрение результатов интеллектуальной собственности в деятельность хозяйствующего субъекта позволяет повысить его конкурентоспособность и стабилизировать положение, раскрыть его скрытые возможности. Предприятия, использующие в своей деятельности результаты интеллектуальной собственности, имеют большие возможности и перспективы развития по сравнению с другими участниками рынка. На сегодняшний день должное внимание интеллектуальной собственности уделяется только представителями крупного бизнеса. Представители малого бизнеса, особенно в торговле, практически не рассматривают интеллектуальную собственность как инструмент повышения своей конкурентоспособности. Таким образом, если объект интеллектуальной собственности пользуется спросом на рынке, то он является достаточно ценным активом в деятельности предприятия.

Типология интеллектуального капитала и его значение

К основным типам интеллектуального капитала относятся знание и познание.

Первый тип интеллектуального капитала позволяет принимать грамотные, обоснованные решения. Данный тип включает целый комплекс, состоящий из навыков, опыта, уровня и качества образования. Такой тип также подразумевает под собой навыки в использовании программ и программного обеспечения. Ценность товаров, изготовленных с привлечением интеллектуальной собственности, значительно повышается, а интеллектуальная собственность, в свою очередь, является одним из источников дохода предприятия, например, если оно реализует лицензии.

Ко второму типу интеллектуального капитала относят познание, или торговую марку. Приведенный тип включает имидж, репутацию, т.е. компоненты, которые мотивируют потребителя к покупке товара. Торговая марка формирует у покупателя лояльное отношение, настраивает приобрести любой товар под этой маркой. Также торговая марка позволяет привлечь желаемое внимание к товару и повысить эффективность продаж.

К процессу управления знаниями существует несколько подходов. Американский подход основан на том, что знания, труд и капитал выступают стратегическими источниками стабильного конкурентного положения предприятия. Основные прикладные направления в этом подходе связаны с процедурами сбора, распространения, вторичного использования, а также с измерением уже имеющихся кодированных информации и знаний.

Японский подход подразумевает то, что наиболее значимыми являются скрытые знания, которые заключены в личном опыте человека. Основная ставка здесь делается на создание новых знаний, которые в долгосрочном периоде являются источником для инноваций.

Европейский подход основан на том, что знания конструируются в зависимости от ситуации, от исторического, социо-материального и культурного контекста.

В китайском подходе отражены три составляющие управления знаниями: материально-технический аспект, управление процессом когнитивно-конструктивного приобретения знаний, управление общественно-политическими отношениями между обладающими знаниями [2].

В России на сегодняшний день только начинает происходить формирование правильного подхода к знаниям, которыми обладает человек. Лишь несколько лет назад стали действовать программы поддержки талантливых ученых. Работодатели также стали уделять внимание мотивации работников, стимулированию их труда, привлечению высококвалифицированных специалистов для обучения персонала предприятия. Такой подход позволит создать в России базу для формирования интеллектуального капитала с целью улучшения позиций отечественной экономики на мировом рынке.

Современное состояние системы повышения качества подготовки персонала и ее влияние на интеллектуальный потенциал предприятия

Для формирования кадрового потенциала во многих странах действует ряд программ, направленных на повышение качества подготовки персонала [3]. На сегодняшний день в России эта стратегия получила свое развитие на базе «Программы подготовки управленческих кадров» (Президентская программа). Программа действует на базе ведущих российских высших учебных заведений. Участие в отдельных модулях данной программы предполагает оценивание тех компетенций, которые были получе-

ны слушателями. Оценивание полученных когнитивных компетенций (знаний) происходит с использованием тестового материала. Оценивание функциональных компетенций (навыков и умений стратегического мышления) может быть осуществлено в результате решения разного вида кейсов или разработки стратегии развития деятельности непосредственно своего предприятия. Оценивание личностного потенциала производится самими участниками посредством заполнения форм, которые отражают такие составляющие, как лидерство, умение работать в команде, группе [4].

В рамках данной программы происходит разработка и реализация модели перспективной образовательной системы подготовки руководящих кадров для инновационного развития социально-экономической сферы. Данная программа направлена на формирование управленческих кадров, которые обладали бы соответствующими знаниями.

Источником кадрового потенциала является персонал. Кадровый потенциал, в свою очередь, состоит из личностного и профессионального потенциала организации. Личностный потенциал, как правило, состоит из нескольких составляющих. К ним относятся работоспособность, трудоспособность, дееспособность, социально-психологическая совместимость, инновационные способности, способность к взаимодействию в работе, коммуникативные способности, опытность, возможность самовыражения и проявления. Профессиональный потенциал, в свою очередь, состоит из образовательного (познавательные и интеллектуальные способности) и квалификационного (знания профессионального характера, навыки, умения) компонентов [5].

На современном предприятии должно систематически проводиться повышение квалификации персонала. Такие мероприятия могут проводиться как в самой компании, так и за ее пределами. Примером может послужить гипермаркет «Теорема» (г. Челябинск), в котором создан свой собственный обучающий центр. Подобные отделы и центры создаются и на предприятиях, имеющих другую специфику деятельности, например, в кредитных организациях. Такая методика повышения профессионального уровня и расширения компетенций позволяет использовать в практической деятельности последние новшества, соответствовать динамично изменяющейся нормативно-правовой базе, а также адаптироваться к эволюционирующей внешней среде.

Совокупность инноваций, внедренных на каждом отдельно взятом предприятии, отражает инновационность страны. По этой причине своевременные финансовые вложения в разработки обеспечат в будущем солидный инновационный потенциал страны и ведущие позиции на мировом рынке.

Заключение

На современном этапе экономического развития интеллектуальный капитал является одним из двигателей прогресса. Интеллектуальный капитал неразрывно связан с инновационными процессами в рамках предприятия, отрасли и даже государства в целом. Нацеленность на рост интеллектуального потенциала позволяет повысить конкурентные позиции предприятия на рынке и стабилизировать его положение.

Литература

1. Чернышева О.В., Мурашова С.В. Банкротство торговых предприятий: Научное издание. – СПб: СПбГЭИ, 2008. – 124 с.
2. Хватова Т.Ю., Игнатьева И.В. Управление знаниями как универсальная концепция: кросс-культурный аспект // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – Т. 1. – № 3. – 285 с.
3. Чернышева О.В. Совершенствование управления конкурентоспособностью торгового предприятия в условиях сервисно-ориентированной экономики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 5 (69). – С. 126–129.
4. Соловьева И.А. Подготовка управленческих кадров-лидеров и стратегов. Стратегическое управление организациями: проблемы и возможности современной экономики // Сборник научных трудов. Ч.1. – СПб: СПбГПУ, 2009. – 244 с.
5. Лаврентьев В.П. Кадровый потенциал как объект управления и условие стратегического развития организации // Сборник научных трудов. Ч.1. – СПб: СПбГПУ, 2009. – 244 с.

Чернышева Ольга Владимировна – Санкт-Петербургский торгово-экономический институт. ст. преподаватель, ov49@mail.ru

УДК 330.101.54

СИСТЕМНЫЙ КРИЗИС ЭКОНОМИКИ И НОВЫЙ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСКИХ СТРУКТУР**В.И. Подлесных**

Проанализированы системные причины кризиса экономики, его природа и причины. Показана неадекватность доминирующей организационно-управленческой доктрины содержанию системного кризиса и концепции устойчивого развития российской экономики. Обоснована необходимость новых подходов, методов, механизмов и моделей для разработки адекватной модернизационной политики. В качестве теоретических основ новой организационно-управленческой концепции устойчивого развития предпринимательских структур рассмотрен синтез положений теории организации и управления, экономической теории, теории технологических нововведений и синергетики. Рассматривается содержание, движущие силы и модель теории синергетического развития предпринимательских структур, ориентированной на синергетические технологии и формирование синергетических эффектов.

Ключевые слова: системный кризис, предпринимательская структура, организация, самоорганизация, управление, взаимосвязь механизмов управления и самоорганизации.

Введение

В условиях системного кризиса важнейшими задачами управления предпринимательскими структурами (ПС) с точки зрения повышения эффективности их работы являются:

- определение характера и содержания необходимых системных изменений;
- замена существующей организационно-управленческой парадигмы на синергетическую модель развития предпринимательских структур;
- разработка новых подходов, методов, механизмов и моделей взаимодействия всех участников бизнес-процессов.

Для России переход на новую экономическую парадигму – вопрос жизненной необходимости. Нужна стратегия, ориентированная на синергетические технологии, на получение синергетических эффектов.

Системный кризис экономики, его природа, характеристика и причины

За последние десять лет в России имели место два экономических кризиса – в 1998 г. и 2008 г. После каждого кризиса экономика страны в течение трех-четырех лет выходит на докризисный уровень развития. Потери России в ходе глобального экономического кризиса 2008–2009 г.г. – самые высокие среди 20 крупнейших стран мира и составляют 40% ВВП страны. При этом ухудшается структура экономики, происходит ее деиндустриализация и усиливается технологическое отставание. По показателям, характеризующим «качество жизни», Россия перешла с 33 (1990 г.) на 69 место.

Лежащие в основе доминирующего в экономике представления о том, что развитием движет конкуренция, привели человечество на грань биологической, климатической, экологической, экономической катастрофы и коллапса [1]. В начале 90-х г.г. Россия находилась в точке бифуркации. Необходимо было сделать выбор, подтолкнув развитие экономики в нужном направлении. И выбор был сделан в направлении либерализации экономики с ориентацией на принцип «рынок все отрегулирует». Правительство отказалось регулировать многие процессы в сторону экономического развития. Это привело к тому, что хаос стал не уменьшаться, а нарастать, что вернуло нашу экономику снова в точки бифуркаций (1998 г., 2008 г.). Высокое состояние хаоса потребовало значительного времени и больших затрат для возврата к упорядоченному состоянию. И мы снова оказались перед необходимостью искать выход из состояния тупика, хаоса, неупорядоченности в сторону упорядочения посредством новых подходов, методов, механизмов и моделей развития.

Все это свидетельствует о том, что экономика России за последние 20 лет находится в системном кризисе, который характеризуется следующими особенностями:

- усиливается технологическое отставание от передовых стран;
- экономика России невосприимчива к инновациям, к институтам развития, к саморазвитию на базе современных механизмов;
- имеет место деиндустриализация, стагнация и депрессия экономики;
- социально-экономическое развитие страны сопровождается сокращением численности населения, растущей безработицей, преступностью, коррупцией, деградацией экономики;
- проблемы стратегии, прогнозирования, эффективности развития и многие другие в условиях неопределенности и сложности, хаоса и глобальных кризисов не могут быть описаны и объяснены традиционными теориями организации и управления.

С.Ю. Глазьев объяснил циклический характер развития экономики через смену технологических укладов. Системная причина кризиса 2008 г. состоит, во-первых, в том, что потенциал развития отраслей V технологического уклада, связанного с микроэлектроникой, компьютерами, программным обеспечением, телекоммуникациями был упущен в нашей стране, во-вторых, потенциал развития отраслей V тех-

нологического уклада в большой степени исчерпан, а отрасли появившегося VI уклада к вложению денег пока не готовы [2]. Ядро нового VI технологического уклада составляет трио – нано-, био- и инфотехнологии. Именно эти технологии и будут определять глобальное экономическое развитие в ближайшие десятилетия XXI в. Это прежде всего, наноэлектроника, молекулярная и нанофотоника, наноматериалы, в том числе оптические, нанотехнологии, технологии виртуальной реальности, робототехника, новая медицина, новое природопользование. Таким образом, кризис – это период, когда в развитии технологического уклада произошли принципиальные количественные и качественные изменения, а в предпринимательских структурах адекватные процессные и структурные сдвиги не произведены в силу ряда причин.

Для понимания природы кризиса необходимо рассмотреть характер и содержание системных изменений, которые необходимо провести в данной предпринимательской структуре. В первую очередь эти изменения должны произойти в отношении процессных и структурных сдвигов по следующим направлениям: техническим, технологическим, организационным, управленческим, экономическим и социальным.

Главная причина кризисов 1998 г. и 2008 г. заключается в том, что нам не удалось подойти к разработке антикризисных мер системно, с ориентацией на долгосрочную перспективу. Кризисы, с которыми мы столкнулись – это, прежде всего, системные, структурные кризисы, которые предполагают комплексность и инновационность модернизационных усилий на всех уровнях управления экономикой. Только в этом случае можно получить устойчивые долгосрочные результаты.

Системный кризис развития экономики в последние 20 лет свидетельствует о неадекватности доминирующей организационно-управленческой доктрины. Ярким подтверждением такого положения является невосприимчивость экономики России к инновациям, институтам развития, к саморазвитию на базе современных подходов, методов и моделей, ее стагнация и депрессия. Все это требует поиска новых альтернатив эффективности развития как экономики в целом, так и составляющих ее предпринимательских структур. Следовательно, сам глобальный экономический кризис поставил перед экономической наукой вопрос о самодостаточности ее в своих теоретических основаниях.

Масштаб и глубина последних кризисов оказались для всех неожиданностью – эта катастрофа показала нам, что экономике угрожает опасность, непредусмотренная нашими прежними теориями. Кризис экономики – это, по сути, кризис умственного развития человечества, который начинается с кризиса знаний. Отсюда следует вывод о том, что для освобождения от традиционных, консервативных концепций в экономическую науку необходимо ввести новые понятия, сформулировать новые подходы, методы, модели и механизмы, позволяющие лучше отобразить и понять изменяющуюся реальность с ее возрастающими рисками, энтропией, неопределенностью, которые бы обеспечили системное единство технологических, экономических и социальных процессов организации, управления и самоорганизации.

Теория синергетического развития – новый методологический подход к развитию предпринимательских структур

В июне 2004 г. в Москве, на прошедшей Первой международной научно-практической конференции с участием ведущих специалистов по самоорганизации и синергетике «Стратегия динамического развития России: единство самоорганизации и управления», синергетика названа тем наиболее перспективным методологическим подходом, овладение которым рассматривается как наиболее инновационное направление в науке, как средство вывода России на передовые позиции.

Синергетика исходит из следующего мировоззренческого представления: «Мир – это постоянное развитие, вечная неустойчивость, а периоды стабилизации – лишь краткие моменты на этом пути» [3]. Экономическое развитие – это усложнение структуры системы, накопление количества, переход на новое качество, появление новых свойств и т.д. Более того, развитие не может пониматься как повышение устойчивости. Развитие – это постоянное изменение соотношений «устойчивость–неустойчивость», «стабильность–нестабильность». Синергетика уравнивает в статусе хаос и порядок, детерминизм и случайность, устойчивость и неустойчивость, стабильность и нестабильность. Синергетическая модель развития является на сегодняшний день наиболее обобщающей и наиболее эвристически плодотворной объяснительной моделью, описывающей взаимопереходы порядка и хаоса в эволюции систем, в том числе и предпринимательских структур.

Экономическая синергетика исходит из признания нелинейности, необратимости и неравновесности экономического развития любых систем, в том числе предпринимательских структур. Переходы слабых отклонений (флуктуации хаоса) в сильные (флуктуации инноваций) и критические отклонения от равновесия (флуктуации бифуркаций) обретают способность приводить систему в крайне неустойчивое состояние, переводить ее в новое качество и таким образом, создавать новые структуры. Так проявляется сущность развития через взаимодействие хаоса и порядка. Преобладающее состояние систем в условиях самоорганизационного развития – это трансформационные переходы слабых флуктуаций в сильные, с сильных в критические, критических в бифуркационные и катастрофические [3].

Синергетическая модель развития ориентируется на ускоренное развитие, прорыв через формирование в системах синергетических эффектов, на создание новых товаров, новых рынков, новой экономической среды. Умение формировать и реализовывать синергетические эффекты рассматривается в синергетическом менеджменте как высшая компетенция, которой должен обладать менеджер XXI в.

Устойчивое функционирование и развитие предпринимательских структур уже не может быть в достаточной мере объяснено сложившимися классическими представлениями о его природе. Наука переживает системно-парадигматический кризис. На смену существующей организационно-управленческой парадигме, которая показала свою несостоятельность в условиях ускоренного развития и особенно в условиях кризиса, приходит синергетическая парадигма, позволяющая объяснить такие сложные нелинейные процессы, как кризис, развитие, рецессии, синергетический эффект развития и т.д.

Равновесие и обратимость не являются законами всеобщего развития. Более того, сегодня мир устроен так, что неравновесие, необратимость – источники развития ПС. Технология синергетического развития – технология прорыва и нелинейного развития, в которой задачи управления решаются с ориентацией не на стабильность, консервацию устойчивости, а на создание внутрисистемных механизмов развития. Нелинейная синергетическая парадигма делает понимание траектории развития ПС в целом более полным и реалистичным. Она позволяет глубже проникать в природу развития ПС. Речь идет о том, что наряду с классическим представлением об экономическом (циклическом) развитии формируется принципиально новый подход к описанию неустойчивой, нелинейной динамики процессов, который получил название теории синергетического развития.

Синергетическое развитие определяется:

- нелинейностью бизнес-процессов;
- высоким темпом реализации инноваций;
- акцентом на приоритет самоорганизации;
- усилением взаимодействия управления и самоорганизации;
- ориентацией управления на формирование синергетических эффектов, обеспечивающих переход систем в новый ускоренный темп.

Движущими силами синергетического развития предпринимательских структур являются:

- ориентация на сотрудничество и интеграцию;
- переход на новую технику, формирование новой технологической основы;
- структурные преобразования;
- согласованное взаимодействие таких классических категорий, как организация, самоорганизация, самоуправление и управление, с ориентацией на взрывные синергетические эффекты;
- постоянная ориентация на инновации, обучение и ротацию персонала в целях создания творческих коллективов, способных к генерации новых идей;
- увеличение разнообразия числа элементов и связей между ними, усложнение отношений между элементами, перераспределение связей между ними;
- перераспределение мощностей отрицательной и положительной обратных связей с ориентацией на усиление роли положительной.

Теория синергетического развития – это универсальная теория развития, применимая к разным системам и открывающая для них новые возможности. В частности, открывается возможность исследовать не только эволюционные взаимодействия частей ПС, траектории ее развития, но и нелинейные синергетические эффекты, способные созидать и разрушать, ускорять и замедлять развитие [4].

Предпринимательские структуры в России нуждаются в ускоренном развитии. Ускоренное развитие возможно на базе формирования положительных синергетических эффектов по модели перехода с мягкого резонансного управления на модель самоорганизации. Ускоренное развитие ПС требует коллективных, согласованных действий на всех уровнях, т.е. синергетики. Для России переход на новую экономическую парадигму – вопрос жизненной необходимости. Отставание России от ведущих стран в экономическом развитии настолько велико, что нужны масштабные действия, основанные на смелой синергетической парадигме. Синергетика – это наука о развитии. Нужна стратегия, ориентированная на синергетические технологии, на получение синергетических эффектов, а не на прирост ВВП. Именно таким должен быть ответ России на отставание в развитии.

Заключение

Как уже отмечалось, главная причина кризисов 1998 г. и 2008 г. заключается в том, что нам не удалось подойти к разработке антикризисных мер системно, с ориентацией на долгосрочную перспективу. Кризисы, с которыми мы столкнулись, это, прежде всего, системные, структурные кризисы, которые предполагают комплексность и инновационность модернизационных усилий на всех уровнях управления экономикой. А это возможно только благодаря разработке новых методов, механизмов и моделей взаимодействия всех участников бизнес-процессов и реализации идей системно-синергетического подхода.

Литература

1. Кузнецов Б.Л. Синергетический менеджмент в машиностроении: Учебное пособие. – Набережные Челны: КамПИ, 2003. – 207 с.
2. Глазьев С.Ю. Теория долгосрочного технико-экономического развития. – М.: ВлаДар, 1993. – 30 с.
3. Кузнецов Б.Л. Моделирование синергетических систем в экономике. – Набережные Челны: КГИЭА, 2008. – 151 с.
4. Кузнецов Б.Л. Основы теории синергетического развития. – Набережные Челны: КГИЭА, 2007. – 217 с.

Подлесных Виктор Иванович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, профессор, mng@mail.ifmo.ru

УДК 338

ОСОБЕННОСТИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

О.А. Цуканова, А.С. Егорова

Выделены и исследованы основные этапы процесса стратегического управления предприятиями, проанализированы особенности стратегического управления для предприятий строительной отраслевой составляющей, которые необходимо учитывать при разработке стратегического плана развития на перспективный период. Предложены и конкретизированы основные виды стратегий, которые могут быть использованы при управлении хозяйственной деятельностью предприятий строительной отрасли с целью обеспечения высокорезультативной хозяйственной деятельности в долгосрочной перспективе в России.

Ключевые слова: SWOT-анализ, стратегический план, стратегическое управление, стратегия, строительное предприятие.

Введение

Значение стратегического управления, позволяющего предприятию выживать в конкурентной борьбе в долгосрочной перспективе, возросло в последние десятилетия. Авторы, которые разрабатывали идеи стратегического управления, такие как И. Ансофф, дают определения этому термину следующим образом: стратегическое управление – это такое управление, которое обеспечивает сложной организации сбалансированность и общее направление роста [1]. В 90-е г.г. XX столетия ученые-экономисты давали термину «стратегическое управление» более расширенные определения: стратегическое управление – это такое управление, которое, используя комбинацию методов конкуренции и организации бизнеса, направлено на удовлетворение клиентов, успешную конкуренцию и достижение глобальных целей организации [2]. При этом становится очевидным, что невозможно в рамках организации процесса стратегического управления выработать рекомендации для всех без исключения предприятий, и, таким образом, актуальным становится выявление особенностей стратегического управления для хозяйствующих субъектов различных отраслевых составляющих, учет которых необходим для разработки стратегического плана развития предприятия в условиях нестабильной внешней среды. Учет специфических особенностей функционирования предприятий отраслевой составляющей сферы строительства необходим для планирования комплексных мероприятий, направленных на достижение заданной результативности деятельности хозяйствующих субъектов, позволяющих организационно-правовым структурам своевременно адаптироваться к изменениям внешней среды, сохраняя при этом темпы экономического роста и занимаемое место на рынке услуг, определения той степени перспективного состояния функционирования объекта управления, при которой социально-экономическая система может сохранить обеспечение определенной результативности хозяйственной деятельности. Каждому предприятию необходимо выработать свою стратегию развития на долгосрочный период с учетом особенностей функционирования всей отрасли, применяя при этом те виды стратегий, которые наиболее уместны для хозяйствующих субъектов данной отраслевой составляющей.

Базовые положения стратегического управления предприятиями

В начале XXI века для того, чтобы эффективно функционировать и получать позитивные результаты деятельности в долгосрочном периоде времени, предприятия должны разрабатывать определенные стратегии развития, так как в современных условиях традиционные принципы и опыт управления хозяйствующими субъектами уже малоэффективны. Таким образом, стратегическое управление призвано обеспечить предприятию устойчивое положение на рынке даже в условиях жесткой конкуренции и динамично меняющейся внешней среды.

Ускорение изменений в окружающей среде, появление новых запросов и изменение позиций потребителей, рост конкуренции на рынке, глобализация бизнеса, появление новых возможностей для ведения хозяйственной деятельности с учетом достижений науки и техники, развитие информационных сетей, широкая доступность современных технологий, изменение роли человеческих ресурсов, а также ряд других причин привели к возрастанию значения стратегического управления.

В настоящее время рынок строительной продукции в России характеризуется достаточно высоким уровнем неопределенности, что угрожает устойчивости конкурентных позиций строительных организаций. Основопологающим фактором для освоения, удержания и завоевания позиций на рынке строительных услуг является правильное определение маркетинговой стратегии и разработка стратегического плана развития строительного предприятия [3].

Процесс разработки стратегического плана развития строительного предприятия включает в себя следующие этапы:

- определение особенностей стратегической ориентации хозяйствующего субъекта (стратегическое видение, миссия, цели);
- анализ внешней и внутренней среды;
- разработка комплекса стратегий с последующей детализацией каждой стратегии до уровня «цель – задачи – мероприятия»;
- оценка выбранных стратегий, детализация стратегий и входящих в них мероприятий до уровня планов действий подразделений и конкретных исполнителей, финансовое обоснование выбранных стратегий;
- контроль над реализацией стратегий и оценка их результативности и эффективности [4].

Процедурно-технологическим элементом формирования механизма стратегического управления является разработка ведущими менеджерами стратегического видения развития предприятия в долгосрочном периоде времени. Миссия выступает рационализирующим элементом в механизме перспективного развития предприятия и является его процедурно-технологической составляющей в условиях нестабильной внешней среды и ужесточающейся конкуренции [5].

Предназначение (миссия) строительного хозяйствующего субъекта может быть сформулировано как «предоставление организациям и частным лицам на территории определенного региона строительномонтажных услуг промышленного и городского строительства в нужном объеме, в точные сроки, в требуемом виде».

Процедура формулирования и принятия стратегии состоит из следующих этапов:

- оценка существующей стратегии;
- фаза формулирования стратегии;
- планирование риска;
- выбор стратегических альтернатив [4].

Оценка существующей (действующей) стратегии производится с точки зрения ее соответствия динамично меняющимся условиям внешней среды и обеспечения заданной результативности деятельности предприятия. Если принятая стратегия не обеспечивает заданной эффективности деятельности предприятия, то необходимо формулирование новой стратегии.

Учет и оценка риска, основными целями которых является поддержание высокого уровня противодействия возмущениям внешней среды и уменьшение потерь от негативных воздействий, являются одной из важных составляющих стратегического плана.

В рамках выбранной базовой стратегии возможно несколько курсов действий, которые допустимо называть стратегическими альтернативами.

Разработка стратегии должна затрагивать все уровни управления предприятием, так как решения, вырабатываемые при стратегическом управлении, имеют отношение ко всем сотрудникам организации. При этом групповое обсуждение позволяет рассмотреть большое число альтернатив и оценить их уместность в сложившихся условиях.

Анализ внешней среды для строительных предприятий

Анализ внешней среды и внутренних возможностей предприятия целесообразно проводить с помощью методологии SWOT-анализа. Наиболее значимые сильные стороны предприятия должны стать основой стратегии и сводить к минимуму отрицательное воздействие слабых сторон. Сильными сторонами строительных предприятий могут быть хорошая репутация, мощная проектно-конструкторская база, наличие квалифицированных специалистов.

К слабым сторонам можно отнести: отсутствие четких стратегических направлений деятельности, нехватку строительной техники, устаревшее оборудование, отставание по качеству товаров, высокую себестоимость выпускаемой продукции, наличие значительной дебиторской задолженности, высокий уровень налогов.

Основную угрозу для строительных предприятий составляет вероятность появления новых конкурентов, усиление конкурентного давления со стороны существующих производителей строительных услуг, нестабильность социально-экономической ситуации в стране. К возможностям можно отнести выход на новые рынки, диверсификацию строительной продукции, привлечение иностранных инвесторов, получение госзаказов, льготное налогообложение, снижение цен на сырье, государственную поддержку [6]. Результатом исследования внутренней и внешней среды предприятия является система возможных действий, направленных на усиление конкурентных позиций предприятия и его развития.

Таким образом, для успешного функционирования в условиях конкуренции и получения позитивных результатов деятельности строительному хозяйствующему субъекту при разработке стратегии развития необходимо опираться на свои сильные стороны, нейтрализовывать слабые, учитывая при этом раскрывающиеся возможности и угрозы внешней среды. Минимизация угроз и рациональное использование раскрывающихся возможностей перед предприятием должны быть реализованы с учетом ключевых факторов успеха для данной организационно-правовой структуры.

Стратегии развития хозяйствующих субъектов по результатам SWOT-анализа могут быть разработаны на основе использования парной комбинации внутренних и внешних факторов, таких как силы–возможности; силы–угрозы; слабости–возможности; слабости–угрозы. Таким образом, в результате анализа факторов и использовании механизма SWOT-анализа возможно формирование набора стратегий с ориентацией на слабости–угрозы (mini – mini); силы–угрозы (maxi – mini); слабости–возможности (mini – maxi); силы–возможности (maxi – mini).

Основная цель стратегий с ориентацией на слабости–угрозы – максимально нивелировать слабые стороны хозяйствующего субъекта и наилучшим образом приспособиться к ведению хозяйственной деятельности в условиях негативного воздействия внешних факторов и тенденций социального, экономического, финансового характера. Такой набор стратегий на современном этапе развития в условиях финансового кризиса в России целесообразно использовать предприятиям, не являющимся лидерами в своей отрасли, претерпевающим снижение финансовой и стратегической результативности в нестабильной внешней среде, текучесть кадров, рост затрат на продукцию и услуги.

Стратегии с ориентацией на силы–угрозы направлены на максимальное использование сил и компетенций организационно-правовой структуры и обеспечение ее развития при негативных воздействиях внешней среды. Такая группа стратегий также уместна в условиях кризиса в России и в большей степени подходит для лидирующих в отрасли производителей.

Стратегии с ориентацией на слабости–возможности нацелены на улучшение слабых сторон конкретного предприятия и максимальное использование раскрывающихся перед продуцентом услуг возможностей.

Стратегии с ориентацией на силы–возможности подразумевают максимальное использование как сильных сторон хозяйствующего субъекта, так и раскрывающихся возможностей. Данная группа стратегий приводит к максимальной результативности хозяйственной деятельности в перспективном периоде, но в ряде случаев не вполне подходит для предприятий, имеющих больше слабых сторон, чем сильных, а также в условиях сильного негативного воздействия факторов внешней среды, когда первоочередными задачами предприятия становятся обеспечение выживаемости и поддержание финансовой результативности деятельности на минимально приемлемом уровне рентабельности [5].

Особенности стратегий развития для строительных предприятий

Сформулированная на основе результатов SWOT-анализа стратегия развития может быть использована для разработки стратегических проектов. В общем случае перед строительным предприятием стоят следующие основные стратегические альтернативы: ограниченный рост, рост, сокращение, а также сочетание этих стратегий.

Стратегии ограниченного роста придерживается большинство строительных организаций в развитых странах.

К стратегии сокращения прибегают чаще всего в том случае, когда показатели деятельности компании продолжают ухудшаться, при экономическом спаде или просто для спасения организации.

Стратегии сочетания всех альтернатив придерживаются крупные строительные фирмы, активно действующие в нескольких отраслях [7].

Выбрав определенную стратегическую альтернативу, руководство должно обратиться к конкретной стратегии. Основная цель – выбор стратегической альтернативы, которая максимально повысит долгосрочную эффективность организации. Для этого руководители должны иметь четкую, разделяемую всеми концепцию развития предприятия на долгосрочную перспективу. Приверженность какому-либо конкретному выбору зачастую ограничивает будущую стратегию, поэтому решение должно подвергаться тщательному исследованию и оценке. На стратегический выбор влияют такие факторы, как риск (фактор жизни фирмы), знание прошлых стратегий, реакция владельцев акций, которые зачастую ограничивают гибкость руководства при выборе стратегии, фактор времени, зависящий от выбора нужного момента.

Также строительное предприятие может вырабатывать стратегию с учетом специфических характеристик своего товара. С данной точки зрения различают такие рыночные стратегии, как стратегия низких издержек, стратегия дифференциации, стратегия специализации.

Стратегия низких издержек принимается тогда, когда строительное предприятие обладает превосходством перед большинством ведущих конкурентов по уровню низких издержек строительства объектов, что позволяет ей реализовать объекты капитального строительства по пониженным ценам. Соответственно, предприятие предлагает всему отраслевому рынку объекты капитального строительства, не отличающиеся по своим характеристикам от аналогичных предложений конкурентов, за исключением одного фактора – более низкой цены. Известно, что сокращение срока строительства капитальных сооружений всего на несколько месяцев ведет к существенному снижению затрат (примерно на треть от стоимости самого объекта) и уменьшает срок окупаемости капитальных вложений [7].

Стратегии дифференциации целесообразно придерживаться, когда строительное предприятие обладает общеотраслевыми ключевыми факторами успеха и благодаря им занимает лидирующее положение среди других компаний. Предпочитая стратегию дифференциации, хозяйствующий субъект решает выделить предполагаемый на рынке тип объекта капитального строительства из совокупности других. При этом предприятие, как и при стратегии низких издержек, ориентируется на сбыт в масштабе всего отраслевого рынка. К числу факторов дифференциации могут относиться не только характеристики объекта, но и условия сбыта, при этом дифференциация может производиться по любому ключевому фактору успеха или по нескольким сразу, среди которых можно отметить уникальные технологии сооружения объекта, способы организации и планирования производственного процесса, значительную мощность предприятия, специфическую конструкцию продукции или изделия, сроки выполнения заказов, качество строительства.

При оптимальном использовании стратегий дифференциации у хозяйствующих субъектов расходы ниже, чем при реализации стратегий лидерства по издержкам в связи с тем, что любое снижение цен означает немедленное уменьшение прибыли. При хорошо спланированном комплексе мероприятий и использовании стратегий дифференциации эффективность и результативность будут зависеть не от уровня затрат, а от способности донести до клиентов предложения комплекса услуг, от идеи и формы подачи обращения, и, таким образом, повышение конкурентоспособности будет достигнуто без существенных дополнительных издержек [5].

Стратегия специализации принимается в случаях, когда строительная организационно-правовая структура не обладает преимуществом перед конкурентами ни в одном из ключевых факторов успеха или имеет преимущество в одном–двух ключевых факторах, но существенно отстает от конкурентов по другим факторам. Успех стратегии специализации зависит от большого числа факторов, поэтому компания, проводящая такую стратегию, должна особенно тщательно прогнозировать возможность проникновения на рынок конкурирующих фирм, обладающих теми же факторами успеха, но предлагающих к сооружению более совершенные объекты. Следует отметить, что стратегия узкой специализации во многом рассчитана на сравнительно короткое время, так как отставание по другим факторам может перекрыть преимущества, которые компания получает по одному из них [6, 7].

Стратегия рыночной специализации характеризуется тем, что из возможных сегментов рынка компания выбирает только один, достаточно узкий, состоящий из потребителей со специфическими запросами.

Таким образом, не существует единых универсальных рекомендаций для выбора стратегии для предприятий строительной отрасли. Хозяйственная деятельность каждой строительной фирмы обладает уникальными характеристиками и особенностями, поэтому и процесс выработки стратегического плана развития для каждого хозяйствующего субъекта индивидуален и зависит от внутренней корпоративной философии, позиции предприятия на рынке, рыночного потенциала, поведения ближайших конкурентов, характеристик оказываемых строительных услуг и ряда других факторов.

Заключение

В работе проанализированы особенности стратегического управления строительными предприятиями. Определены особенности стратегической ориентации хозяйствующих субъектов данной отраслевой составляющей, проанализированы основные факторы, оказывающие влияние на результативность достижения предприятиями целей и задач в долгосрочной перспективе, выделены обобщенные принципы выработки стратегий для строительных предприятий, конкретизированы и предложены для практического использования наиболее подходящие стратегии поведения организационно-правовых структур данной отраслевой составляющей на рынке в условиях негативно влияющих внешних факторов.

Литература

1. Ансофф И. Стратегическое управление. – М.: Экономика, 1989. – 519 с.

2. Томпсон А.А., Стрикленд Дж. Стратегический менеджмент. Концепции и ситуации. – М.: Инфра-М, 2000. – 924 с.
3. Цуканова О.А., Варзунов А.В. Концептуальные положения управления процессом повышения экономической результативности деятельности рекламно-издательского комплекса мегаполиса // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3 (67). – С. 107–113.
4. Дойль П. Маркетинг, менеджмент и стратегии. – СПб: Питер, 2007. – 542 с.
5. Цуканова О.А. Формирование системы стратегического управления социально-экономическим развитием продуцентов рекламно-издательских услуг в мегаполисе. – СПб: Издательство «Герда», 2010. – 188 с.
6. Каменецкий М.И. Строительный комплекс: анализ и оценка возможностей развития // Экономика строительства. – 2008. – № 4. – С. 56–59.
7. Гумба Х.М., Кузнецов Ф.Н., Степанов И.С. Экономика строительства. – М.: Юрайт-Издат, 2008. – 610 с.

Цуканова Ольга Анатольевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, доцент, zoa1999@mail.ru

Егорова Анна Сергеевна Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, byka35@yandex.ru

УДК 378:50

**ВОПРОСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ПРЕПОДАВАНИЯ
ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ ДИСЦИПЛИН НА ФАКУЛЬТЕТЕ
ОТКРЫТОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Н.В. Калачев, А.Н. Ланских

Описаны методы дистанционного преподавания естественнонаучных дисциплин (математики) на факультете открытого образования Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, приведено описание образовательного портала, обобщен опыт работы со студентами заочного и дистанционного отделений.

Ключевые слова: образовательный портал, преподавание естественнонаучных дисциплин, заочное и дистанционное отделения.

Введение

К настоящему времени можно сформулировать некоторые направления наиболее значимых, ожидаемых преобразований в образовательном процессе [1, 2]. Это переход к вариативному подходу к формам, методам подготовки, изменению отношения к формализации образовательных процедур, переход от линейного к открытому, нелинейному, расширяющемуся представлению содержания учебных дисциплин, изменение порядка и содержания взаимодействия вуза и профессионального сообщества.

Эти изменения во многом обусловлены переменами в характере труда, его разделении. Основным объектом и результатом труда в постиндустриальном обществе становится информация. Наглядно прослеживается тенденция повышения в структуре занятости людей, связанных с получением, хранением и обработкой информации. Стремительно развиваются информационно-коммуникационные технологии (ИКТ), обеспечивается возможность удаленного доступа к информационным ресурсам, возможность сотрудничества в различных распределенных сетевых сообществах. У человека радикальным образом изменяются традиционные представления о пространстве и времени, мир становится «плоским», пространство и время сжимаются. В дополнение следует признать возрастающий темп изменений во всех сферах жизни общества. Катализатором этих изменений служат ИКТ.

Наиболее отчетливо изменения в образовательном процессе прослеживаются в эволюции технологий дистанционного обучения (ДО) – от этапа «встраивания» компьютеров в традиционный образовательный процесс через этап количественного насыщения к этапу модернизации образовательного процесса инновационного типа на основе формирования информационно-образовательных систем (ИОС). Эти системы – не только и столько системы размещения и управления доступом к информации, они создают виртуальную среду сотрудничества участников образовательного процесса с элементами профессиональной работы на основе применения динамических тренажеров, имитирующих различные процессы профессиональной деятельности. В Финансовом университете при Правительстве РФ вопросы разработки, апробации и внедрения технологий ДО в образовательный процесс делегированы факультету открытого образования [3].

Особенности аппаратно-программного обеспечения технологий ДО

Организационно-технологическую основу информационных обучающих технологий составляет порталное решение, интегрирующее базы данных, обеспечивающие хранение, обновление и формализацию доступа обучаемых к учебным, информационно-справочным материалам. Администрирование совместной деятельности участников образовательного процесса осуществляется с помощью автоматизированной системы управления «Электронный деканат». Наряду с представлением учебной информации, возможности тестирования, формирования статистических данных, система ДО обеспечивает интерактивное общение студента и преподавателя.

В сравнении с традиционными порталными решениями дистанционных образовательных технологий (ДОТ), разработанный и реализованный на факультете открытого образования образовательный портал позволяет формировать виртуальную персонифицированную образовательную среду студента и преподавателя с возможностью организации групповой работы, в том числе работы проектного типа, учебной группы (12–25 студентов) и диалоговых форм общения различной конфигурации.

Виртуальная среда с персонифицированными кабинетами пользователей (студент, преподаватель, тьютор) позволяет формировать учебные, учебно-методические материалы, обеспечивающие индивидуализацию образовательной траектории. Создаются предпосылки для индивидуализации обучения в массовом образовательном процессе. Автоматизированная система управления «Электронный деканат»

получает набор подсистем для интеллектуального анализа (результаты решения тестовых задач, время и последовательность работы с текстовыми, презентационными и лекционными материалами, частота и типы ошибок, повторений и т.д.) результатов образовательной деятельности по типу систем бизнес-аналитики, придающих адаптивные возможности индивидуальным траекториям обучения.

Реализованное порталное решение проверено практикой образовательной деятельности в течение шести лет по четырем специальностям, шести специализациям и в течение двух лет по двум направлениям и четырем профилям подготовки бакалавров. Кроме того, оно позволило провести за четыре года повышение квалификации 105 000 государственных служащих. Это «живой», постоянно совершенствующийся аппаратно-программный комплекс.

Технология ДО ориентирована, в первую очередь, на проведение традиционных, понятных, удобных обучаемым занятий, проводимых виртуально, в форме видеоконференции, средствами Интернет-технологий. Одновременная передача видеоизображения, звука, слайдовой, графической информации, тона, мимики, эмоций от преподавателя к обучаемому и обратно создает эффект очного обучения и позволяет достичь результат, близкий к результату очного обучения.

В сравнении с традиционными образовательными технологиями, дистанционные технологии имеют ряд особых характеристик:

- разделение процессов преподавания и обучения во времени и пространстве;
- освоение обучаемым образовательных программ по месту жительства или профессиональной деятельности при доминанте самостоятельной работы, с периодическими встречами группы обучающихся;
- управление самостоятельной работой обучаемого средствами вуза, ведущего ДО посредством учебных планов, специальным образом подготовленных учебно-методических и учебных материалов и особых процедур контроля;
- обязательное применение коммуникационных технологий для передачи знаний, опосредованного, диалогового и интерактивного взаимодействия субъектов обучения и решения административных задач;
- организация, осуществляющая ДО, используя ИКТ, создает информационно-образовательную среду;
- ДО предполагает применение принципов индустриализации в обучении с элементами разделения труда преподавателя и соответствующей специализацией.

Наряду с обучением по программам первого и второго высшего образования, факультет открытого образования Финансового университета участвует в повышении квалификации государственных служащих с применением ДОТ. В этом процессе реализованы Интернет-технологии, кейс-технологии и комбинированные технологии, предполагающие сочетание элементов двух предыдущих технологий.

Важнейшими компонентами технологии ДО является интерактивное расписание занятий, это наше «ноу-хау». Интерактивное расписание интегрирует собственно расписание занятий с системой видеолекций, Интернет-семинаров, учебными и учебно-методическими материалами и системой тестирования на сервере Интернет-обучения. Это разновидность порталного решения, учитывающая специфику дополнительного профессионального образования. Всего в прошлом году факультет обеспечил повышение квалификации более 33 000 государственных служащих.

Методика преподавания

В ДО принято выделять две различные модели представления знаний (контента) обучаемым, это асинхронная модель и модель распределенной аудитории. Асинхронная модель предполагает, что преподавание и обучение происходят не только в разных местах, но и в разное время. В модели распределенной аудитории обучение происходит удаленно от преподавателя, но, одновременно, с применением технологий Интернет-видеоконференций. Современный Интернет позволяет обеспечить общение в реальном масштабе времени (Интернет-конференции, Skype и т.д.) и дискуссионные форумы, работающие асинхронно. В связи с этим современная модель ДО строится на интеграции асинхронной модели и модели распределенной аудитории и классифицируется как виртуальная аудитория [4].

К основным функциям преподавателя в ДО принято относить функцию разработки, доставки обучаемому контента; взаимодействия с обучаемым; оценки результатов обучения и консультирования, поддержки студентов. Разработка и доставка контента представляет собой структурированное, алгоритмированное, формализованное отражение сущности предмета, навыков специалиста в электронной форме, обеспечивающей результативную самостоятельную работу обучаемого. Интеграция образовательной деятельности педагога и обучаемого происходит на портале www.dofa.ru. Информационно-образовательный портал объединяет мини-порталы филиалов и представительств с базовыми элементами технологии ДО, позволяющими реализовать функции преподавателя по разработке и доставке контента, виртуальному общению субъектов образовательного процесса, оценке уровня подготовки обучаемого и консультационную работу, а также управляемую самостоятельную работу обучаемого.

Контент представляется обучаемому в форме электронного учебно-методического комплекса на оптическом диске и информационной части, размещенной на сервере Интернет-обучения. Обеспечивает работу преподавателя по созданию контента компьютерная программа «Электронный преподаватель 2.0», разработанная центром сетевых технологий факультета. Компьютерная обучающая программа позволяет объединить учебные, учебно-методические и справочные материалы, представленные в текстовой, графической форме в виде Интернет-текста, видео- и звуковых файлов с системами тестирования и статистики. Эта же программа позволяет управлять самостоятельной работой обучаемого на основе разрешения/запрещения доступа к информационным разделам в соответствии с графиком, разработанным преподавателем, фиксирования времени работы и результатов тестирования, направлять обучаемого на повторную работу с материалами темы или предоставлять ему заранее подготовленную «подсказку» преподавателя. Файл «статистика обучаемого» может предоставляться преподавателю по его запросу для последующей аналитической обработки.

Общение преподавателя и обучаемого обеспечивается использованием режима видеоконференций, программы «Форум», электронной доски объявлений и электронной почты.

Контроль результатов осуществляется при помощи сервера Интернет-обучения (подсистем тестирования) и самотестирования обучаемого с предоставлением результатов преподавателю, используя подсистему контроля электронного учебно-методического комплекса. Консультационная работа преподавателя осуществляется с использованием «Форума», электронной доски объявлений и электронной почты, как правило, в асинхронном режиме.

После отработки тем учебной дисциплины и виртуальной консультации преподавателя обучаемый выполняет контрольную работу и представляет ее по электронной почте преподавателю. Положительная оценка за выполненную контрольную работу является допуском к сдаче экзамена (зачета).

На факультете открытого образования Финансового университета в процессе преподавания естественнонаучных дисциплин (математики) используется система Интернет-тестирования, реализующая педагогическую концепцию оценивания как непрерывный процесс, позволяющий анализировать текущую работу субъектов учебной деятельности и проводить их коррекцию, т.е. получать необходимые данные для принятия управленческих решений. В цели проведения тестирования интегрируется ряд компонентов, таких как диагностический, формирующий (характеризующий деятельностный процесс), итоговый (количественная мера учебных достижений), позволяющих оценить трудности в обучении и удовлетворенность субъекта учебным процессом. Оценка как результат должна быть надежной (воспроизводимой при повторном измерении), валидной и с интерпретацией полученных баллов по нормирующему подходу. Индивидуальные тестовые задания имеют заданную сложность и предполагают выбор тестовых заданий случайным образом [5]. Полный протокол результатов тестирования содержит информацию о слушателе, наименование учебной дисциплины (учебной темы), название и номер каждого тестового задания, результаты его выполнения, окончательные характеристики прохождения теста – суммарный балл, процент набранных баллов, фактическое время прохождения теста. Кроме того, преподаватель может получить распечатку каждого тестового задания с указанием эталонного ответа и решения обучаемого.

Наряду с контролем результатов учебной деятельности студента, учебной группы, система имеет возможность описывать ход учебной работы студента путем формирования таблицы сводной активности обучаемого, отражающей данные об обращении слушателя к учебно-методическим материалам, о выполнении тестов, участии в консультациях, посылке сообщений и т.д. Статистическая отчетность актуализируется подсистемой создания и регистрации настраиваемых статистических отчетов. Форма отчетов и их содержание задаются администратором системы.

Таким образом, созданная на факультете открытого образования модель ДО реализует концепцию «виртуальная аудитория» в информационно-образовательной среде порталного типа, обеспечивающую совместную образовательную деятельность субъектов учебного процесса.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана создан аналогичный портал системы открытого образования «Инженер», одной из задач которого является организационно-техническая поддержка обучения с использованием ресурсов информационных технологий [6]. Аналогичная методика в течение последних нескольких лет используется в Тульском государственном университете на механико-математическом факультете [7].

Студенты, обучающиеся по заочной форме с применением ДОТ, вместо выполнения домашних заданий в бумажном или электронном виде (которые, как показывает опыт, не все они сами выполняют) сначала должны выполнить около 60 тренировочных заданий-тестов по теме занятия. Время для выполнения этих заданий-тестов неограниченно. Затем учащийся, если считает, что он готов выполнить зачетный тест, делает запрос на сервер факультета о своей готовности. В этом случае ему предоставляется возможность в течение двух часов провести зачетное тестирование по теме занятия. Система Интернет-тестирования осуществляет аналитическую обработку результатов тестирования учебной группы, готовит протоколы случайных и повторяющихся ошибок и вычисляет их частоту. Преподаватель выбирает инструмент педагогического воздействия в соответствии с представленной частотой ошибки. Так, если

70% обучаемых допустили одинаковую ошибку, то предстоит внести изменение в содержательную часть учебного материала. Если ошибку допустили от 50 до 69% обучаемых, то предстоит изменить методику отработки данного раздела и поместить дополнительный поясняющий материал, используя электронную доску объявлений. Если ошибку допустили от 30 до 49% обучаемых, следует пересмотреть методику изложения учебного материала раздела (темы), представить обучаемым алгоритм решения подобного процесса в среде «Форума» и рекомендовать повторно отработать этот элемент. Если ошибку допустили до 30% обучаемых, преподавателю удобнее провести индивидуальные консультации, общаясь асинхронно средствами электронной почты.

Работа студента ведется в соответствии с расписанием занятий и индивидуальным сетевым графиком. В установленное время он принимает участие в on-line лекциях, семинарах, практических занятиях, проводимых в режиме Интернет-видеоконференции. Затем отрабатывает в установленном преподавателем порядке разделы, темы учебной дисциплины, проходит тестирование. При возникновении трудностей обучаемый обращается к помощи виртуальной учебной аудитории, общение в которой организовано в среде «Форум».

Сущность оценки знаний состоит в отслеживании хода и результатов работы обучаемого и предполагает текущий, итоговый контроль и контроль по ходу работы, результаты которого позволяют вносить управляющее воздействие, корректирующее траекторию обучаемого. Особое внимание уделяется разработке и внедрению компьютерной программы «Электронный экзамен (зачет)» и методике приема синхронного устного экзамена в режиме Интернет-видеоконференции.

Заключение

Система Интернет-тестирования была опробована при изучении дисциплин «Линейная алгебра и элементы аналитической геометрии», «Основы математического анализа», «Теория вероятностей и математическая статистика» на 1-ом и 2-ом курсах факультета открытого образования Финансового университета [8, 9].

Сложившаяся система оценки результатов учебной работы студента и ее инструментарий ориентированы, в основном, на итоговый контроль, но нелинейное, открытое представление учебной информации, ставят во главу угла контроль коррекционного типа на всех этапах работы обучаемого. Результаты контроля позволяют вносить изменения как в методику работы преподавателя и обучаемого, так и в содержание учебных материалов, методику совместной работы субъектов образовательного процесса. Эти изменения осуществляются в ходе учебного процесса, поэтому с учетом коррекционного воздействия можно говорить о гарантированном достижении заданного уровня качества обучения.

Разделение труда преподавателей по нескольким процессам с применением специально разработанных программных продуктов для каждого процесса в несколько раз повышает качество и производительность этого труда. Оно позволяет реализовать дистанционные образовательные технологии в массовом обучении, так в настоящее время с применением дистанционных образовательных технологий в Финансовом университете обучается более 35 000 слушателей и студентов.

Это открытая система, позволяющая адаптироваться к новым технологиям, создающая предпосылки для модернизации образовательного процесса во всех формах обучения, имеющая потенциал инновационного развития, позволяющая перейти от экстенсивных методов развития к интенсивным, снижающая субъективную зависимость результатов образовательного процесса.

Литература

1. Каган М.С. Системно-синергетический подход к построению современной педагогической теории // Синергетическая парадигма. Синергетика образования. – М.: Прогресс-Традиция, 2007. – С. 232–234.
2. Моисеева М.В., Полат Е.С., Бухаркина М.Ю., Нежурина М.И. Интернет – обучение: технологии педагогического дизайна. – М.: Издательский дом «Камерон», 2004. – С. 114–125.
3. Ланских А.Н. Технологии дистанционного обучения в модернизации образовательного процесса Финакадемии // Теоретические и методические проблемы инновационной системы образования в Финансовой академии при Правительстве Российской Федерации. – М.: Финакадемия, 2008. – 60 с.
4. Лямзин М.А., Баруздина И.А. Совершенствование преподавания дисциплин естественнонаучного цикла в вузе с применением информационных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.firstjob.ru/?ScienceView&ID=7>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 08.02.2006).
5. Никитин Н.В., Уваров А.Ю., Телекоммуникации, обучение, профессионализм. – М.: Логос, 2008. – С. 193–200.
6. Плосковитов А.Б. Методико-технические проблемы преподавания естественнонаучных дисциплин с использованием элементов открытого образования. Научно-образовательный портал «Инженер», МГТУ им. Н.Э. Баумана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.engineer.bmstu.ru/journal/publications/ploskovitov_problems.phtml, свободный. Яз. рус. (дата обращения 13.06.2010).

7. Бертяев В.Д., Булатов Л.А., Сазонов Д.Ю. Методологические особенности применения информационных технологий обучения в цикле естественнонаучных дисциплин // Вестник Московского городского педагогического университета. Серия Информатика и информатизация образования. – 2006. – № 7. – С. 209–210.
8. Калачев Н.В., Ланских А.Н. Особенности преподавания естественнонаучных дисциплин в условиях открытого образования // Математическое образование в школе и вузе в условиях перехода на новые образовательные стандарты. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Казань, 15 октября 2010 г.). – Казань, 2010. – С. 20–22.
9. Калачев Н.В., Ланских А.Н. Использование ИТ в преподавании естественнонаучных дисциплин в условиях открытого образования // Научный журнал «Ученые записки Петрозаводского государственного университета». – Петрозаводск: ПетрГУ, 2011. – Т. 1 (114). – С. 35–37.

Калачев Николай Валентинович – Финансовый университет при Правительстве РФ, кандидат физ.-мат. наук, доцент, nkalachev@fa.ru, nik@kalachev.ru
Ланских Анатолий Николаевич – Финансовый университет при Правительстве РФ, кандидат военных наук, доцент, ALanskih@fa.ru

УДК 004.55

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВЫМ РЕЗЕРВОМ УНИВЕРСИТЕТА

Н.Н. Горлушкина, Ю.Л. Колесников, А.В. Куркин, И.Ю. Щербакова, Е.И. Филиппова

Предложена автоматизированная система формирования и управления кадровым резервом Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Обоснована необходимость такой системы. Рассмотрен ее функционал, который направлен на учет кадрового резерва. Система позволяет вести учет и планирование кадрового резерва университета с мониторингом личных достижений соискателей.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, кадровый резерв, СУБД, формирование анкет соискателя, система распределенного управления информацией.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется подбору кадрового потенциала в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) по проекту развития его как Национального исследовательского университета (НИУ ИТМО). Предусмотрено формирование квалификационных характеристик научно-педагогических работников, развитие системы поиска, подбора талантливых специалистов для педагогической, научной и управленческой деятельности.

Стратегия кадровой политики нацелена на формирование уникальной среды и инфраструктуры подготовки высококвалифицированных специалистов, востребованных экономикой [1]. Условиями достижения этой цели являются сильный кадровый состав, высококвалифицированный административно-управленческий персонал, талантливые, профессионально ориентированные студенты. Эти условия лежат в основе стратегии развития кадрового потенциала вуза.

Важнейшим направлением кадровой политики СПбГУ ИТМО является формирование среды воспроизводства высококвалифицированных кадров в области информационных технологий для различных отраслей приборостроения. Актуальной остается задача привлечения молодых квалифицированных научных работников для педагогической деятельности. Инструментом совершенствования кадрового потенциала Университета и должна служить информационная система, которая позволит включать молодых специалистов в кадровый резерв на научные, педагогические и руководящие должности. Система должна позволить выявлять молодых лидеров, способных участвовать в научно-исследовательской, педагогической, инновационной и административной деятельности, т.е. сформировать кадровый резерв.

Аналогами могут служить специализированные системы по работе с кадрами различной степени функциональности, системы управленческого учета, в том числе 1С и др., а также информационные системы формирования кадрового резерва (<http://proffkomanda.edinros.ru/>). Отметим, что подобные системы предназначены для конкретных областей деятельности с формализованными процессами. В их концепцию в силу специфики плохо «вписывается» научно-исследовательская и педагогическая деятельность. Такие системы не учитывают, к примеру, научный вклад, публикаторскую деятельность, участие кандидата в инновационных и научных проектах, личный вклад в реализацию этих проектов, должностной опыт и т.д. [2, 3]. В предлагаемом проекте авторы постарались учесть как проблемы, так и положительные стороны рассмотренных аналогов [4].

Обзор существующих систем кадрового резерва показал наличие в них общих важных элементов:

- заполнение интерактивной анкеты;

- автоматическое формирование списка соискателей;
- формирование базы данных кадрового резерва;
- наличие системы распределенного управления информацией.

Концепция системы кадрового резерва Университета

При разработке системы формирования и управления кадровым резервом в ее основу был положен классический подход:

- определение численности кадрового резерва и его должностной структуры;
- изучение, оценка и отбор кандидатов;
- составление и утверждение списка кадрового резерва;
- организация повышения квалификации специалистов, включенных в резерв.

В концепцию системы заложены главные условия формирования кадрового резерва.

Первой стадией формирования кадрового резерва является поиск кандидатов, который включает в себя ряд взаимосвязанных процедур [5]:

- анализ документальных данных (личная карточка работника, автобиография, характеристики, результаты аттестации и т. п.);
- интервью или собеседование для выявления интересующих сведений (стремлений, потребностей, мотивов поведения и т. п.);
- наблюдение за поведением работника в различных ситуациях;
- оценка результатов трудовой деятельности (производительности труда, качества выполняемой работы, показателей выполнения руководимым подразделением заданий) за определенный период (в качестве такого периода были выбраны два года с определением промежуточной оценки деятельности каждые полгода);
- сравнение качеств претендентов с требованиями должности того или иного ранга.

Следующая стадия формирования резерва включает:

- оценку профессиональных знаний, навыков и опыта претендентов;
- сопоставление совокупности качеств кандидата и тех требований, которые необходимы для резервируемой должности;
- сравнения кандидатов на одну должность и выбор наиболее отвечающего требованиям резервируемой должности.

Как правило, эта работа осуществлялась в форме аттестации.

Третья стадия – формирование и корректировка списка кадрового резерва.

Структура и функционал системы кадрового резерва Университета

Структура системы представлена ER-диаграммой (рис. 1), на которой показаны основные объекты системы и поля данных. Из них стоит выделить следующие моменты.

Пользователи системы. В автоматизированной системе кадрового резерва университета разработано следующее разграничение прав доступа на основе ролей, которые пользователи выполняют в системе [4]:

Администратор – пользователь, который осуществляет управление автоматизированной системой, работает с системой распределенного управления информацией.

Гость – пользователь, не имеющий доступа к системе, имеет возможность общего ознакомления с информацией на статических страницах системы.

Соискатель – пользователь, не зарегистрированный в системе, который заполняет интерактивную анкету. После отправки своих данных на рассмотрение и после прохождения конкурса «Кадровый резерв», он переходит в статус «Кандидата» и получает логин и пароль для входа в систему. Такие права доступа ему назначает администратор системы.

Кандидат – пользователь, который имеет логин и пароль для доступа к своей анкете и возможность ее редактирования. «Кандидат» может ознакомиться с вакансиями, размещенными в системе, и откликнуться на нее.

Каждый пользователь имеет определенный набор возможностей работы с системой и ее функциями в зависимости от ролей, которые они выполняют в системе.

Управление анкетами и вакансиями. Разработка системы управления данными информационной системы кадрового резерва является важнейшим этапом в работе системы и в формировании анкет пользователей, желающих попасть в кадровый резерв СПбГУ ИТМО. Управление анкетами и вакансиями осуществляет администратор системы.

Школа кадрового резерва. Раздел представляет текстовую статическую информацию о школе кадрового резерва и проводимых в ней мероприятиях. Школа кадрового резерва создается для преподавателей, научных работников, будущих управленцев, а также заинтересованных сотрудников.

Новости. Пользователям системы предоставляется возможность ознакомиться с новостной лентой о новых вакансиях, о проводимых мероприятиях, связанных с трудоустройством, с школой кадрового резерва, о проводимом конкурсе «кадровый резерв» и т.д. Разделом новостей также управляет администратор, который имеет возможность их добавления, удаления и редактирования.

Информация. Раздел является статическим текстовым разделом со ссылками на скачивание документом и на переход к заполнению интерактивной формы анкеты.

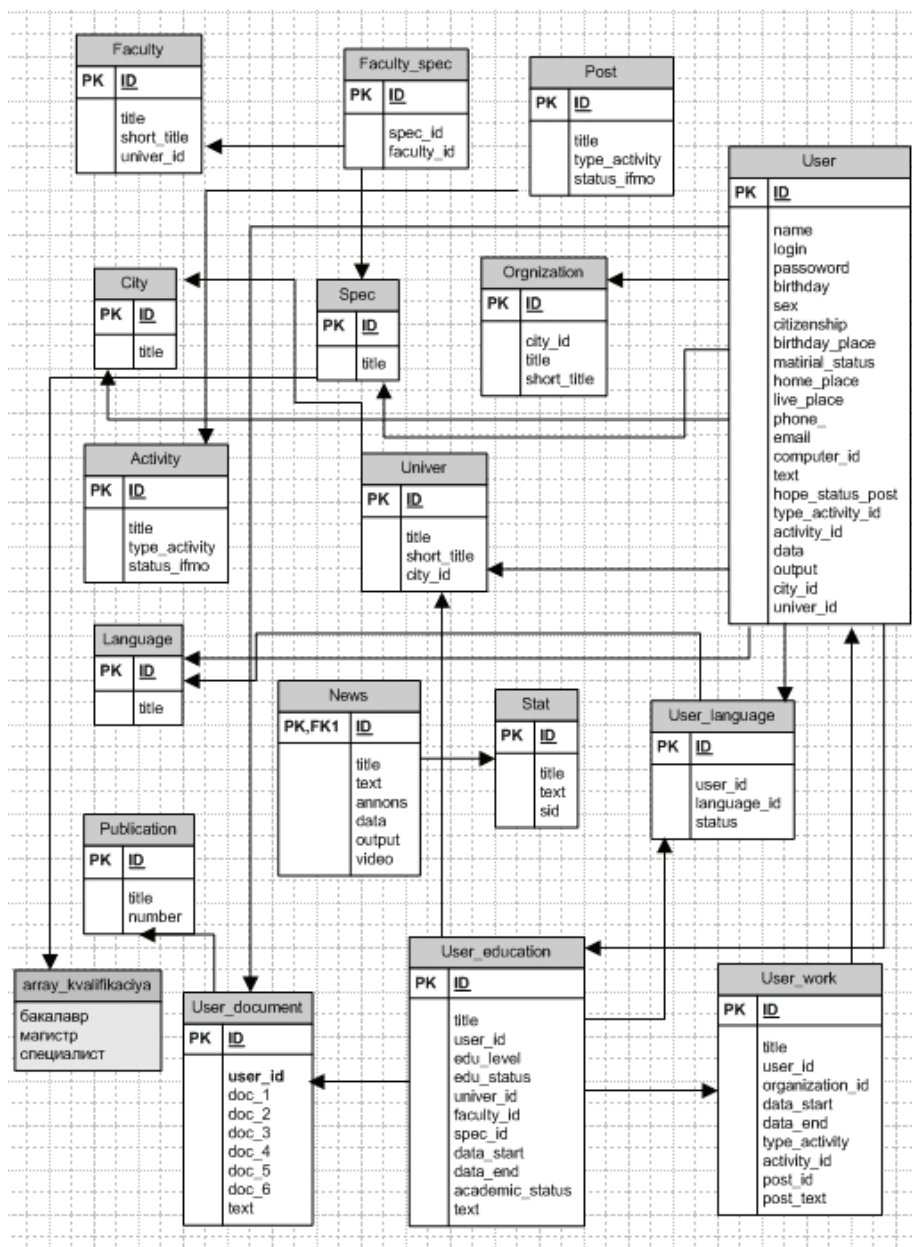


Рис. 1 ER-диаграмма системы кадрового резерва

В этом разделе содержится информация для пользователей системы, которые хотят пройти конкурсный отбор и попасть в кадровый резерв университета, а именно перечень документов, которые необходимы для этого. Для попадания в кадровый резерв необходимо пройти конкурс «Кадровый резерв НИУ ИТМО». Для участия в конкурсе заявителями должны быть представлены в установленный срок в Организационный комитет следующие документы:

- 1) заявление на участие в конкурсе (при самовыдвижении) – имеется ссылка на скачивание заявления. Заявление в распечатанном виде должно быть предоставлено в отдел кадров университета;
- 2) направление от структурного подразделения, в котором работает претендент, с указанием его заслуг, имеющегося научного задела и предполагаемого срока защиты диссертации (предоставляется в свободной форме);

3) анкета – имеется ссылка на заполнение интерактивной анкеты, после заполнения которой возможно создание версии для печати, чтобы заполненную анкету в распечатанном виде предоставить в отдел кадров университета. К анкете должны быть приложены все документы, подтверждающие наличие заявленных в ней показателей;

4) индивидуальный план-график, в котором определяется планируемый срок защиты диссертации и график проведения основных мероприятий, в том числе необходимых для защиты в указанный срок;

5) профессиональное эссе (задание, которое выполняется индивидуально в электронном либо письменном виде). Информация о темах эссе размещается дополнительно.

Формирование базы данных кадрового резерва

Обозначим основные этапы формирования кадрового резерва, неразрывно связанные с работой рассматриваемой информационной системы.

1 этап – регистрация пользователей в информационной системе кадрового резерва, формирование общей базы данных всех зарегистрированных пользователей.

2 этап – прохождение конкурса «Кадровый резерв», формирование списков кандидатов.

3 этап – формирование отчетной документации.

4 этап – сформированная база данных кадрового резерва НИУ ИТМО.

Формирование базы данных персоналий, которыми являются кандидаты на попадание в кадровый резерв, происходит в первую очередь через пользовательский интерфейс системы при заполнении интерактивной анкеты.

Пользователь, желающий попасть в кадровый резерв, может заполнить интерактивную «Анкету соискателя» на главной странице системы (рис. 2). Пользователь заполняет текстовые поля актуальной информации о себе. Разработаны формы авторизации пользователя «Личный кабинет» и пошаговая форма «Ход заполнения» анкеты. В интерактивной анкете заполняются следующие поля (рис. 3):

1. личные данные
2. образование
3. языки
4. трудовая деятельность
5. желаемая должность.

В результате формируется готовая анкета.

The screenshot displays the website of the National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO). The main header includes the university's name and the title 'Информационная система включения молодых специалистов в Кадровый резерв НИУ ИТМО'. Below the header is a navigation bar with links: 'О системе', 'Нормативная база', 'Вакансии', 'Школа КР', 'Документы', and 'Контакты'. The main content area is titled 'Анкета соискателя' (Applicant Form). It contains a form with various input fields for personal and professional information. To the right of the form is a 'Ход заполнения' (Progress) section with a vertical list of steps: 1. Личные данные (Personal data), 2. Образование (Education), 3. Языки (Languages), 4. Трудовая деятельность (Work experience), 5. Желаемая должность (Desired position), and 6. Анкета (Form). A 'Далее' (Next) button is located at the bottom right of the progress section.

Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики
Информационная система включения молодых специалистов в
Кадровый резерв НИУ ИТМО

О системе Нормативная база Вакансии Школа КР Документы Контакты

Анкета соискателя

Фамилия*: Филиппова
Имя*: Елена
Отчество*: Игоревна
Логин*: filipova
Пароль*: 123456
Фото*: Обзор...
Дата рождения*: 03.03.1986
Пол*: ☐ Мужской ☒ Женский
Гражданство*: Гражданин РФ
Место рождения*: г.Ухта, Республика Коми
Семейное положение*: Разведен (разведена)
Адрес Постоянной регистрации*: СПб, пр.Королева 21-1-310
Место Фактического проживания*: СПб, ул.Планерная 71-5-32
Телефон*: 232-25-75
E-mail*: alena30386@yandex.ru
Знание компьютера*: Опытный пользователь
Желаемый тип деятельности*: Руководящая деятельность

Ход заполнения

1 Личные данные
2 Образование
3 Языки
4 Трудовая деятельность
5 Желаемая должность
6 Анкета

Далее

Рис. 2. Интерактивная анкета соискателя

Анкета соискателя

Образовательное учреждение*: СПб ГУ ИТМО

Добавить

Специальность*: Бизнес-информатика

Добавить

Название образования*: Программист

Образовательный уровень*: Высшее

Основное профессиональное образование*: Высшее профессиональное образование -

Дата начала обучения*: 2003

Дата окончания обучения*: 2009

Ученое звание*: Нет

Дополнительная информация:

Ход заполнения

- 1 Личные данные
- 2 **Образование**
- инженер-программист
- 3 Языки
- 4 Трудовая деятельность
- 5 Желаемая должность
- 6 Анкета

Далее

* Поля обязательны для заполнения

Добавить

Рис. 3. Этап «Образование». Данные об образовании пользователя

Затем в форме «Ход заполнения» появляется кнопка «Добавить», которая позволяет указать не одно образование, если таковое имеется у пользователя.

При заполнении полей «Языки», «Трудовая деятельность» предусмотрена возможность добавления нескольких пунктов, как и на предыдущем этапе. Это позволяет расширить возможности добавления дополнительной информации о пользователе.

Сформированная анкета хранится в базе данных системы. После утверждения соискателя в кадровый резерв университета пользователь с правами «Соискателя» переходит в статус «Кандидата» и получает логин и пароль для доступа к системе, чтобы он мог редактировать свои анкетные данные, а также иметь возможность ознакомления с размещенными вакансиями и отклика на них.

Формирование отчетной документации является заключительным этапом работы информационной системы в целом, и процесса формирования резерва в том числе.

Заключение

Разработка системы была выполнена в рамках Программы развития Национального исследовательского университета, в которой большое внимание уделяется развитию кадрового потенциала Университета, в первую очередь – совершенствованию квалификационных характеристик.

Разработана автоматизированная система формирования и управления кадровым резервом СПбГУ ИТМО (<http://kr.ifmo.ru/>), нормативные и распорядительные документы, регулирующие порядок формирования и использования кадрового резерва. Также были разработаны принципы методического обеспечения формирования кадрового резерва: отбор и оценка кандидатов на включение в кадровый резерв; формирование базы данных кадрового резерва, основания для включения в кадровых резерв; оценка и подготовка кадрового резерва; порядок действий при выдвижении кандидата на замещение из кадрового резерва.

Литература

1. Васильев В.Н., Локалов В.А., Никитин А.В., Тозик В.Т. О состоянии разработки и внедрения перспективных информационных и телекоммуникационных технологий в СПбГУ ИТМО. Аналитический доклад // Труды ВНИПК с международным участием «Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования» (14-15 апреля 2010 г., Москва). – М.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 36 с.
2. Базарова Т.Ю. Управление персоналом. – М.: «Центр Кадровых Технологий - XXI век», 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cfin.ru/management/people/pmanbook.shtml>, своб. Яз. рус. (дата обращения 13.06.2011).

3. Горбылева Е. Принципы формирования кадрового резерва // Кадровик. Кадровое делопроизводство. – 2009. – № 10 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hr-portal.ru/article/printsipy-formirovaniya-kadrovogo-rezerva>, своб. Яз. рус. (дата обращения 15.06.2011).
4. Горнаков С.К. Осваиваем системы управления сайтом (CMS). – М.: ДИК Пресс, 2009. – 336 с.
5. Бакай Ю. Топ-резерв // БОСС. – 2007. – № 3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.emd.ru/press/publish/st5_07.php, своб. Яз. рус. (дата обращения 13.06.2011).

- | | |
|--------------------------------------|---|
| <i>Горлушкина Наталия Николаевна</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, nagor@spb.runnet.ru |
| <i>Колесников Юрий Леонидович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, проректор, kolesnikov@mail.ifmo.ru |
| <i>Куркин Андрей Владимирович</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kurkin@mail.ifmo.ru |
| <i>Щербакова Ирина Юрьевна</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, начальник отдела, mir@mail.ifmo.ru |
| <i>Филиппова Елена Игоревна</i> | – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, filippova@mail.ifmo.ru |

УДК 681.5.011

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА РЕСУРСОВ
ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
НА ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ****И.С. Наумов**

Создана методика обоснования оптимального состава, количества и распределения ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций. На ее основе создано программное средство, обеспечивающее минимальный ущерб от чрезвычайных ситуаций при ограниченных финансовых ресурсах.

Ключевые слова: управление, ресурс, ликвидация, чрезвычайная ситуация.

Развитие системы предупреждения об опасных явлениях, способов уменьшения опасности и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) считается одной из приоритетных областей деятельности на всех уровнях – международном, государственном, региональном и местном [1]. С этой целью разработана методика, предназначенная для использования в региональных управлениях по делам ГО и ЧС при оценке и совершенствовании системы ликвидации ЧС [2].

Отличительная особенность разработанной методики состоит в том, что предполагается комплексно учитывать влияние всех основных условий функционирования системы обеспечения ресурсами и ее состояние как факторов, потенциально предопределяющих величину возможного ущерба при возникновении ЧС. В укрупненном виде методика представляется в следующем виде:

- обоснование рационального объема бюджетного финансирования, типов и количества ресурсов, размещаемых в системе обеспечения ресурсами;
- обоснование иерархии структуры системы и соответствующего расположения центрального пункта с учетом инфраструктуры района функционирования;
- обоснование порядка определения потенциальной опасности объектов для противодействия возможным ЧС, на которых создается система;
- обоснование размещения ресурсов по элементам системы;
- обоснование эффективной стратегии функционирования системы.

Для использования методики разработана общая математическая модель, которая обеспечивает учет взаимосвязи моделей и задач, используемых для оптимизации параметров системы, в соответствии с той их декомпозицией, которую предопределяет эта методика. При разработке общей модели был использован ряд математических моделей: оценивания влияния значений параметров системы обеспечения ресурсами на результаты ликвидации ЧС; постановки и решения задач обоснования типа и количества агрегатов каждого типа для объектов и размещения центрального пункта; определения максимального количества объектов, на которых возможно одновременное развитие ЧС; обоснования размещения ресурсов для ликвидации ЧС по критерию минимума суммарных потерь.

На основе методики создан пакет прикладных программ, предназначенный для обоснования структуры системы защиты от ЧС, обеспечивающих при ограниченных финансовых ресурсах минимальный ущерб от ЧС.

Результаты работы заключаются в развитии моделей и методов автоматизации управления ликвидацией ЧС путем реализации нового подхода, состоящего в целенаправленном выборе значений параметров состояния системы обеспечения ресурсами, используемой при ликвидации ЧС на пространственно распределенных объектах, на основе комплексного учета факторов, предопределяющих величину возможного ущерба от ЧС. Практическая значимость результатов состоит в обеспечении возможности автоматизированной выработки экономически обоснованных решений по составу, количеству и распределению ресурсов, используемых при локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций на пространственно распределенных объектах.

1. Концепция национальной безопасности РФ. Утверждена Указом Президента РФ от 17 декабря 1997 г. № 1300 (ред. от 10.01.2000 г. № 24).
2. Организационно-методические указания по подготовке органов управления, сил гражданской обороны и единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на 2011–2013 годы (письмо МЧС России от 7 декабря 2010 г. № 2-4-60-15-14) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/activities/?ID=154821>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 17.01.2011).

Наумов Игорь Сергеевич – Пермский государственный технический университет, аспирант, igor14-88@list.ru

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Ю.В. Китаев

Рассматривается построение виртуальных лабораторных работ.

Ключевые слова: виртуальные лабораторные работы, тестирование, дистанционное обучение.

Одной из ведущих компонент процесса обучения является тестирование полученных знаний, навыков и компетенций студента на основе системы дистанционного обучения СПбГУ ИТМО AcademicNT, в том числе с использованием виртуальных лабораторных работ (ВЛР).

Автором разработан и внедрен в систему дистанционного обучения (СДО) пакет ВЛР по темам «Цифровая электроника» и «Микропроцессорная техника». Все работы выполнены в виде Java-апплетов или в формате SWF с использованием JavaScript, загружаемых на компьютер студента. Структура каждой работы включает:

- 1–2 исследовательских блока;
- выбор (или синтез) формулировки определения для исследуемого устройства;
- решение задач для закрепления знаний, полученных в исследовательских блоках.

В отличие от большинства существующих решений [1], для каждой конкретной работы последовательность предъявляемых блоков виртуальной работы должна обеспечить совокупность следующих признаков: а) уникальность профиля, в котором наиболее полно решается поставленная задача; б) масштабируемость для различных ВЛР; в) оптимальность компоновки визуальных элементов ВЛР: условное графическое обозначение исследуемого устройства, журнал исследования, органы управления и отображения данных и справочное окно; г) оптимальность организации функционирования многочисленных элементов интерфейса, которые должны обеспечивать однозначную траекторию выполнения работы.

Рассмотрим решение поставленных задач на примере (рисунок). Выполнение работы студент начинает с исследования предлагаемого устройства в режиме «черного ящика». На рисунке представлен фрагмент типового окна Java-апплета начального этапа исследования двоичных счетчиков. В левом верхнем углу располагается условное графическое обозначение исследуемого устройства, к входам которого подводятся тестовые комбинации входных сигналов. Выходные значения студент заносит в таблицу справа. Внизу приводятся пояснения к выполнению ВЛР.

Набор элементов управления варьируется для различных задач и этапов выполнения работы. На каждом шаге выполнения работы для исключения тупиковых ситуаций активным может быть только один элемент или группа. Все остальные элементы, в том числе незаполненные поля ввода, на данном временном срезе пассивны. Объем сообщения не позволяет показать и описать остальные кадры примера. Все работы доступны для изучения и выполнения в [2].



Рисунок. Фрагмент типовой ВЛР

Всего автором разработано и внедрено в систему AcademicNT 18 таких работ, часть из них написана на языке ActionScript в среде Macromedia Flash и JS, в остальных используется Java. Предлагаемая структура ВЛР позволяет обеспечить оптимальное соотношение времени разработки и объема содержательной части при модульном способе построения ВЛР, позволяющем переносить архитектуру исследования на другие объекты изучения в приведенных курсах.

1. Кудинов Д.Н. Перспективы разработки виртуальных лабораторных работ на базе комплекса программ T-FLEX // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 6. – С. 71–74.
2. Китаев Ю.В. Цифровая и микропроцессорная техника. Конспект лекций, виртуальные лабораторные работы, интерактивные задачи и другой материал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://faculty.ifmo.ru/electron/cons/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 24.05.2011).

Китаев Юрий Васильевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, KitaevUV@km.ru

РАСЧЕТ СВЕТОСИЛЬНОГО (1:1,2) КИНОСЪЕМОЧНОГО ОБЪЕКТИВА С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

М.Е. Зацепина

Рассматриваются наиболее известные методы расчета оптических систем. Приведен пример расчета светосильного (1:1,2) киносъемочного объектива с $f' = 35$ мм на основе теории расчета профессора Д.С. Волосова.

Ключевые слова: методы расчета, асферические поверхности, качество изображения, контраст изображения.

В настоящее время для пленочного и цифрового кинематографа ведущими зарубежными оптическими предприятиями (такими как Carl Zeiss, Cooke, Leica, Panavision, Fujinon, Red) [1], а также отечественными предприятиями (Оптика-Элит, ОАО ЛОМО) выпускаются разнообразные особо светосильные объективы. Такие объективы обладают следующими особенностями: светосила 1:1,2, большой задний отрезок для использования объективов в пленочных камерах с обтюраторами; высокое качество изображения по всему полю (визуальный контраст на частоте 100 лин/мм – не менее 0,2, а на частоте 15 лин/мм – более 0,75). Конструкции подобных объективов – весьма сложные и многолинзовые. При их проектировании встает задача создания оптимальных оптических схем, минимизированных по габаритам, количеству оптических компонентов. Применение для этих целей асферических поверхностей позволяет получить требуемые оптические параметры при их наилучшей конструкции.

В сообщении рассматривается методика расчета особо светосильных объективов и приводится пример расчета объектива с относительным отверстием 1:1,2 и $f' = 35$ мм для кадра 18,6×24,5 мм.

Известны методы расчета светосильных объективов, предложенные профессорами М.М. Русиновым [2], Г.Г. Слюсаревым [3], Д.С. Волосовым. При расчете объектива был использован метод профессора Д.С. Волосова – метод расчета сложных анастигматов в области аберраций третьего порядка при помощи метода разделения коэффициентов аберраций: 1) разделение коэффициентов аберраций всей системы по ее составляющим сложным компонентам («половинкам»); 2) расчет «половинки» самостоятельно, с последующим образованием сложной системы.

Из теории аберраций известно [4], что число независимых монохроматических аберраций $(2t+1)$ -го порядка определяется в разложении Шварцшильда следующим образом [4]:

$$N_{2t+1} = \frac{(t+1) \cdot (t+4)}{2}.$$

Для аберраций третьего порядка таких аберраций $N_{III} = 5$, для аберраций пятого порядка таких аберраций $N_V = 9$, для аберраций седьмого порядка таких аберраций $N_{VII} = 14$ и т.д. Для исправления аберраций необходима оптическая система с числом коррекционных параметров $M \geq N_{\Sigma} + A$, где N_{Σ} – суммарное число аберраций; A – число габаритных параметров системы (фокусное расстояние, задний отрезок и т.д.). Обычно $A=2-3$.

В особо светосильных объективах присутствуют аберрации третьего, пятого и седьмого порядков, поэтому такие объективы – многолинзовые. Например, для объектива с $f' = 35$ мм и относительным отверстием 1:1,2 со сферическими поверхностями достаточно 11 линз, выполненных в виде двух компонентов, разделенных воздушным промежутком, т.е. для этого объектива $M = 23$. Для уменьшения количества линз, например до 8, необходимо ввести асферические поверхности.

На первом этапе исследований была получена система, состоящая из 8 линз со следующими характеристиками: относительное отверстие 1:1,1 и $f' = 35$ мм. В системе отсутствуют асферические поверхности. В системе наблюдается кома внеосевых пучков, велика сферическая аберрация.

На втором этапе исследования изучалось влияние введения асферики 2-го порядка на поверхности. Показано, что наивысший контраст изображения наблюдается при введении асферизации на 12-й–14-й поверхностях второй половинки объектива. На краю поля наивысший контраст достигается при асферизации 13-й и 14-й поверхностей.

Сочетание асферики на 13-й и 14-й поверхностях дает возможность получить хорошее изображение не только на оси, но и для внеосевых пучков. Коэффициенты Зейделя, полученные в результате расчета, приведены в табл. 1.

	SPHA	COMA	ASTI	FCUR	DIST
13+14	0,013439	–0,065541	–0,082400	0,157234	0,493394

Таблица 1. Коэффициенты Зейделя при введении асферики на 13 и 14 поверхностях

Дисторсия составляет 3,12%. Астигматические отрезки: $Z'_m = -0,029$, $Z'_s = -0,045$. Пропускание практически не изменилось – 20,3%.

Контраст получаемого изображения в центре поля и на краю представлен в табл. 2, оптическая схема разработанного объектива – на рисунке, а коэффициенты Зейделя, полученные в результате расчета с помощью программы Zemax, сведены в табл. 3.

		$T, \% (y' = 0 \text{ мм, центр поля})$			$T, \% (y' = 12,25 \text{ мм, край поля})$					
		25 лин/мм	50 лин/мм	100 лин/мм	25 лин/мм	39,19	50 лин/мм	100 лин/мм	25 лин/мм	39,19
8 линз, 2 асф.	13,14	64,43	45,24	22,69	35,19	39,19	19,76	19,52	7,37	7,83
11 линз без асф.		60,10	41,86	21,20	59,49	48,52	31,48	34,84	8,91	16,53

Таблица 2. Контраст изображения в центре поля и на краю системы из 8 линз с двумя асфериками и системы из 11 линз без асферики

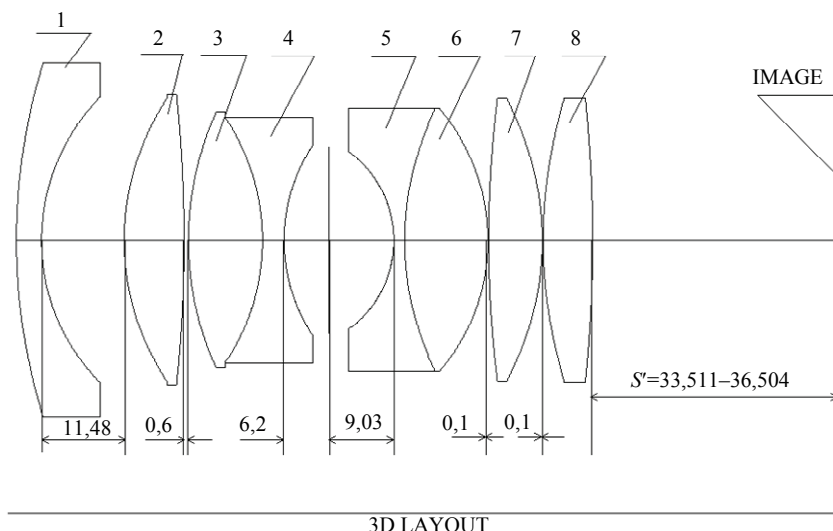


Рисунок. Оптическая схема

	Zemax	11 линз без асф.
SPHA	0,013439	0,048275
COMA	-0,065541	-0,038954
ASTI	-0,082400	-0,030266
FCUR	0,157234	0,097609
DIST	0,493394	0,579330

Таблица 3. Коэффициенты Зейделя системы из 8 линз с двумя асфериками, рассчитанной в программе Zemax и системы из 11 линз без асферики

Контраст изображения, получаемого системой из 8 линз с двумя асфериками (на 13-й и 14-й поверхности) приближен к контрасту, получаемому при использовании системы с 11 линзами без асферических поверхностей.

Параметры объектива соответствуют следующим значениям: виньетирование на краю поля зрения ($y=12,25$ мм) – 56,62%, задний отрезок, обеспечивающий установку обтюратора – 34,228 мм, диаметр передней линзы объектива – 48 мм, дисторсия (для края поля $y=15,4$ мм) – 3,13%, вес оптических компонентов по световым диаметрам – 126 г.

Таким образом, получена система, состоящая из 8 линз (рисунок), с применением двух асферических поверхностей. Конструкция новой системы позволяет уменьшить габариты системы, при заданном фокусе получить необходимое относительное отверстие, уменьшить влияние аберраций и повысить контраст получаемого изображения.

1. Справочник по кинооборудованию. Объективы для кинематографа // Техника и кино. – 2010. – № 6. – С. 50–52.
2. Русинов М.М. Техническая оптика. – Л.: Машиностроение, 1979. – 488 с.
3. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969. – 672 с.
4. Современные методы расчета и проектирования оптических систем // Труды ГОИ. – Л.: Машиностроение, 1970. – Т. 37. – Вып. 167. – 256 с.

Зацепина Марина Евгеньевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, marichka_z@list.ru

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES OPTICAL COATINGS DESIGN BY GENETIC ALGORITHMS

E. Kotlikov, V. Shalin, A. Tropin

A new approach for multilayer optical coatings design by evolutionary strategies on the basis of genetic algorithms is reported. The coding mode of alternative decisions is offered, and genetic operators for realization of the simple genetic algorithm are developed as well. The possibilities of the offered synthesis method are shown on the example of 3-, 5- and 7-layer achromatic antireflection coatings design. Rates of procedure convergence depending on entrance functional parameters are investigated.

Keywords: genetic algorithm, genetic operators, optical coatings, synthesis method.

Eugeny Kotlikov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department Head, D.Sc., Professor, ekotlikov@mail.ru

Valentin Shalin – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, student, midgard_ml1@yahoo.com

Alexey Tropin – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, senior lecturer, PhD, tropal@mail.ru

DEFORMATION AND TENSION FIELDS MATHEMATICAL MODELING IN DISK OPTICAL ELEMENTS

A. Novak, V. Trofimov, M. Shvanova

Deformation and tension fields mathematical model in disk optical elements is developed which allows predicting pictures of interference and refraction indicator distributions in a flat element of an optical disk under mechanical influence.

Keywords: mathematical modeling, photoelasticity, action of forces, mechanical tension, interference picture.

Alexei Novak – Saint Petersburg University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, aleksnovak1987@mail.ru

Vladimir Trofimov – Saint Petersburg University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, troftu@mail.ru

Maria Shvanova – Saint Petersburg University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, shvanova@bk.ru

OPTICAL-ELECTRONIC AUTOCOLLIMATING SYSTEM FOR INVARIANT MEASUREMENT OF THE TWIST ANGLE

I. Konyakhin, T. Kopylova

An optical-electronic system with a tetrahedral reflector is considered. Two dihedral angles in this reflector have a slight deviation from 90°. The system is based on the symmetric beam path scheme towards the axis of twisting with an additional reflection. Such scheme allows making measurements of the twist angle invariant to rotation on collimation angles.

Keywords: autocollimator, invariant, twist angle, tetrahedral reflector, twist angle measurement sensitivity.

Igor Konyakhin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, igor@grv.ifmo.ru

Tatiana Kopylova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kopylova_tv@mail.ru

DISCRETE SPECTRA PROCESSING BY AN INTEGRAL APPROXIMATION ALGORITHM

A. Krivykh, V. Sizikov

The inverse spectroscopy problem is considered - discrete spectra restoration with the help of measured spectrum and the spectrometer instrument function by solving the system of linear-nonlinear equations by the integral approximation algorithm. A numerical example is given showing that an effective solution of this problem enables to enhance the spectrometer resolving power.

Keywords: inverse spectroscopy problem, system of linear-nonlinear equations, integral approximation algorithm, spectrometer resolving power, discrete spectra.

Alexander Krivykh – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, krivykh1987@mail.ru

Valery Sizikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, sizikov2000@mail.ru

METAL-DIELECTRIC INTERFERENCE LIGHT FILTERS

Tan Tai Do, L. Gubanova

The paper presents a method for finding the optimal design of metal-dielectric interference light filter and factors affecting the spectral characteristics of metal-dielectric interference light filter.

Keywords: light filter, Fabry – Perot filter, metal-dielectric filter.

Tan Tai Do – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, tantaído@yahoo.com

Lyudmila Gubanova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Associate professor, la7777@mail.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

GLASS SYNTHESIS FEATURES WITH COPPER CHLORIDE NANOCRYSTALLS

N. Nikonorov, V. Tsekhomsky, P. Shirshnev

The main problems of copper chloride nanocrystals growing in glass are observed and ways of their solution are considered. Optimal technological modes and glass compositions were found for efficient copper chloride synthesis in potassium-alumina-borate glass. Obtained glass is not photochromic and is high transparent in the visible spectrum area.

Keywords: photochromy, heat treatment, nanophase, CuCl.

Nikolay Nikonorov — Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of department, D.Sc., Professor, Nikonorov@oi.ifmo.ru

Viktor Tsekomsky – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, chief researcher, D.Sc., Professor, tsekoms@mail.ru

Pavel Shirshnev — Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pavel.shirshnev@gmail.com

SINGLE EXCIMER LASER PULSE WRITING OF NARROW-BAND FIBER BRAGG REFLECTORS BY PHASE MASK METHOD

S. Varzhel, A. Kulikov, V. Aseev, V. Brunov, V. Kal'ko, V. Arteev

The article presents the results of fiber Bragg gratings writing in birefringent optical fibers with enhanced photorefractive feature by a single 20 ns pulse of KrF excimer laser (248 nm wavelength). Fiber Bragg gratings in birefringent optical fiber with elliptical stress cladding with reflection more than 10% and spectral width at half maximum ~ 0.1 nm were obtained. Beat length and the effective refractive index for each of the selected axes of a birefringent fiber were calculated based on experimentally obtained data.

Keywords: fiber Bragg grating, birefringence, photorefractive feature, phase mask, excimer laser.

Sergey Varzhel – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, vsv187@gmail.com

Andrey Kulikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, a.kulikov86@gmail.com

Vladimir Aseev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Scientific researcher, aseev@oi.ifmo.ru

Vyacheslav Brunov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, brunov@oi.ifmo.ru

Vladimir Kal'ko – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, vovan-de-mort@mail.ru

Victor Arteev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, art-viktor@yandex.ru

COMPONENTRY AND APPLIANCIES OF TECHNICAL SYSTEMS

CONTROL ENSURING OF AIR POLLUTION BY ASYMMETRICAL DIMETHYLHYDRAZINE

A. Rogova, L. Konopelko

The paper discusses the need for improved control methods of air pollution by asymmetrical dimethylhydrazine; for this purpose new means of measurement were developed.

Keywords: asymmetrical dimethylhydrazine, atmospheric air, metrological maintenance, measurements uniformity ensuring, microflow source.

Anastasia Rogova — Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, korolyok86@mail.ru

Leonid Konopelko — Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of department, D.Sc., Professor, lkonop@b10.vniim.ru

**ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS
ISOLINE MAPS CREATION OF THE EARTH ANOMALOUS GRAVITY FIELD
BY POINT MASSES METHOD**

O. Yashnikova

The procedure and Matlab software for maps creation of the anomalous gravity field based on point masses are described. The procedure is iterative, therefore, the criterion for point masses selecting is being discussed. The results and method testing for maps creation of the Lake Baikal area are presented.

Keywords: anomalous gravity field, point masses, isoline maps.

Olga Yashnikova – Concern CSRI Elektropribor, JSC, Postgraduate, olga_evstifeeva@mail.ru

**PRECISION GYROSCOPIC SYSTEM OF UNDERGROUND NAVIGATION FOR WORK IN HIGH
LATITUDES. THE MAIN SCHEME-CONSTRUCTIVE SOLUTIONS**

Yu. Gordeev, T. Paderina, D. Sokolov

The paper presents main scheme-constructive solutions obtained by layout designing of the gyroscopic orientation module for underground navigation system intended for the shelves of the Arctic seas. The system implements a fundamentally new kinematics of the strapdown gyroscopic inclinometer providing the required accuracy of well positioning in the high latitudes.

Keywords: underground navigation system, strapdown gyroscopic inclinometer, shelves of the Arctic seas.

Yuri Gordeev – JSCo "Electromechanica", junior staff scientist, 133880@gmail.com

Tatyana Paderina – Concern CSRI Elektropribor, JSC, senior staff scientist, PhD, paderinata@rambler.ru

Dmitry Sokolov – JSCo "Electromechanica", senior staff scientist, d.a.sokolov@mail.ru

**TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF SIGNALS FROM NOTICEABLE RADAR STATIONS BY
WAVELET TRANSFORM**

A. Korotkov

The task of time-frequency analysis of signals from noticeable radar stations by wavelet transform is being considered. Efficiency of this method application is shown, and the simulation results are presented.

Keywords: wavelet transform, time-frequency analysis, radar stations signals.

Andrey Korotkov – Research Institute "Vector", JSC, engineer, Andrey.k0206516@mail.ru

**MAIN FEATURES OF THE ELECTROMAGNETIC FIELDS STRUCTURE GENERATED
IN THE LOWER IONOSPHERE BY LOW-FREQUENCY GROUND-LEVEL SOURCES**

S. Rybachek, M. Belyansky

The problem of determining the electromagnetic fields generated in the lower ionosphere (50 - 500 km) by ground-level low-frequency antennas is considered. The solution is created by the method of normal waves in models of a spherical Earth-ionosphere waveguide, radial inhomogeneous anisotropic ionosphere, an arbitrary orientation of the geomagnetic field and the electric and magnetic dipoles. Fields definition in the ionosphere at higher altitudes in the solution instability reduces to integration of differential equations for the tangential field components of the penetrating on-site wave. A combination of differential equations for the wave admittance and for the tangential component of waves is integrated at lower altitudes. Initial conditions are given in the WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) approximation. Relations between the components of the fields excited in the ionosphere by the various ground-level emitters are obtained using the generalized reciprocity theorem.

Keywords: electromagnetic fields, anisotropic ionosphere, low-frequency antennas.

Svetlana Rybachek – Saint Petersburg State University, Associated Professor, PhD, Associated Professor, rybachek_st@mail.ru

Maxim Belyansky – Saint Petersburg State University, Postgraduate, maxim_belyansky@mail.ru места

**CONTROL SYSTEM SYNTHESIS
OF INFRARED TELESCOPE SCANNING AXIS ELECTRIC DRIVE**

V. Tolmachev, D. Subbotin

Vector-matrix model and synthesis methodology of scanning axis electric drive control system based on the contactless electromagnetic converter with limited rotation angle and closed in view of rotation angle was proposed. Scanning process simulation at given electromagnetic converter characteristics and scanning diagram parameters was performed, having proved synthesis techniques relevancy and feasibility of executive-axis desired motion in tracking mode.

Keywords: electromagnetic converter, angle control system, synthesis method, mathematical model, scanning axis, infrared telescope.

Valery Tolmachev – Saint Petersburg University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, tolmachev@ets.ifmo.ru

Dmitry Subbotin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Subb-Dm@yandex.ru

SYSTEM AND ALGORITHMS OF BALLBOT STABILIZATION

A. Borgul, V. Gromov, K. Zimenko, S. Maklashevich

Stabilization problem of unstable construction with the ball at the base and two connected motors was solved. Regulators were synthesized on the basis of linear-quadratic functional optimization and qualitative exponential stability ensuring method. Experimental researches of control system were performed on the model based on robotics complex LegoNXT.

Keywords: Ballbot, inverted mathematical pendulum, linear-quadratic regulator, qualitative exponential stability.

Alexander Borgul – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, borgulalexandr@gmail.com

Vladislav Gromov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, object253@yandex.ru

Konstantin Zimenko – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kostyazimenko@gmail.com

Sergey Maklashevich – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, s.maklashevich@gmail.com

CONTROL ALGORITHM FOR AUTONOMOUS TWO-WHEELED MOBILE ROBOT «MOTOBOT»

A. Bobtsov, A. Borgul, K. Zimenko, A. Pyrkin

Control problem for mobile robot like a bike based on Lego Mindstorms NXT is considered. The controller providing stable moving of the robot model in vertical position at the horizontal plane is designed that allows regulating distantly the route as well.

Keywords: mobile robots, autonomous bike, unstable systems, output control.

Alexey Bobtsov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Dean, Department Head, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru

Alexander Borgul – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, borgulalexandr@gmail.com

Konstantin Zimenko – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kostyazimenko@gmail.com

Anton Pyrkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, PhD, a.pyrkin@gmail.com

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF THE ESTIMATION ALGORITHM FOR AN OBSERVED SEQUENCE IN HIDDEN MARKOV MODELS ON THE BASIS OF ALGEBRAIC BAYESIAN NETWORKS

M. Pinsky, A. Sirotkin, A. Tulupyyev, A. Filchenkov

Hidden Markov models and algebraic Bayesian networks are probabilistic graphical models and therefore they are quite similar. Hidden Markov models have wide application while algebraic Bayesian networks are not so widespread, but their instruments allow simulating and solving hidden Markov models problems. We considered the improvement performance of the solution algorithm for hidden Markov models first problem by means of algebraic Bayesian networks methods. An algorithm for estimating probability of observed sequence in binary linear hidden Markov models by means of algebraic Bayesian network posterior inference is formulated in the article.

Keywords: hidden Markov models, algebraic Bayesian networks, binary linear hidden Markov models, probabilistic graphical models.

Mikhail Pinsky – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, mikhailpinsky@gmail.com

Alexander Sirotkin – Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, (SPIIRAS), junior research fellow, alexander.sirotkin@gmail.com

Alexander Tulupyyev – Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, (SPIIRAS), laboratory head, D.Sc., Associate professor, alexander.tulupyyev@gmail.com

Andrey Filchenkov – Saint Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, (SPIIRAS), junior research fellow, aaafil@mail.ru

SIGNALING MONITORING SYSTEM FOR DIGITAL TELEPHONE NETWORKS

E. Pavlovskiy

The article contains demand analysis for tasks, structure and functions of a monitoring system of common channel signaling at digital telephone exchanges and presents technical solutions for such system practical implementation.

Keywords: communication site, telephone exchange, monitoring, common signaling channel, signaling tester, associated signaling channel, remote access.

Evgeny Pavlovskiy – Saint Petersburg State Railway University, senior teacher, mozgj@vast-arp.spb.ru

APPLICATION OF DATA-FLOW COMPUTING MODELS IN SPECIAL-PURPOSE PROCESSOR DESIGN

R. Popov

This paper presents an approach to special-purpose processors design using data-flow algorithm model. Main classes of data-flow models are considered. A model with distributed control is offered, effective and simple in hardware implementation. The main factors limiting the performance of data-flow processors are shown.

Keywords: data-flow processors, special-purpose processors synthesis, data-flow computing models, Boolean data flow.

Roman Popov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, ripopov@gmail.com

ERRORS CORRECTION METHOD IN THE READINGS SET OF NUCLEOTIDE SEQUENCE

A. Alexandrov, S. Kazakov, S. Melnikov, A. Sergushichev, F. Tsarev, A. Shalyto

Sequencing and assembling of large genomes is one of the actual problems in current bioinformatics. The input data for genome assembling is a set of so-called readings made by sequencing machines. These readings may contain errors coming from sequencing technology based on chemical reactions. That's why often one of the genome assembling steps is errors correction in the set of readings. Most of error correction methods build de Bruijn graph. We describe a method that doesn't use de Bruijn graph and enables to decrease significantly memory usage. It was implemented and tested at genome assembling in the «de novo Genome Assembly Project».

Keywords: genome, sequencing, genome assembling, errors correction.

Anton Alexandrov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, alantbox@gmail.com

Sergey Kazakov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, kazakov_sergey_v@mail.ru

Sergey Melnikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, melnikov@rain.ifmo.ru

Alexey Sergushichev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, alsergbox@gmail.com

Fedor Tsarev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, fedor.tsarev@gmail.com

Anatoly Shalyto – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D.Sc., Professor, shalyto@mail.ifmo.ru

LASER AND MEDICAL TECHNOLOGIES

CORRELATION-EXTREME METHOD FOR DETECTION TASKS SOLUTION AND TIME POINTS ESTIMATION OF QRS-COMPLEXES IN AN ELECTROCARDIOGRAM

O. Zharinov, I. Zharinov

Application of correlation-extreme method for detection tasks solution and time points estimation of QRS-complexes in an electrocardiogram is described. Working characteristics of detection and accuracy characteristics of time points estimation of R-waves maximums in ECG are obtained.

Keywords: electrocardiography, detection and estimation, QRS-complex.

Oleg Zharinov – Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Associate professor, PhD, Associate professor, zharinov73@hotmail.ru

Igor Zharinov – Saint Petersburg Scientific Design Bureau “Electroautomatika” named after P. Efimov, Head of division, PhD, Associate professor, igor_rabota@pisem.net

LASER SYSTEMS AND LASER TECHNOLOGIES

CHEMICAL REACTIONS ANALYSIS IN LASER MARKING OF RASTER PICTURE ON THE SURFACE OF GYROSCOPIC DETAILS

O. Yulmetova, A. Scherbak, R. Yulmetova

Research results of chemical reactions in picture formation by laser marking on the surface of beryllium gyroscopic details by investigations of thermodynamic analysis are given. Conductivity control ability of contrast picture created by laser marking by varying the composition and partial pressures of the gaseous medium components is revealed. The results of X-ray analysis confirming the data of analytical calculations are presented.

Keywords: laser marking, thermodynamic analysis, isobaric-isothermal potential, electrical conductivity, partial pressures of gas medium components.

Olga Yulmetova – Concern CSRI Elektropribor, JSC, Postgraduate, www.ralli@rambler.ru

Alexander Scherbak – Concern CSRI Elektropribor, JSC, leading scientific researcher, D.Sc., a_sch@gtm.ru

Raliya Yulmetova – Saint Petersburg State University of Refrigeration and Food Technologies, lecturer, PhD, www.ralli@rambler.ru

INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION RESEARCH OF HEAT TREATMENT CONDITION INFLUENCE ON CR-NI-AL ALLOY MICROSTRUCTURE

S. Yakovleva, A. Scherbak

This article presents the study of heat treatment condition influence on Cr-Ni-Al alloy microstructure and its mechanical properties including dimensional stability characteristics which provide keeping high accuracy of float gyro precision details. Optimal annealing conditions are detected. Correlation between ageing conditions and dimensional stability characteristics such as precision elastic limit $\sigma_{0,0001}$ is determined. Ageing temperature range 400-550°C is defined as allowing getting higher precision elastic limit with keeping alloy plasticity.

Keywords: dimensional stability, precipitation hardening alloy, microstructure, precision elastic limit, annealing, ageing.

Svetlana Yakovleva – Concern CSRI Elektropribor, JSC, Postgraduate, yorkunoi@gmail.com

Alexander Scherbak – Concern CSRI Elektropribor, JSC, leading scientific researcher, D.Sc., a_sch@gtm.ru

CONTROL SYSTEM STRUCTURE FOR MICROSCOPE AUTOMATED ASSEMBLY LINE

B. Padun, M. Ryabov

New design concept of automated control system for assembly manufacturing process based on adaptive and selective assembly is considered. This concept provides new design and structure methods for automated control systems in agreement with peculiarities of such manufacturing processes, namely, highly accurate mathematical models of the product, inaccurate specification of automated assembly line performance, safe and effective performance of different line devices even when fault conditions or exceptions occur and etc.

Keywords: design method, assembly method, manufacturing process, automated control system, control system structure, synchronization, real-time, fault event.

Boris Padun – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, bsp.tps.ifmo@mail.ru

Maxim Ryabov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, maxmryabov@gmail.com

MULTIAGENT TECHNOLOGIES APPLICATION FOR IMPLEMENTATION OF VIRTUAL ENTERPRISE CONTROL SYSTEM

M. Afanasiev, A. Salomatina, E. Alyoshina, E. Iablochnikov

Application possibility of multiagent technologies for problem decision of orders analysis for technological production background and executors selection is considered. Multilevel estimation methodology of order implementation conditions by enterprises is proposed.

Keywords: multiagent technologies, integrated distributed environment, orders analysis, executors selection.

Maksim Afanasiev - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, ichiro.kodachi@gmail.com

Anna Salomatina - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Salomatina.Anna@gmail.com

Ekaterina Alyoshina - Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Aleshina.Ekaterina@gmail.com

Eugeny Iablotchnikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of department, PhD, Associate professor, eij@mail.ifmo.ru

TECHNOLOGICAL METHODS OF PRODUCT QUALITY GUARANTEE

A. Ivanov, D. Leonov

Suitability improvement of products quality by optimizing the surface micro geometry of details and mechanical stresses in the surface layers of their material is substantiated. The principal method of nonparametric estimation criteria application and control of these characteristics of the details surface layer during manufacturing is set forth.

Keywords: surface roughness, mechanical stresses, characteristics optimization of the details surface layer, product quality.

Andrey Ivanov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-president for education, PhD, Associate professor, auivanov@mail.ifmo.ru

Dimilyan Leonov - VMZ Co. Sopot, Bulgaria, Deputy Director, dimilqn@mail.ru

THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING TESTING RESULTS MODERNIZATION AND ANALYSIS OF SEPARATORS-SUPERHEATERS AT LENINGRAD NUCLEAR POWER PLANT

M. Egorov

Testing results of updated steam separators-superheaters of SPP-500-1 type with "Powervane" jalousie blocks are presented. These blocks have been developed by the Balcke-Durr company, Germany. Measurement results

of the heated steam humidity at the outlet of SPP separation part and the temperature between overheating stages are analyzed.

Keywords: separator-superheater, separation, heat exchange, humidity, temperature, jalousie blocks.
Michael Egorov – Saint Petersburg State Polytechnic University, Postgraduate, egorov12m2u@mail.ru

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT REGIONAL ECONOMIC MODEL BASED ON SOCIAL STRATIFICATION

A. Fetinina

Kirov region society was shared on six stratum on the base of its social difference. The interaction of these stratum gives a full description of the region economy. Mathematical model taking into account socio-economic society preferences is created. For model identification it is convenient to use parallel computing. First results and each stratum's reaction was received, the common trend was defined.

Keywords: social stratification, dynamic model, developing economy, identification, parallel computing, gross regional product, forecast.

Anna Fetinina - Vyatka State University, Postgraduate, annafet87@rambler.ru

INTELLECTUAL CAPITAL – A MEANS OF COMPETITIVENESS INCREASING IN THE CONDITIONS OF INNOVATIVE ECONOMY

O. Tchernysheva

The article presents the key findings of intellectual capital introduced in the enterprises activities in conditions of innovative economy. Special attention is paid to analysis of the intellectual capital impact at the company's competitiveness as a whole.

Keywords: intellect, competitiveness, innovation, personnel, finance.

Olga Tchernysheva – Saint Petersburg Institute of Commerce and Economics, senior lecturer, ov49@mail.ru

SYSTEM CRISIS OF ECONOMY AND NEW METHODOLOGICAL APPROACH TO ENTERPRISING STRUCTURES DEVELOPMENT

V. Podlesnykh

The system reasons of economy crisis and its nature are analyzed. Inadequacy of the dominating organizational-administrative doctrine to the maintenance of system crisis and the concept of a sustainable development of the Russian economy is shown. Necessity of new approaches, methods, mechanisms and models for working out an adequate modernization politics is proved. Synthesis of organization and management theory statements, the economic theory, the theory of technological innovations and synergy is considered as a theoretical base of the new organizational-administrative concept of a sustainable development of enterprising structures. Contents, motive forces and theory model of synergy development of the enterprising structures, focused on synergy technologies and synergy effects formation is considered.

Keywords: system crisis, enterprising structure, organization, self-organization, management, interrelation of management and self-organizing mechanisms.

Victor Podlesnykh – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Professor, mng@mail.ifmo.ru

STRATEGIC MANAGEMENT FEATURES OF THE BUILDING ENTERPRISES

O. Tsukanova, A. Egorova

Basic stages of strategic management of building enterprises are described and analyzed. Theoretical positions of strategic management are concretized for building managing subjects in Russia, also the principal views of strategies are described, which are expediently used at the building enterprises in Russia for the purpose of high results maintenance of economic activities in long-term prospect. The author offers and concretizes principal views of strategy which can be used at economic activities management of the building branch enterprises.

Keywords: SWOT-analysis, strategic plan, strategic management, strategy, building enterprise.

Olga Tsukanova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, zoa1999@mail.ru

Anna Egorova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, graduate, byka35@yandex.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION REMOTE TEACHING ASPECTS OF NATURAL-SCIENCE DISCIPLINES IN THE OPEN EDUCATION DEPARTMENT

N. Kalachev, A. Lansikh

Remote teaching problems and methods of natural-science disciplines (mathematics) at the open education department of Financial University under the government of the Russian Federation are described; the description of educational portal is given, and work experience with the students of external and remote departments is generalized.

Keywords: educational portal, teaching of natural-science disciplines, external and remote departments.

Nikolay Kalachev – Financial University under the Government of the Russian Federation, Associate professor, PhD, Associate professor, nkalachev@fa.ru, nik@kalachev.ru

Anatoliy Lanskih – Financial University under the Government of the Russian Federation, Associate professor, PhD, Associate professor, ALanskih@fa.ru

AUTOMATED SYSTEM FOR FORMING AND MANAGING OF THE UNIVERSITY PERSONNEL RESERVE

N. Gorlushkina, Yu. Kolesnikov, A. Kurkin, I. Shcherbakova, E. Filippova

We propose an automated system for formation and management of personnel reserve of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. The necessity of such system is justified. We consider its functional, which is aimed at accounting of personnel reserve. The system enables to record and plan the University staff reserve with monitoring personal achievements of applicants.

Keywords: automated control system, personnel reserve, DBMS, application form generation, distributed information management system.

Natalia Gorlushkina – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Department Head, PhD, senior researcher, nagor@mail.ru

Yuri Kolesnikov – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-president for teaching-organizational and administrative work, Professor, D.Sc., Professor, kolesnikov@mail.ifmo.ru

Andrey Kurkin – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Postgraduate, kurkin@mail.ifmo.ru

Irina Shcherbakova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. Head of Educational Programs Department, mir@mail.ifmo.ru

Elena Filippova – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, filippova@mail.ifmo.ru

BRIEF REPORTS

SUBSTANTIATION TECHNIQUE OF THE RESOURCES OPTIMUM STRUCTURE FOR EMERGENCIES LIQUIDATION ON SPATIALLY DISTRIBUTED OBJECTS

I. Naumov

Substantiation technique of optimum structure, quantity and distribution of resources for emergencies liquidation is created. The software providing minimum damage from emergencies at restricted financial resources is developed on its basis.

Keywords: control, resource, liquidation, emergency.

Igor Naumov – Perm State Technical University, Postgraduate, igor14-88@list.ru

VIRTUAL LABORATORY WORKS

Yu. Kitaev

Aspects of virtual laboratory works creation is considered

Keywords: virtual laboratory works, testing, remote education.

Yuri Kitaev – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior scientific researcher, KitaevUV@km.ru

CALCULATION OF LARGE-APERTURE (1:1.2) FILMING LENS WITH ASPHERIC SURFACES

M. Zatsepina

The most well-known methods of optical systems calculation are considered. Calculation example of the large-aperture (1:1.2) filming lens with $f' = 35$ mm is given based on calculation theory of Professor D. Volosov.

Keywords: calculation methods, aspheric surfaces, image quality, image contrast.

Marina Zatsepina – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, marichka_z@list.ru