

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Муромцев Д. И., Горовой В. А., Злобин А. Н., Катков Ю. В., Починок И. Н.**  
Архитектура системы управления знаниями на основе Wiki-технологии и интегрированных онтологических моделей ..... 5
- Кулешов С. В.** Метод 3D-компрессии данных рентгеновской компьютерной томографии ..... 12
- Кононенко М. Е., Копилевич Ю. И., Задорожная Е. И.** Влияние индикатрисы рассеяния морской воды на характеристики авиационного океанологического лидара ..... 16
- Воробьев С. Н., Гирина Н. В., Осипов Л. А.** Гауссовы марковские последовательности ..... 23

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А., Ульрих Т. А.**  
Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа ..... 32

### ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

- Коваленко П. П., Мусалимов В. М.** Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений ..... 38
- Амвросьева А. В., Мусалимов В. М.** Усталостное разрушение миниатюрного пьезоэлектрического схвата ..... 45

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Борисов П. А., Лукичев Д. В.** Методики анализа и синтеза энергоподсистем приборных электроприводов ..... 50
- Сухов Т. М., Беляев Е. А.** Использование принципа постоянной цветовой яркости для передачи видеoinформации ..... 55
- Журавлев Ю. Н., Федоров Д. С.** Определение тягового усилия низкочастотного электродинамического вибровозбудителя ..... 59

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Кирилловский В. К., Гаврилов Е. В., Жевлаков А. П.** Применение компьютерной изофотометрии при контроле объектива для нанолитографа ..... 66
- Воронин А. А., Смирнова Е. В., Фаизов И. Н.** Алгоритмическая коррекция погрешностей портативного спектрофотометра ..... 74

<b>Кожевников В. И., Мерзляков П. Г., Валеев Г. Р. Модернизация электростатических фотоэлектронных спектрометров ЭС-2401 и ЭС-3201 .....</b>	<b>78</b>
<b>ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ</b>	
<b>Емельянов А. Л., Платунов Е. С. Кинетика испарения капель в системах охлаждения теплонагруженных элементов приборов .....</b>	<b>84</b>
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>	
<b>Вейко В. П., Беженар Т. В., Чуйко В. А., Шандыбина Г. Д., Ярчук М. В. Лазерная термохимическая технология микроstructuring пленок хрома.....</b>	<b>89</b>
<b>ИНФОРМАЦИЯ .....</b>	<b>95</b>
<b>SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) .....</b>	<b>98</b>

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Muromtsev D. I., Gorovoy V. A., Zlobin A. N., Katkov Yu. V., Pochinok I. N.** Architecture of Knowledge Management System Based on Wiki-Technology and Integrated Ontological Models ..... 5
- Kuleshov S. V.** A 3D-Method of Computer Tomography Data Compression ..... 12
- Kononenko M. E., Kopilevich Yu. I., Zadorozhnaya E. I.** Phase Function Effects on Airborne Hydrographic Lidar Performance ..... 16
- Vorobiev S. N., Girina N. V., Osipov L. A.** Gaussian Markov Sequences ..... 23

### GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

- Vahrameev E. I., Galyagin K. S., Ivonin A. S., Oshivalov M. A., Ulrikh T. A.** Thermal Drift of Fiber Optic Gyroscope ..... 32

### FINE MECHANICS DEVICES

- Kovalenko P. P., Musalimov V. M.** Direct and Inverse Problems in Signal and Image Patternization ..... 38
- Amvosieva A. V., Musalimov V. M.** Fatigue Fracture of Miniature Piezoelectric Grabs... 45

### ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Borisov P. A., Lukichev D. V.** Methods of Analysis and Synthesis of Power Subsystems of Instrument Electric Drives ..... 50
- Sukhov T. M., Belyaev E. A.** Application of Invariant Color Brightness Principle for Video Information Transmission ..... 55
- Zhuravlyov Yu. N., Fyodorov D. S.** Determination of Draught Power of Low-Frequency Electrodynamic Vibrator ..... 59

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Kirillovsky V. K., Gavrilov E. V., Zhevlakov A. P.** Application of Computer Isophotometry for Checking Of Objective for Nanolithography ..... 66
- Voronin A. A., Smirnova E. V., Faizov I. N.** Algorithmic Correction of Portable Spectrophotometer Errors ..... 74
- Kozhevnikov V. I., Merzlyakov P. G., Valeev G. R.** Upgrading the Electrostatic Photoelectronic Spectrometers ES-2401 and ES-3201 ..... 78

### HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Emeljanov A. L., Platunov E. S.** Vaporization Kinetics of Drops in Cooling System of Instrument Component under High Density of Heat Flow ..... 84

**INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY**

<b>Veiko V. P., Begenar T. V., Chuiko V. A., Shandybina G. D., Yarchuk M. V. Laser Thermochemical Technology of Chrome Films Microstructuring .....</b>	<b>89</b>
<b>INFORMATION .....</b>	<b>95</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>98</b>

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

Д. И. МУРОМЦЕВ, В. А. ГОРОВОЙ, А. Н. ЗЛОБИН, Ю. В. КАТКОВ, И. Н. ПОЧИНОК

## АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ НА ОСНОВЕ WIKI-ТЕХНОЛОГИИ И ИНТЕГРИРОВАННЫХ ОНТОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Описывается архитектура и рассматриваются ключевые концепции построения системы управления корпоративными знаниями на базе онтологического моделирования и технологии Wiki. В качестве примера реализации подобного рода технологии рассмотрен прототип системы “OntolingeWiki”.

*Ключевые слова:* управление знаниями, онтология, инженерия знаний, Wiki-технология.

**Введение.** Потребность в системах управления корпоративными знаниями существует в различных областях — от добывающей и перерабатывающей отраслей промышленности до сфер образования и культуры. Среди причин значительного роста интереса к системам управления знаниями можно выделить следующие [1]:

- поиск необходимой информации работниками предприятий сопряжен со значительными временными затратами;
- опыт ведущих и наиболее квалифицированных сотрудников используется лишь в отдельных подразделениях предприятия и не распространяется на корпорацию в целом;
- ценная информация сокрыта в большом количестве документов и данных, доступ к которым затруднен;
- дорогостоящие ошибки повторяются вследствие недостаточной информированности сотрудников и игнорирования ими предыдущего опыта.

В настоящей статье описывается архитектура и рассматриваются ключевые концепции построения системы управления корпоративными знаниями на базе онтологического моделирования и технологии Wiki. В качестве примера реализации подобного рода технологии рассмотрен прототип системы “OntolingeWiki”.

Основная цель описываемой разработки — создание прототипа интегрированной среды накопления знаний [2]. Эта среда призвана объединить методы и средства формального управления знаниями (онтологического инжиниринга [3, 4]) и неформальный подход к структурированию информации (контента открытого Wiki-портала [5]). Использование онтологий в качестве основы для портала знаний имеет два преимущества: формирование хорошо структурированного портала, отражающего предметную область, и возможность предоставления данных, которые могут обрабатываться программными агентами. В последнее время тенденции к открытию хранилищ структурированных данных, представляемых в различных форматах, таких как RDF и OWL, обрели форму движения Linking Open Data [6]. В рамках этого движения разработчики предоставляют доступ к своим „машиночитаемым“ данным для всех желающих, что позволяет осуществлять различные совместные проекты с использованием

разнообразных источников данных. Безусловно, наличие удобных инструментов, позволяющих формировать порталы на основе онтологий, будет способствовать развитию движения Linking Open Data. Одним из таких инструментов и является система “OntolingWiki”.

**Анализ требований к системе.** Первая версия системы “OntolingWiki” [7] была предназначена для организации управления знаниями при разработке образовательного портала музея оптических технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Прежде всего были определены основные элементы — акторы (в терминах методологии Rational Unified Process), взаимодействующие с системой (применялись шаблоны определения акторов и варианты использования системы, предложенные в работе [8]). В таблице приведено краткое описание действий акторов, анализ поведения которых учитывался при формировании функциональных требований к системе.

Актор	Действие
Пользователь-школьник	Взаимодействует с системой в познавательных целях, используя минимальный набор функций
Пользователь-студент	Взаимодействует с системой в учебных и исследовательских целях
Пользователь-преподаватель	Использует систему для проведения лекций обычно по заранее известному сценарию
Пользователь-эксперт	Предоставляет знания для системы
Администратор	Осуществляет установку/обновление/восстановление системы
Браузер	Обеспечивает доступ к системе для всех групп пользователей
Инженер по знаниям	Производит оценку онтологии, отображенной средствами системы, по критериям когнитивной эргономичности, полноты и непротиворечивости

Следующим этапом проектирования стало определение процессов, наличие которых является обязательным для большинства систем управления знаниями. На рис. 1 представлена схема, отображающая основные этапы жизненного цикла контента и знаний внутри системы.

Последний этап формализации требований к системе заключался в создании сценария работы с порталом знаний. Основными стадиями этого этапа стали следующие:

- разработка инженером по знаниям с помощью экспертов онтологии предметной области портала;
- автоматическое создание системой структуры портала (названий/имен разделов и документов, формирование ссылок между ними);
- разработка контента портала в Wiki-стиле экспертами предметной области (к разработке также допускаются преподаватели по смежным областям);
- перевод портала в режим „только для чтения“; контент портала и графическое представление понятий системы могут служить учебным и демонстрационным материалом для пользователей-школьников и пользователей-студентов.

**Функции системы.** В соответствии с анализом задач, поставленных перед системой, а также ранее полученными результатами [2] были выделены следующие основные функции, объединенные в три группы.

*Ввод контента и наполнение базы знаний:*

- импорт одной или нескольких онтологий в качестве шаблона структуры портала;
- создание, редактирование и хранение тематических статей (контента портала).

*Управление контентом:*

- поддержка нескольких разделов, описываемых разными онтологиями;
- отображение тематической статьи;
- создание системы ссылок между тематическими статьями на основе представляемых ими концептов онтологии и связей между ними;
- вывод результатов поисковых запросов по тематической базе данных Интернет-ресурсов;

— отображение информации о концепте, описываемом определенной статьей.

*Представление структуры знаний:*

— визуализация структуры знаний, представленных в портале, в виде дерева отношений наследования и отношений класс—индивид между концептами онтологии;

— визуализация множества отношений между концептами в виде „облака тегов“ (набора ключевых слов);

— визуализация множества близких к определенной тематической статье концептов в форме графа отношений.

Важно отметить, что реализация всех пунктов последней группы подразумевает интерактивную визуализацию: т.е. их введение в портал направлено в первую очередь на поддержку навигации по portalу и его структуре, а не на поддержку обзора формальной модели, лежащей в его основе.



Рис. 1

**Классификация и форматы данных.** Обрабатываемые в системе данные можно разделить на три основных класса:

- 1) формальная модель знаний в виде онтологии;
- 2) контент портала;
- 3) онтологическая структура портала, представляемая в виде направленного графа отношений между статьями.

Логика работы системы управления порталом знаний заключается в преобразовании данных первого и второго классов в данные третьего класса. Важно отметить, что данные имеют множество видов представления.

*Модель знаний.* Для описания формальных моделей знаний применяются специализированные языки онтологий. В системе “OntolingWiki” используется основанный на XML язык OWL — Web Ontology Language [9], что обусловлено:

- распространённостью языка в области web-онтологий;

— поддержкой со стороны консорциума W3C — организации, решающей формальные вопросы развития Интернета (в частности, поиска новых путей развития и внедрения новых технологий);

— широкой поддержкой, осуществляемой различными инструментальными средствами разработки онтологий.

**Контент портала.** Контент портала представляет собой форматированный текст, содержащий гиперссылки и дополнительные мультимедиа-материалы. Для описания статей все Wiki-инструменты предоставляют свои, сравнительно простые языки разметки, используемые системе в качестве формата хранения контента.

**Онтологическая структура портала.** По сути, этот класс данных формируется динамически на основе хранимой онтологии предметной области путем исключения не используемых в выбранном контексте понятий. Так как алгоритм получения ссылок между элементами онтологии и Wiki-страницами зависит только от выбранной онтологии и является вполне детерминированным, хранение данных этого класса оказывается избыточным: они формируются в процессе обработки запросов и используются при поиске или создании страниц портала.

**Логическая структура системы.** Сложность и разнородность задач, решаемых системой, повлекла за собой значительные трудности на этапе построения и формализации структуры программных средств. На верхнем уровне система разделена на модули в соответствии с выполняемыми функциями. Данное разделение обусловлено желанием максимально использовать для решения некоторых задач готовые программные средства с минимальной модификацией.

Схема, отображающая основные компоненты системы “OntolingeWiki” и потоки данных между ними и пользователями, представлена на рис. 2.



Рис. 2

**Wiki-система.** Этот компонент системы “OntolingeWiki” представляет собой стандартный Wiki-инструмент с базовым для таких средств набором функций. Была выбрана Wiki-система с открытым исходным кодом DokuWiki [10]; основные причины такого выбора:

- большое количество свободно распространяемых подключаемых модулей;
- значительный опыт разработчиков;
- простой и переносимый формат хранения контента.

Как было отмечено выше, Wiki-разметка имеет довольно простой формат. Приведем несколько примеров разметки текста в DokuWiki:



**Заголовки:**

```
===== Заголовок 1-го уровня =====
```

```
...
```

```
== Заголовок 5-го уровня ==
```

**Форматирование:**

```
**жирный**, //курсив//, __подчеркнутый__ текст
```

**Оформление ссылок:**

```
[[http://google.com|Google]] — внешние
```

```
[[optics:personal:newton|Ньютон]] — внутренние
```

В современных Wiki-системах приняты два основных способа группировки контента: по категориям или по пространствам имен. В DokuWiki доминирующим средством являются пространства имен, но также поддерживается способ группировки данных по тэгам. Поддержка в DokuWiki подключаемых модулей (плагинов) обеспечивает такие преимущества, как поддержка типов содержимого Wiki-портала, расширение функциональности системы без необходимости перехода на новую версию ядра.

Wiki-система потребовала минимальной доработки, которая заключалась в создании версии, функционирующей в режиме „только контент“, без использования дополнительных элементов редактирования и навигации по portalу.

*Средство разработки онтологий.* Этот инструмент используется инженерами по знаниям в процессе создания онтологии предметной области. В соответствии с предложенной архитектурой системы единственная связь данного ее компонента с остальными может осуществляться через файлы формата OWL. В качестве данного инструмента был выбран свободно распространяемый редактор онтологий Protégé [11], разрабатываемый группой сотрудников Стэнфордского университета (США) при поддержке большого сообщества волонтеров. Пригодность Protégé для редактирования онтологий определяется следующими возможностями:

- стабильностью и поддержкой всех средств текущей версии языка OWL;
- распространением по лицензии GPL;
- несколькими видами визуализации онтологий;
- интуитивно понятным интерфейсом пользователя и наличием большого количества документации;
- поддержкой подключаемых модулей.

*Портал.* Основная идея, заложенная в функционирование данного блока, — загрузка „декораций“ для Wiki-контента, таких как:

- представление общей структуры знаний и формализованных знаний о концепте;
- отображение близких и связанных концептов;
- интеграция поисковых систем в портал.

Данный блок реализован как web-модуль на языке Java [12]. На уровне web-приложения можно выделить несколько компонентов: аналитический модуль, модуль визуализации и модуль декорирования.

Аналитический модуль отвечает за формирование структуры портала на основе онтологии, в том числе определение места хранения (адреса) фрагмента контента, связанного с определенным концептом. Этот модуль осуществляет первичную обработку OWL-документа (непосредственно для работы с этим форматом и получения модели онтологии используется библиотека Jena [13]). В результате создается ряд промежуточных представлений онтологии, которые используются остальными модулями приложения.

Модуль визуализации структуры знаний состоит из двух частей. Первая — апплет (англ. applet, букв. от *application* — приложение — и *let* — суффикс:  $\approx$  программный компонент) HyperGraph [14] — загружается браузером клиента и осуществляет визуализацию структуры портала в виде графа в гиперболическом пространстве [15]. Данный апплет поддерживает отображение надписей и изображений в узлах графа, а также встраивание в них

гиперссылки. Таким образом, он полностью обеспечивает возможность интерактивной навигации по структуре портала. Всевозможные настройки внешнего вида портала (цвета, шрифты и т.п.) также поддерживаются этим модулем. Вторая часть модуля визуализации — собственно модуль приложения — позволяет выполнять трансляцию онтологических описаний в формат данных, совместимый с представлением в виде графа.

Модуль „декорирования“ контента представляет собой набор динамических страниц (JSP), объединяющих следующие элементы отображения: меню навигации, область отображения Wiki-контента, описание структуры онтологии, описание отдельных концептов, результаты поисковых запросов, сформированных по имени концепта. С использованием результатов анализа онтологии и сформированной структуры портала модуль „декорирования“ поддерживает пользовательскую сессию посредством запоминания текущей онтологии, выбранного концепта и режима отображения. На основе этих данных отображается общая структура онтологии, статья о выбранном концепте, его формальное описание, результаты поиска по соответствующему запросу в Интернете.

**Интерфейс пользователя.** Пример интерфейса пользователя системы “OntolingeWiki” приведен на рис. 3.

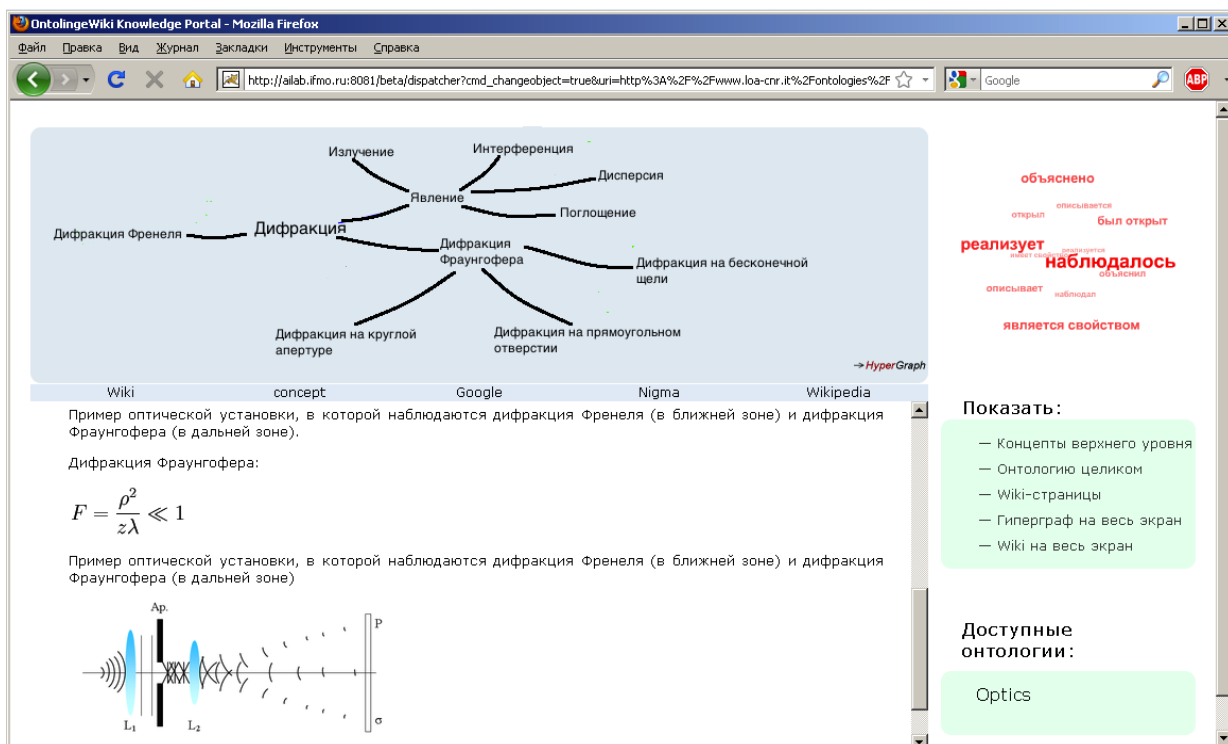


Рис. 3

Для организации данных портала используется блочная верстка. В верхнем блоке отображены средства визуализации структуры портала. Первое средство — это граф концептов, отображающий отношения наследования между классами и отношения принадлежности между классами и индивидами. Узлы графа являются ссылками на соответствующие Wiki-страницы (открываются также внутри портала). Второе средство — это „облако“ типов связей. Входящие в него элементы являются ссылками на страницы с формальным описанием типа связи.

В блоке, расположенном справа, находится меню портала. В нем содержатся основные команды навигации (перейти к главной странице раздела, перейти к описанию онтологии, сменить раздел, перейти к разделу помощи) и команды управления режимом просмотра (показывать только граф, показывать только статью).

В основном блоке в зависимости от режима просмотра могут быть отображены: общие сведения о разделе, описание онтологии или описание конкретного концепта. Описание концепта может быть осуществлено в нескольких режимах:

— формальное описание — в этом режиме отображается информация из онтологии: имя, связи и т.д.;

— Wiki-статья — в этом режиме отображается соответствующая Wiki-страница;

— результаты поиска — здесь отображаются результаты тематического поиска по заранее подготовленному списку источников информации (используется Google Custom Search [16]).

**Заключение.** Возможность доступа к „машиночитаемым“ структурированным данным для всех желающих, обозначившаяся в форме движения Linking Open Data, демонстрирует важность и актуальность интеграции разнородных источников информации в единое семантическое пространство — базу знаний или корпоративную память. Очевидно, что подобное объединение информационных ресурсов позволит поднять многие проекты на качественно новый уровень за счет использования различных источников данных и знаний. Однако для работы в этом новом информационном пространстве требуется построение специализированных систем управления знаниями аналогично тому, как в свое время системы управления данными позволили совершить качественный скачок в работе с базами данных.

Рассмотренные в настоящей статье архитектура и ключевые концепции построения систем управления корпоративными знаниями на базе онтологического моделирования и технологии Wiki были успешно применены на практике при создании прототипа интегрированной среды накопления знаний “OntolingеWiki”. Показано, что успеха при разработке подобного класса систем можно добиться за счет объединения методов и средств формального управления знаниями, включая онтологический инжиниринг, и неформального подхода к структурированию контента, например, на основе открытого Wiki-портала. Система “OntolingеWiki” была успешно реализована и опробована при разработке справочно-обучающего портала по оптике для музея оптических технологий СПбГУ ИТМО [17].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова Т. А., Муромцев Д. И. Интеллектуальные технологии в менеджменте. СПб: Изд-во ВШМ СПбГУ, 2007.
2. Гаврилова Т. А., Горовой В. А., Злобин А. Н. и др. Интеграция Wiki-технологии и онтологического моделирования в задаче управления знаниями предприятия // Тр. 11-й Нац. конф. по искусственному интеллекту „КИИ-2008“. Дубна, 2008. Т. 2. С. 360—368.
3. Gruber T. R. A translation approach to portable ontologies // Knowledge Acquisition. 1993. N 5 (2). P. 199—220.
4. Guarino N., Giaretta P. Ontologies and Knowledge Bases: Towards a Terminological Clarification. Towards Very Large Knowledge Bases: Knowledge Building & Knowledge Sharing. 1995. IOS Press: 25—32 [Электронный ресурс]: <<http://www.loa-cnr.it/Papers/KBKS95.pdf>>.
5. The Wiki Principle. The Economist, 2006 [Электронный ресурс, англ.]: <[http://www.economist.com/surveys/displaystory.cfm?story\\_id=6794228](http://www.economist.com/surveys/displaystory.cfm?story_id=6794228)>.
6. Linking Open Data, 2008 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://esw.w3.org/topic/SweoIG/TaskForces/CommunityProjects/LinkingOpenData/>>.
7. Горовой В. А., Муромцев Д. И. Реализация технологии активного обучения на базе онтологического моделирования // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 2(60). С. 107—114.
8. RUP Glossary 7.2.0. IBM Rational Corp., 2010 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://www-01.ibm.com/software/awdtools/rup/>>.
9. OWL — Web Ontology Language. Overview, 2004 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://www.w3.org/TR/owl-features/>>.
10. DokuWiki, 2010 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://www.dokuwiki.org/dokuwiki>>.

11. Protégé , 2009 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://protege.stanford.edu/>>.
12. Java EE Web Application Technologies, 2010 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://java.sun.com/javaee/technologies/webapps/index.jsp>>.
13. Jena – A Semantic Web Framework for Java, 2010 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://jena.sourceforge.net/>>.
14. The HyperGraph Homepage, 2003 [Электронный ресурс, англ.]: <<http://hypergraph.sourceforge.net/>>.
15. Munzner T. 3D Hyperbolic Quasi-Hierarchical Graphs., 2003 [Электронный ресурс, англ.]: <[http://graphics.stanford.edu/papers/munzner\\_thesis/html/node8.html](http://graphics.stanford.edu/papers/munzner_thesis/html/node8.html)>.
16. Система пользовательского поиска, 2010 [Электронный ресурс]: <<http://www.google.com/cse/>>.
17. Муромцев Д. И., Баландин Е. А., Катков Ю. В., Починок И. Н. Опыт использования онтологий верхнего уровня при проектировании базы знаний музея оптических технологий // Материалы Всерос. конф. „Знания— Онтологии — Теории“ (ЗОНТ-09). Новосибирск, 2009. Т. 1. С. 165—172.

#### *Сведения об авторах*

- Дмитрий Ильич Муромцев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: mouromtsev@mail.ifmo.ru
- Владимир Андреевич Горовой** — Высшая школа менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета, кафедра информационных технологий в менеджменте; ассистент; E-mail: a.malinin@gmail.com
- Алексей Николаевич Злобин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: alexey.zlobin@gmail.com
- Юрий Валериевич Катков** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: ganqturgon@gmail.com
- Ирина Николаевна Починок** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: i.pochinok@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
проектирования компьютерных систем СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
08.02.10 г.

УДК 681.3

С. В. КУЛЕШОВ

## МЕТОД 3D-КОМПРЕССИИ ДАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Предлагается алгоритм компрессии данных компьютерной томографии для создания банков данных томографических исследований и телемедицины. Приводятся схема построения компрессора/декомпрессора и результаты экспериментальной оценки его эффективности.

**Ключевые слова:** компрессия данных, кодек, компьютерная томография, 3D-данные.

**Введение.** Современная томография базируется на использовании серии слоев объекта (двумерных измерений, сделанных под различными углами), позволяющих определить его трехмерную структуру. Такой тип данных может быть сформирован с использованием различного оборудования, в том числе рентгеновских систем и электронных микроскопов.

Одним из наиболее распространенных видов томографических данных являются данные компьютерной томографии, полученные в результате исследований, проводимых на рентгеновском томографе. В типичном случае такие данные представляют собой набор томограмм (слоев)

общим числом до нескольких сотен, при этом каждая томограмма является полутоновым изображением, целочисленные значения яркости точек которого соответствуют относительным плотностям тканей в плоскости сканирования (в единицах Хаунсфилда) [1]. Пример томограммы (одного слоя) приведен на рис. 1. Томографические данные одного исследования, полученные на современных сканерах, могут иметь объем в несколько гигабайт [2].



Рис. 1

Обеспечить долгосрочное хранение (архивирование) и передачу томографических данных, а также удаленный доступ к ним можно путем компрессии (сжатия) данных. Имеющиеся алгоритмы и реализованные на их основе программы ориентированы главным образом на сжатие изображений типа цветных фотографий и не могут быть эффективно использованы для сжатия изображений типа томограмм. Наибольшее распространение получили алгоритмы сжатия цветных изображений с потерями (стандарт JPEG), но эта группа алгоритмов в принципе не применима к задачам, в которых требуется обеспечить сжатие без потерь. Сжатие без потерь может быть осуществлено в рамках стандарта JPEG2000, однако алгоритмы, реализующие этот стандарт, не являются томографически-ориентированными, не учитывают специфику томографических данных и, как следствие, не могут обеспечить высокий коэффициент сжатия и необходимые функциональные свойства.

Все сказанное означает, что задача разработки эффективных методов и алгоритмов сжатия томографических данных является в высшей степени актуальной. Большинство известных методов компрессии объемных томографических данных основаны на реконструкции объемного представления как серии двумерных массивов, причем обработка каждого двумерного массива производится независимо, что ведет к нарушению связности локальных областей. Так, например, методы, разработанные в Институте проблем передачи информации РАН (Москва) [3], основаны на дискретном вейвлет-преобразовании, применяемом к каждому срезу, и обеспечивают компрессию в 1,9—3,0 раз.

В ряде известных алгоритмов процедура сжатия осуществляется за счет устранения корреляционной зависимости между последовательными двумерными массивами (слоями). Так, существуют примеры комплексного подхода к передаче биологических данных [2], основанного на использовании совокупности различных методов (реконструкции объекта, использовании форматов MPEG, использовании распределенных сервисов и др.)

Здесь следует отметить, что для медицинских исследований требуется сохранение локальных особенностей данных. Обработка многомерных данных в виде плоскостного послойного сканирования массивов не обеспечивает трехмерной связности (не обеспечивается изотропия многомерных данных). Соответственно потенциально более эффективными являются методы, основанные на сохранении локальных особенностей данных (обеспечивающие трехмерную связность данных).

**Описание метода.** На общей схеме обработки томографических данных (рис. 2) показано место компрессора/декомпрессора (кодека) в потоке данных, получаемых с использованием

компьютерного томографа. Кодек не зависит от аппаратной составляющей сканера, так как реализует стандартный формат данных DICOM, который поддерживается основными производителями медицинского оборудования и медицинского программного обеспечения.

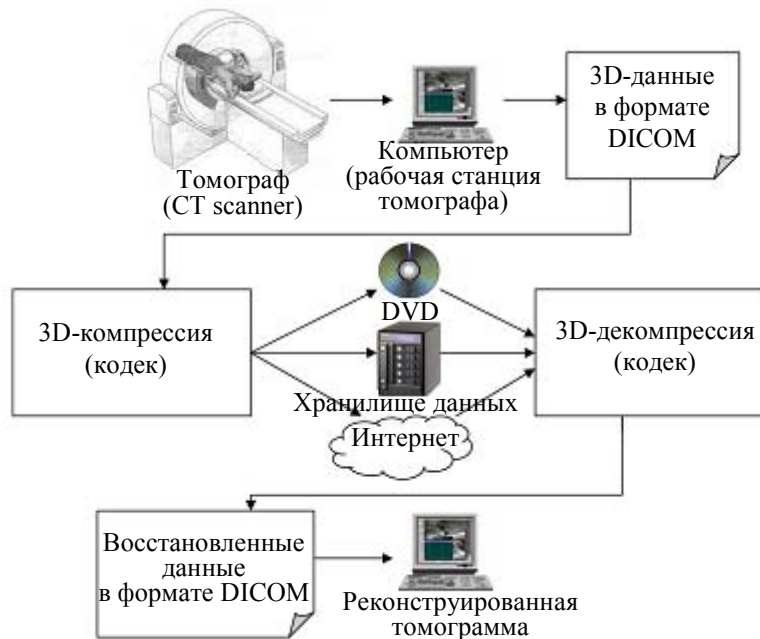


Рис. 2

Реализация предлагаемого метода компрессии осуществляется по схеме, сходной с форматом True3D Vision [4]. Метод основан на разбиении трехмерного (3D) пространства томографических данных (объединенной последовательности срезов) на равные элементы, состоящие из  $N \times N \times N$  точек, при этом компрессия каждого из элементов осуществляется независимо (рис. 3);  $N$  может быть иметь значения 4, 8, 16 в зависимости от реализуемого алгоритма, что влияет на степень компрессии и скорость обработки данных.

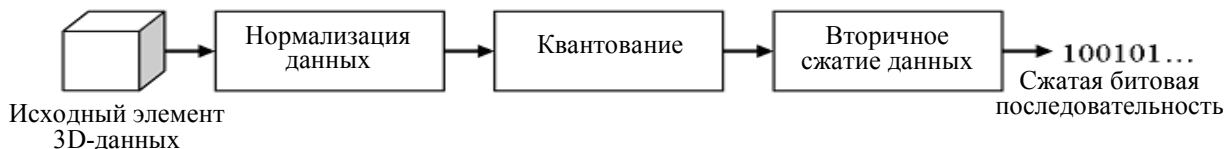


Рис. 3

На первом этапе выполняется нормализация данных (здесь используется терминология, принятая в работе [5]), т.е. преобразование данных, характеризуемое следующими свойствами:

- возможностью взаимно-однозначного обратного восстановления;
- способностью к квантованию (загрублению некоторых элементов пространства данных, т.е. уменьшению количества различных состояний элемента, или их исключению в целях уменьшения битового объема);
- получением данных, обладающих способностью к компрессии, с использованием методов вторичного сжатия [6].

В качестве алгоритмов нормализации могут быть использованы ассоциативно-пирамидальная развертка [7], многомерное дискретное косинусное преобразование [6] и ряд других алгоритмов, обладающих указанными свойствами.

Этап квантования повышает степень компрессии данных в случае, если задача допускает сжатие с потерями [5] (при компрессии томографических данных это приводит к появлению дополнительных артефактов на изображении). Квантование позволяет представить данные с минимально достаточной точностью, которая обеспечивает требуемый уровень качества изображения.

После этапов нормализации и квантования с помощью алгоритмов вторичного сжатия осуществляется компрессия полученных данных. Экспериментально были апробированы алгоритмы Хаффмана, арифметического кодирования, кодирования длинных последовательностей (RLE) и алгоритм сжатия на основе терминальных программ [8].

Наилучшие результаты были получены при следующей схеме построения кодека:

- *размер элемента 3D-пространства данных*:  $16 \times 16 \times 16$  (в случае необходимости увеличения скорости вычисления рекомендуется использовать элементы  $8 \times 8 \times 8$ );
- *алгоритм нормализации данных*: трехмерное дискретное косинусное преобразование (3D DCT) с последующей разверткой с использованием зигзаг-сканирования;
- *квантование*: подбирается экспериментально в соответствии с конкретной задачей;
- *вторичное сжатие*: арифметическое кодирование.

Сжатая битовая последовательность может быть дополнена маркерами, обозначающими каждый из элементов, что увеличивает помехозащищенность при передаче томографических данных в телемедицине (в случае ошибки будет утерян только единичный элемент размером  $N \times N \times N$ ).

В связи с тем, что изменение параметров изображения (например, контрастности) при работе с томограммой уменьшает информационную емкость данных (сокращает количество различимых состояний), для минимизации вносимых искажений используются исходные данные, полученные непосредственно со сканера.

Предварительная оценка степени компрессии для данных, полученных с использованием мультисрезовой компьютерно-томографической системы Toshiba Aquilion 64, при изменении уровня квантования (количества вносимых артефактов) от минимального до максимального показала возможность компрессии от 10 до 120 раз. Данные, использованные в ходе исследования, были получены при следующих параметрах сканирования: 300 мА, 120 кВ, толщина слоя 3 мм, время экспозиции 0,3 с, поле реконструкции (FOV)  $25,4 \times 25,4$  см.

**Заключение.** В настоящее время созданы и очень быстро пополняются многочисленные банки данных томографических исследований, широко используемых в медицине для диагностики, планирования лечения и т. д.

Предложенный метод позволяет производить сжатие томографических данных с динамическим управлением степенью компрессии, что обеспечивает высокую скорость получения предварительных данных, а при необходимости — дополнительную передачу выбранной области изображения с исходным качеством (без применения этапа квантования) во избежание возможного влияния артефактов на постановку диагноза.

Создание централизованных банков данных затруднено в связи с несоответствием объема дисковых накопителей и количеством пациентов. В лучшем случае данные томографического обследования выдаются пациенту в виде DVD-диска, а в худшем удаляются после постановки диагноза. Для наблюдения динамики состояния пациента при лечении требуется сравнение данных обследований, сделанных в различное время. С этой целью возможность ведения централизованного банка данных томографических исследований (даже при компрессии с потерями) является весьма перспективной.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марусина М. Я., Казначеева А. О. Современные виды томографии: Учеб. Пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 132 с.
2. Insley J., Laszewski G., Kesselman C., Thiebaux M. Distance visualization: data exploration on the grid // Computer. 1999. N 12. P. 36—43.
3. Сушко Д. В., Штарьков Ю. М. О сжатии томографических данных // Информационные процессы. 2008. Т. 8, № 4. С. 240—255.

4. Кулешов С. В. Формат представления реальных трехмерных сцен для объемного телевидения (True3D Vision) // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 4. С. 49—52.
5. Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В. Цифровая технология инфокоммуникации. Передача, хранение и семантический анализ текста, звука, видео. СПб: Наука, 2008. 244 с.
6. Кулешов С. В. Пространственно-временное представление, обработка и компрессия видеопотока // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6, № 4. С. 33—37.
7. Кулешов С. В., Зайцева А. А., Аксенов А. Ю. Ассоциативно-пирамидальное представление данных // Там же. 2008. Т. 6, № 4. С. 14—17.
8. Александров В. В., Кулешов С. В. Этерификация и терминальные программы // Там же. 2008. Т. 6, № 10. С. 50—53.

**Сведения об авторе**

**Сергей Викторович Кулешов**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория автоматизации научных исследований; ст. науч. сотрудник; E-mail: kuleshov@iiias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
31.03.10 г.

УДК 53.082.5

М. Е. КОНОНЕНКО, Ю. И. КОПИЛЕВИЧ, Е. И. ЗАДОРОЖНАЯ

## ВЛИЯНИЕ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННОГО ОКЕАНОЛОГИЧЕСКОГО ЛИДАРА

В приближении малоуглового рассеяния для уравнения переноса излучения получены аналитические выражения для характеристик пространственного разрешения авиационного океанологического лидара и скорости затухания лидарного эхо-сигнала с увеличением глубины при произвольном виде индикатрисы рассеяния морской воды. Проведен численный анализ для трех типов воды с использованием полученных Петцольдом экспериментальных данных по измерению функции рассеяния. Результаты сравниваются с расчетами на основе модельной индикатрисы Долина и малоуглового диффузионного приближения. Обсуждается применимость рассмотренных моделей в различных условиях.

**Ключевые слова:** авиационный океанологический лидар, пространственное разрешение, системный показатель ослабления, индикатриса рассеяния, показатель малоуглового рассеяния.

Авиационные системы дистанционного лазерного зондирования океана (океанологические лидары) используются сегодня как для батиметрии прибрежных акваторий и обнаружения малоразмерных объектов в водной толще, так и для восстановления характеристик морской среды и дна по данным лидарных измерений [1, 2]. Важнейшими характеристиками лидара, определяющими его эффективность для перечисленных приложений, являются пространственное разрешение и максимальная глубина зондирования. Эти характеристики зависят как от конструктивных параметров лидарной системы, так и от оптических свойств морской воды [3, 4]. Учет последнего обстоятельства принципиально важен для эффективного планирования лидарного обследования заданной акватории.

Целью настоящей статьи является исследование влияния формы индикатрисы рассеяния в малые углы на пространственное разрешение и скорость затухания лидарного сигнала при увеличении глубины, а также оценка применимости известных модельных индикатрис в различных условиях.



**Пространственное разрешение лидарной системы.** Ограничимся рассмотрением моно-статической лидарной системы (когда оптические оси излучателя и приемника совпадают) и случае зондирования „в надир“. Тогда информативные составляющие мощности излучения на входе фотоприемника лидарной системы — сигнал обратного рассеяния от толщи морской воды  $S_{\text{back}}(t)$  и импульс отражения от дна  $S_{\text{bot}}(t)$  — описываются выражениями [4, 5]

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{back}}(t) &= W \Sigma \Omega \int_0^h dz p \left( t - \frac{2n}{c} z \right) \int d^2 \mathbf{r} G(z, \mathbf{r}) \beta_{\pi}(z, \mathbf{r}); \\ S_{\text{bot}}(t) &= \frac{1}{\pi} W \Sigma \Omega p \left( t - \frac{2n}{c} h \right) \int d^2 \mathbf{r} G(h, \mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

здесь  $t = 0$  соответствует моменту поступления на фотоприемник лидарного отклика от поверхности воды;  $n$  — показатель преломления морской воды;  $c$  — скорость света в вакууме;  $h$  — глубина моря;  $W$  — эффективная энергия зондирующего импульса с учетом ослабления излучения на атмосферной трассе, двукратного прохождения поверхности раздела воздух—вода и потерь в оптической системе;  $\Sigma$  — площадь зрачка лидарного приемника;  $\Omega$  — телесный угол поля приемной системы, „приведенный“ к водной среде:  $\Omega = \pi \left( \frac{\text{FOV}}{2n} \right)^2$ , где

FOV — плоский угол поля зрения приемника;  $p(t)$  — эффективная форма зондирующего импульса (учитывающая вид излучаемого лазерного импульса и функцию отклика приемного тракта [4, 5]):  $p(t) = 0$  при  $t < 0$ ,  $\int_0^{\infty} p(t) dt = 1$ ;  $\beta_{\pi}$  и  $\rho$  — показатель обратного рассеяния морской воды и коэффициент ламбертовского отражения дна соответственно.

Из формул (1) видно, что разрешение лидарной системы в вертикальном направлении (в частности, точность определения глубины) характеризуется длительностью зондирующего импульса, тогда как горизонтальное разрешение определяется функцией  $G(z, \mathbf{r})$  — распределением чувствительности лидарного сигнала к неоднородностям показателя обратного рассеяния и неоднородностям коэффициента отражения дна в плоскости  $z = \text{const}$ . В качестве меры пространственного разрешения лидара в горизонтальной плоскости целесообразно выбрать эффективный радиус  $R(z)$ , определяемый соотношением

$$\pi R^2(z) G(z, 0) = \int d^2 \mathbf{r} G(z, \mathbf{r}). \quad (2)$$

Функция  $G(z, \mathbf{r})$  может быть выражена как [4—6]

$$G(z, \mathbf{r}) = E_e(z, \mathbf{r}) \cdot E_r(z, \mathbf{r}), \quad (3)$$

где  $E_e(z, \mathbf{r})$  — распределение освещенности, создаваемой стационарным зондирующим пучком излучения единичной мощности в плоскости  $z = \text{const}$ :  $E_r(z, \mathbf{r})$  — освещенность, создаваемая „фиктивным“ пучком единичной мощности с геометрическими параметрами (исходным радиусом и расходимостью), равными соответствующим параметрам приемной системы.

В приближении малоуглового рассеяния [6, 7] освещенности  $E_{e,r}(z, \mathbf{r})$  выражаются через яркости  $I_{e,r}(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_{\perp})$  соответствующих пучков ( $\mathbf{n}_{\perp}$  — горизонтальная проекция единичного вектора направления) соотношениями

$$E_{e,r}(z, \mathbf{r}) = \int I_{e,r}(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_{\perp}) d^2 \mathbf{n}_{\perp}. \quad (4)$$

Функции  $I_{e,r}(z, \mathbf{r}, \mathbf{n}_{\perp})$  являются решениями малоуглового уравнения переноса излучения [6, 7] в полупространстве  $0 \leq z < \infty$ , причем распределения яркостей на границе  $z = 0$  целесообразно задать в виде [4, 6]

$$\left. \begin{aligned} I_e(0, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) &= \frac{4}{\pi H^2 \text{Div}^2} \exp\left(-\frac{4\mathbf{r}^2}{H^2 \text{Div}^2}\right) \delta_2\left(\mathbf{n}_\perp - \frac{\mathbf{r}}{nH}\right); \\ I_r(0, \mathbf{r}, \mathbf{n}_\perp) &= \frac{4}{\pi H^2 \text{FOV}^2} \exp\left(-\frac{4\mathbf{r}^2}{H^2 \text{FOV}^2}\right) \delta_2\left(\mathbf{n}_\perp - \frac{\mathbf{r}}{nH}\right), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $H$  — высота носителя лидара над уровнем моря,  $\text{Div}$  — расходимость освещающего пучка,  $\delta_2$  — двумерная дельта-функция.

При описании распространения светового пучка в морской воде в приближении малоуглового рассеяния индикатрису рассеяния среды  $x(\vartheta)$  естественно представлять суммой малоуглового и изотропного компонентов [6, 8]:

$$x(\vartheta) = \left(1 - 2\frac{b_b}{b}\right) x_f(\vartheta) + 2\frac{b_b}{b}, \quad (6)$$

где  $b$  — показатель рассеяния,  $b_b$  — показатель рассеяния назад; индикатриса рассеяния  $x_f(\vartheta)$  отлична от нуля лишь для малых углов  $\vartheta$ ; здесь и далее оптические характеристики среды полагаем не зависящими от координат.

Используя известное аналитическое решение малоуглового уравнения переноса излучения [4, 6] с граничным условием вида (5), с учетом соотношений (3) и (4) получаем

$$\left. \begin{aligned} G(z, \mathbf{r}) &= \frac{\exp(-2a_1 z)}{(2\pi)^2} g(z, r, \text{Div}) g(z, r, \text{FOV}), \\ g(z, r, \Theta) &= \int_0^\infty J_0(kr) \exp\left[-a_f(kz)z - k^2 \Theta^2 \left(\frac{nH+z}{4n}\right)^2\right] k dk. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь  $a_1 = a + 2b_b$  — эффективный показатель поглощения, где  $a$  — показатель поглощения;  $b_1 = b - 2b_b$  — показатель рассеяния на малые углы. Функция

$$a_f(zk) = \frac{b_1}{2zk} \int_0^{zk} [2 - \tilde{x}_f(s)] ds,$$

где  $\tilde{x}_f(s) = \int_0^\infty x_f(\vartheta) J_0(s\vartheta) \vartheta d\vartheta$  — преобразование Фурье — Бесселя от малоугловой части индикатрисы  $x_f(\vartheta)$ , характеризует вклад малоуглового рассеяния в показатель ослабления пространственной гармоники с частотой  $k$  исходного распределения яркости на трассе распространения длиной  $z$  [9].

Подстановка формулы (7) в соотношение (2) приводит к следующему выражению:

$$\left. \begin{aligned} R^2(z) &= 2 \frac{f\left(z, \sqrt{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2}\right)}{g(z, 0, \text{Div}) g(z, 0, \text{FOV})}, \\ f(z, \Theta) &= \int_0^\infty \exp\left[-2a_f(kz)z - k^2 \Theta^2 \left(\frac{nH+z}{4n}\right)^2\right] k dk. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

**Затухание лидарного сигнала при увеличении глубины.** Для однородной среды, когда  $\beta_\pi$  и  $\rho$  не зависят от координат, затухание лидарного сигнала при увеличении глубины принято характеризовать величиной так называемого „системного показателя ослабления“  $K_{\text{sys}}(z)$  [4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{back}}(t) &= \beta_{\pi} W \frac{\text{FOV}^2}{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2} \int_0^h dz p\left(t - \frac{2n}{c} z\right) \Omega'(z) \exp[-zK_{\text{syst}}(z)]; \\ S_{\text{bot}}(t) &= \frac{\rho}{\pi} W \frac{\text{FOV}^2}{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2} p\left(t - \frac{2n}{c} h\right) \Omega'(h) \exp[-hK_{\text{syst}}(h)], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где  $\Omega'(z) = \frac{\Sigma}{(Hn + z)^2}$  — телесный угол, под которым зрачок приемной системы виден из

точки рассеяния на глубине  $z$ .

Сравнивая выражения (9) с уравнениями (1) и используя формулы (7), для системного показателя ослабления получаем выражение

$$K_{\text{syst}}(z) = 2a_1 - \frac{1}{z} \ln \left\{ 2 \int_0^{\infty} \exp \left[ -2za_f \left( \frac{4nkz}{(Hn + z)\sqrt{\text{Div}^2 + \text{FOV}^2}} \right) - k^2 \right] k dk \right\}. \quad (10)$$

Отметим, что в отсутствие малоуглового рассеяния, т.е. при  $a_f \equiv 0$ , имеем  $K_{\text{syst}}(z) \equiv K_{\text{syst}}(0) = 2a_1$ .

**Анализ влияния формы индикатрисы рассеяния.** Для численного анализа полученных выражений воспользуемся данными проведенных Петцольдом измерений объемных функций рассеяния  $\beta(\vartheta)$  для трех типов морской воды — “clear ocean”, “coastal ocean” и “turbid harbor” [10, 11]; описание метода и результаты расчета входящих в формулы (8) и (10) функций  $a_f(k)$  для этих типов воды приведены в работе [9].

Результаты вычисления эффективного радиуса  $R(z)$  области чувствительности [см. уравнения (8)] и относительной величины вклада малоуглового рассеяния в системный показатель ослабления лидарного сигнала

$$K_f(z) = [K_{\text{syst}}(z) - 2a_1] (2a_1)^{-1}$$

для указанных типов морской воды приведены на рис. 1 и 2. Расчеты проведены для одного значения расходимости зондирующего пучка  $\text{Div} = 5$  мрад и двух значений угла поля зрения лидарной системы:  $\text{FOV} = 40$  мрад и  $\text{FOV} = 2$  мрад, характерных для „широкопольных каналов“ известных лидарных систем [12] и „узкопольных“ лидаров [13] соответственно.

На рис. 1 и 2 представлены также результаты расчета рассматриваемых характеристик для двух модельных индикатрис [6, 7, 14] — индикатрисы Долина

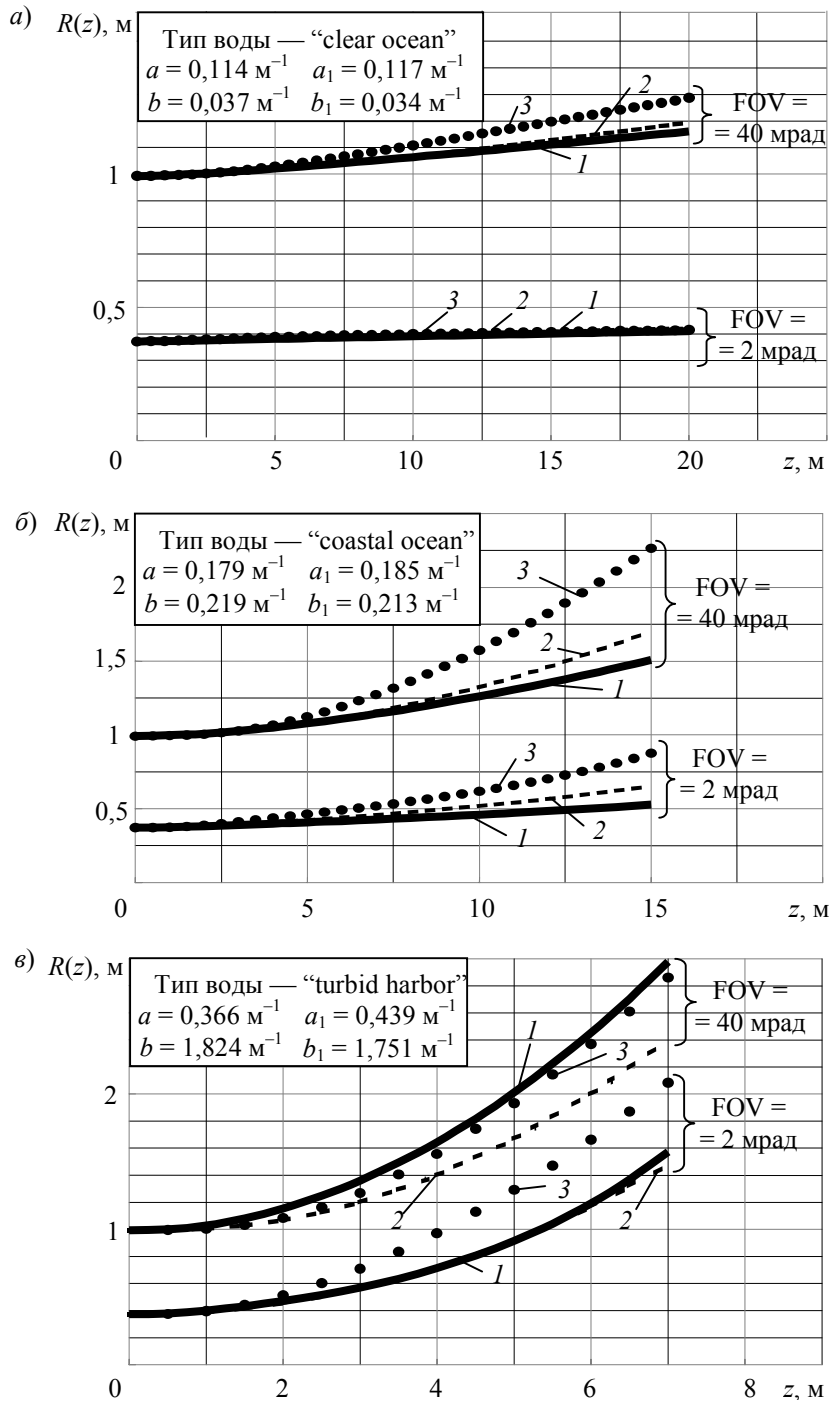
$$x_f^{\text{д}}(\vartheta) = \frac{2\alpha}{\vartheta} \exp(-\alpha\vartheta), \quad \tilde{x}_f^{\text{д}}(s) = \frac{2}{\sqrt{1 + (s/\alpha)^2}} \quad (11)$$

и так называемой „диффузионной“ индикатрисы, бesselев образ  $\tilde{x}_f^{\text{д}}(s)$  которой формируется из уравнения (11) при сохранении лишь первых двух членов разложения в ряд Тейлора по  $s/\alpha$ :

$$\tilde{x}_f^{\text{д}}(s) = \begin{cases} 2 - (s/\alpha)^2, & 0 \leq s < \sqrt{2} \cdot \alpha; \\ 0, & s \geq \sqrt{2} \cdot \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

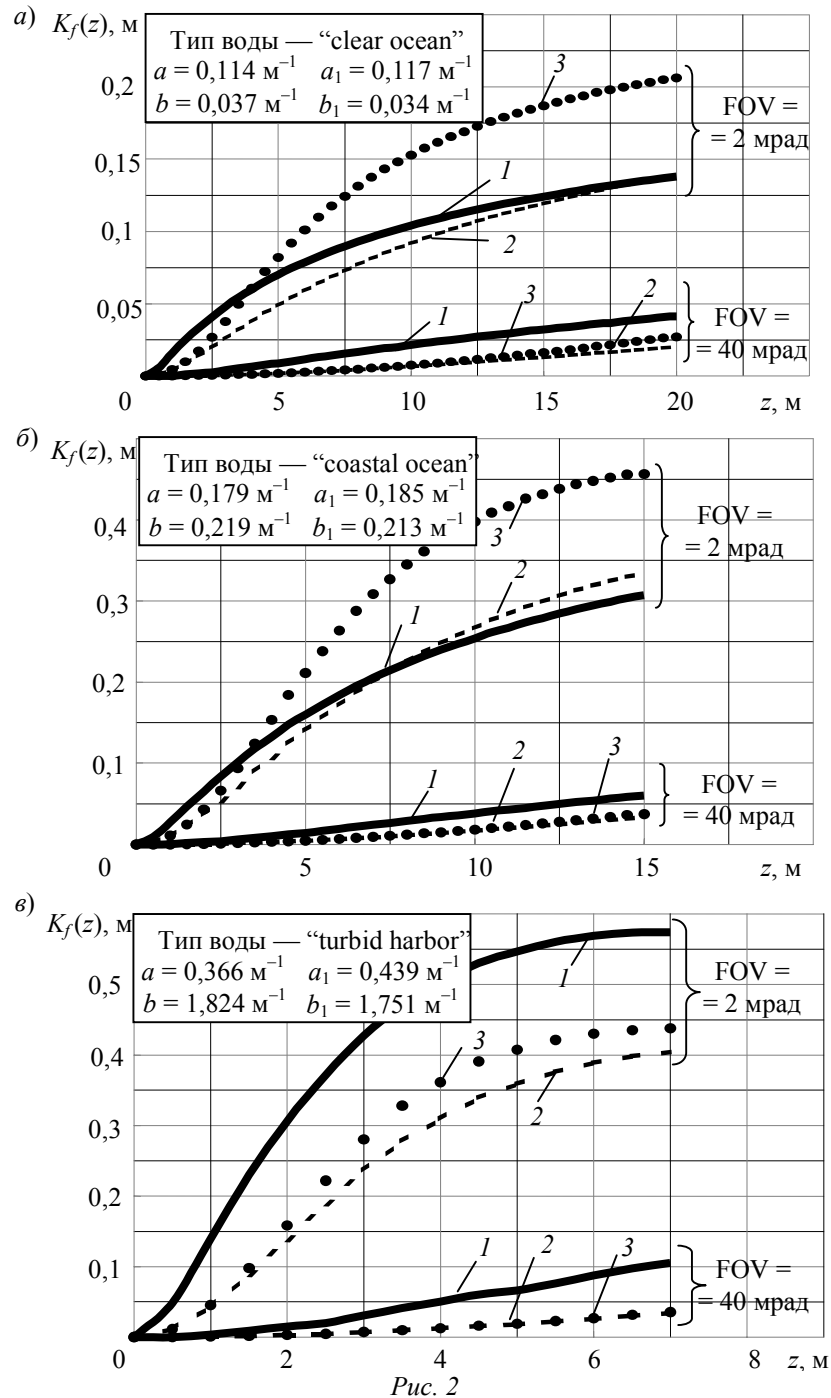
Применение индикатрисы (11) эквивалентно использованию диффузионного малоуглового приближения в задаче переноса излучения [6]. Параметр  $\alpha$  в модельных индикатрисах (11) и (12) для каждого из типов воды определялся по соответствующему значению среднего косинуса угла рассеяния [14]:  $\alpha = [0,142 - 0,132\overline{\cos\theta}]^{-1/2}$ .

На рис. 1 и 2 кривые 1 соответствуют экспериментальным индикатрисам Петцольда, кривые 2 — модельным индикатрисам Долина, кривые 3 — „диффузионным“ индикатрисам.



Как видно из рис. 1, применение модельной индикатрисы Долина (11) для расчета величины  $R(z)$  приводит к результатам (см. рис. 1, а—в, кривые 2), отличающимся не более чем на 20 % от результатов расчетов по экспериментальным индикатрисам Петцольда (кривые 1) практически во всем диапазоне глубин; при этом в случае чистой воды (“clear ocean”, см. рис. 1, а) расхождения пренебрежимо малы, а максимальные ошибки наблюдаются на предельных глубинах в мутной воде (“turbid harbor”, см. рис. 1, в) для широкопольного лидара. Результаты расчета  $R(z)$  с применением „диффузионной“ индикатрисы (12) демонстрируют максимальные отклонения (более 50 %) от данных, соответствующих экспериментальной индикатрисе, для „промежуточного“ типа морской воды (“coastal ocean”, см. рис. 1, б).

Как показывают результаты вычисления вклада малоуглового рассеяния в системный показатель ослабления лидарного сигнала при увеличении глубины (см. рис. 2, а—в),



этот вклад особенно существенен для узкопольного лидара в случае мутной воды (см. рис. 2, в); применение любой из двух модельных индикатрис в этом случае приводит к заниженным (до 50 %) значениям величины  $K_f$  уже на сравнительно небольших глубинах. При моделировании лидарного сигнала в более чистых водах (см. рис. 2, а, б) модельная индикатриса Долина обеспечивает приемлемую точность расчетов  $K_f(z)$ , тогда как применение „диффузионной“ индикатрисы оправдано лишь для оценки затухания сигналов широкопольного лидара.

Полученные результаты показывают, что в общем случае при расчете характеристик лидара (изменения области чувствительности и показателя ослабления лидарного сигнала при увеличении глубины) требуется учитывать конкретную форму индикатрисы в области

малых углов рассеяния; применение модельных индикатрис с единственным варьируемым параметром (индикатрис Долина и „диффузионной“) может приводить к существенным ошибкам.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feigels V. I., Kopilevich Yu. I.* Laser remote sensing of natural waters: from theory to practice // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2964. 216 p.
2. *Tuell G., Feigels V., Kopilevich Yu.* Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): II. Practical results and comparison with independent data // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5885. P. 115—27.
3. *Feigels V., Kopilevich Yu.* Ocean-Scientific for Windows. Basic Concepts. Description of the Theory. EG&G Washington Analytical Service, Inc., 1993. 52 p.
4. *Копилевич Ю. И., Сурков А. Г.* Математическое моделирование входных сигналов авиационных океанологических лидаров // Опт. журн. 2008. Т. 75, № 5. С. 45—51.
5. *Tuell G., Feigels V., Kopilevich Yu., Surkov A. G.* Measurement of ocean water optical properties and seafloor reflectance with scanning hydrographic operational airborne lidar survey (SHOALS): I. Theoretical background // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5885. P. 106—14.
6. *Долин Л. С., Левин И. М.* Справочник по теории подводного видения. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 229.
7. Оптика океана. Т.1. Физическая оптика океана / Под ред. А. С. Молина. М.: Наука, 1983. С. 351.
8. *Dolina I. S., Dolin L. S., Levin I. M., Rodionov A. A.* Diagnostic abilities of oceanic lidar // Proc. of the III Intern. Conf. “Current Problems of Natural Waters”. St. Petersburg, 2005. P. 220—225.
9. *Копилевич Ю. И., Кононенко М. Е., Задорожная Е. И.* Влияние индикатрисы рассеяния вперед на характеристики светового пучка в морской воде // Опт. журн. 2010. Т. 77б, № 10. С. 10—14.
10. *Petzold T. J.* Volume scattering functions for selected ocean waters // Scripps Institution of Oceanography, UCSD. 1972. 79 p.
11. *Mobley C. D.* Optical properties of water // Handbook of Optics / Ed. M. Bass. McGraw-Hill, Inc., 1994. P. 43.3—43.56.
12. *Долин Л. С., Копилевич О. В., Левин И. М., Фейгельс В. И.* Малопараметрические модели световых полей в море и интегральные характеристики индикатрис рассеяния воды // Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, № 11. С. 1218—1222.
13. *Feigels V., Kopilevich Yu., Tuell G. et al.* Water optical properties and bottom reflectance measurement with SHOALS 1000/3000 bathymetric system // Proc. of the III Intern. Conf. “Current Problems of Natural Waters”. St. Petersburg, 2005. P. 254—259.
14. *Feigels V., Wright C., Kopilevich Yu., Surkov A.* Narrow field-of-view bathymetric lidar: Theory and field test // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5155. P. 1—11.

#### Сведения об авторах

- Михаил Евгеньевич Кононенко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики; E-mail: mihailkon@yandex.ru
- Юрий Исаакович Копилевич** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: yurikopilevich@gmail.com
- Екатерина Ивановна Задорожная** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра фотоники и оптоинформатики; E-mail: cattie@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерных технологий и  
экологического приборостроения

Поступила в редакцию  
17.06.10 г.

С. Н. ВОРОБЬЕВ, Н. В. ГИРИНА, Л. А. ОСИПОВ

## ГАУССОВЫ МАРКОВСКИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Устанавливается свойство  $(2k+1)$ -диагональности матрицы точности гауссовой марковской последовательности  $k$ -го порядка. Немарковские процессы аппроксимируются марковскими последовательностями путем сохранения главных диагоналей матрицы точности.

**Ключевые слова:** гауссова марковская последовательность, свойство  $(2k+1)$ -диагональности матрицы, матрица точности, последовательности  $k$ -го порядка.

**Введение.** В соответствии с классификацией марковских процессов [1] стационарная гауссова марковская последовательность может быть задана множеством отсчетов  $\mathbf{X}^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  стационарного процесса  $x(t) \in N(m, R(\tau))$ , взятых с интервалом дискретизации  $\Delta$ ; здесь  $m$  — математическое ожидание,  $R(\tau)$  — функция корреляции. Такая модель описывает, например, дискретизированный во времени шум на входе радиоэлектронной системы. Марковские последовательности в общем случае характеризуются условными функциями распределения и плотностями распределения переходов [1]. Для нормального распределения значений отсчетов можно получить другое описание марковских последовательностей, позволяющее рассчитывать условные корреляционные матрицы и генерировать марковские последовательности на компьютере.

Марковская последовательность  $k$ -го порядка (сложная последовательность [1]) определяется условной плотностью распределения

$$f(x_{p+1}, \dots, x_n | x_1, \dots, x_p) = f(x_{p+1}, \dots, x_n | x_{p-k+1}, \dots, x_p), \quad (1)$$

т.е. зависимостью от  $k$  предыдущих значений.

Общими для гауссовых последовательностей, в том числе марковских, являются соотношения для  $n$ -мерного нормального распределения [2]: разделению  $n \times 1$ -вектора отсчетов  $\mathbf{X} \in N(\mathbf{M}, \mathbf{B})$  на  $\mathbf{X}_1^T = [x_1 \dots x_k]$  и  $\mathbf{X}_2^T = [x_{k+1} \dots x_n]$  соответствует разбиение корреляционной матрицы  $\mathbf{B}$  на блоки:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{B}_{11}$ ,  $\mathbf{B}_{22}$  — корреляционные матрицы первых  $k$  и последних  $n-k$  отсчетов.

Вектор математических ожиданий  $\mathbf{M} | \mathbf{X}_1$  и корреляционная матрица  $\mathbf{B}_C = \mathbf{B} | \mathbf{X}_1$  условной плотности распределения  $f(\mathbf{X}_2 | \mathbf{X}_1)$  определяются как

$$\mathbf{M} | \mathbf{X}_1 = \mathbf{M}_2 + \mathbf{C}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{M}_1); \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_C = \mathbf{B} | \mathbf{X}_1 = \mathbf{B}_{22} - \mathbf{C}\mathbf{B}_{12};$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}_{21}\mathbf{B}_{11}^{-1}, \quad (4)$$

а математические ожидания  $\mathbf{M}^T = [\mathbf{M}_1^T; \mathbf{M}_2^T] = [m_1, \dots, m_k; m_{k+1}, \dots, m_n]$ .

**Гауссовы марковские последовательности первого порядка.** Корреляционная матрица  $\mathbf{B}$  последовательности  $\mathbf{X}$ , полученной дискретизацией стационарного марковского процесса первого порядка, имеет вид [3]

$$\mathbf{B} = \sigma^2 \begin{bmatrix} 1 & b & b^2 & \dots & b^{n-1} \\ b & 1 & b & \dots & b^{n-2} \\ b^2 & b & 1 & \dots & b^{n-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b^{n-1} & \dots & b^2 & b & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $b = k(\Delta)$  — коэффициент корреляции между соседними значениями матрицы,  $\sigma^2$  — дисперсия.

Действительно, если матрицу (5) подвергнуть согласно уравнению (1) такому разбиению, что  $\mathbf{B}_{22} = b_{22} = \sigma^2$  (с выделением последних строки и столбца), то нетрудно увидеть, что матрица, обратная блоку  $\mathbf{B}_{11}$ , трехдиагональна:

$$\mathbf{B}_{11}^{-1} = \frac{\sigma^{-2}}{1-b^2} \begin{bmatrix} 1 & -b & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -b & 1+b^2 & -b & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -b & 1+b^2 & -b & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -b & 1+b^2 & -b & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -b & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

блок  $\mathbf{B}_{21} = \sigma^2 [b^{n-1} \quad b^{n-2} \quad \dots \quad b]$ , так что вектор (4), определяющий условное математическое ожидание (3),

$$\mathbf{C} = \mathbf{B}_{21} \mathbf{B}_{11}^{-1} = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad b]$$

имеет один последний ненулевой элемент, равный  $b$ , а предыдущие  $n-2$  элемента равны нулю.

Зависимость условного математического ожидания от одного последнего предыдущего значения характеризует одну из особенностей марковского процесса первого порядка [1].

Рассмотрим частный случай:  $b = e^{-\alpha|\Delta|}$  — марковский гауссов процесс с экспоненциальной функцией корреляции (первая теорема Дж. Дуба [1]).

Для двух последних значений  $x_{n-1}$ ,  $x_n$  при фиксированных  $x_1, \dots, x_{n-2}$  блоки

$$\mathbf{B}_{21} = \sigma^2 \begin{bmatrix} b^{n-2} & b^{n-3} & \dots & b \\ b^{n-1} & b^{n-2} & \dots & b^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{12} = \mathbf{B}_{21}^T, \quad \mathbf{B}_{22} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & b \\ b & \sigma^2 \end{bmatrix},$$

матрица (4)

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & b \\ 0 & 0 & \dots & 0 & b^2 \end{bmatrix}$$

также определяет зависимость вектора условных математических ожиданий (3) от одного последнего фиксированного  $x_{n-2}$ . При фиксированных первых  $k$  значениях последовательности  $(n-k) \times k$ -матрица  $\mathbf{C}$  для последующих  $n-k$  значений равна



$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & b \\ 0 & 0 & \dots & 0 & b^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & b^{n-k} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Матрица (7) по сути является матрицей связи наблюдаемых значений с предыдущими.

Фундаментальное свойство марковских последовательностей заключается в том, что любая подпоследовательность является марковской [1]. Следовательно, блок  $\mathbf{V}_{11}$ , так же как матрица  $\mathbf{V}$ , есть корреляционная матрица марковской последовательности первого порядка (укороченной по сравнению с исходной). Таким образом, марковская последовательность может описываться обратной матрицей  $\mathbf{D} = \mathbf{V}^{-1}$  (матрицей точности [2]) вида (6), как и корреляционной матрицей. Однако матрица точности марковской последовательности первого порядка имеет характерную форму — она трехдиагональна. Переход от описания последовательности корреляционной матрицей к описанию матрицей точности позволяет сформулировать необходимый признак принадлежности стационарной гауссовой последовательности классу марковских первого порядка [3]: трехдиагональность матрицы точности  $\mathbf{D}$ .

Если матрицы  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{D}$  разбиты на блоки

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11} & \mathbf{V}_{12} \\ \mathbf{V}_{21} & \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \mathbf{D}_{21} & d_{22} \end{bmatrix},$$

соответствующие условной плотности  $f(x_n | x_1, \dots, x_{n-1})$ , их произведение (единичная матрица) равно

$$\mathbf{VD} = \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11}\mathbf{D}_{11} + \mathbf{V}_{12}\mathbf{D}_{21} & \mathbf{V}_{11}\mathbf{D}_{12} + \mathbf{V}_{12}d_{22} \\ \mathbf{V}_{21}\mathbf{D}_{11} + \sigma_n^2\mathbf{D}_{21} & \mathbf{V}_{21}\mathbf{D}_{12} + \sigma_n^2d_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{11} & \mathbf{I}_{12} \\ \mathbf{I}_{21} & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{I}_{21}$ ,  $\mathbf{I}_{12}$  — строка и столбец нулей,  $\mathbf{I}_{11}$  — единичная  $(n-1)$ -матрица,  $d_{22}$  — последний элемент матрицы точности.

Матрица связи  $\mathbf{C} = \mathbf{V}_{21}\mathbf{V}_{11}^{-1}$ , так что  $\mathbf{V}_{21} = \mathbf{C}\mathbf{V}_{11}$ ; условная дисперсия

$$\sigma_{nC}^2 = \sigma_n^2 | x_1, \dots, x_{n-1} = \sigma_n^2 - \mathbf{C}\mathbf{V}_{12},$$

так что  $\mathbf{C}\mathbf{V}_{12} = \sigma_n^2 - \sigma_{nC}^2$ . В матричном уравнении (8) одно из соотношений  $\mathbf{V}_{11}\mathbf{D}_{11} + \mathbf{V}_{12}\mathbf{D}_{21} = \mathbf{I}$  определяет равенство  $\mathbf{V}_{11}\mathbf{D}_{11} = \mathbf{I} - \mathbf{V}_{12}\mathbf{D}_{21}$ . Другое соотношение, таким образом, записывается как

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{21}\mathbf{D}_{11} + \sigma_n^2\mathbf{D}_{21} &= \mathbf{C}\mathbf{V}_{11}\mathbf{D}_{11} + \sigma_n^2\mathbf{D}_{21} = \mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{V}_{12}\mathbf{D}_{21}) + \sigma_n^2\mathbf{D}_{21} = \\ &= \mathbf{C} - (\sigma_n^2 - \sigma_{nC}^2)\mathbf{D}_{21} + \sigma_n^2\mathbf{D}_{21} = \mathbf{C} + \sigma_{nC}^2\mathbf{D}_{21} = \mathbf{0}, \end{aligned}$$

т.е. матрица

$$\mathbf{C} = -\sigma_{nC}^2\mathbf{D}_{21} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad a]$$

характеризует отличие от нуля одного последнего элемента в векторе связи, определяющее первый порядок последовательности. Так как вектор  $\mathbf{D}_{21}$  подобен вектору  $\mathbf{C}$  при трехдиагональной матрице точности, свойство ее трехдиагональности является также достаточным признаком первого порядка марковской последовательности.

Свойство трехдиагональности распространяется на нестационарные последовательности, корреляционная матрица которых имеет вид

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & b\sigma_1\sigma_2 & b^2\sigma_1\sigma_3 & \dots & b^{n-1}\sigma_1\sigma_n \\ b\sigma_2\sigma_1 & \sigma_2^2 & b\sigma_2\sigma_3 & \dots & b^{n-2}\sigma_2\sigma_n \\ b^2\sigma_3\sigma_1 & b\sigma_3\sigma_2 & \sigma_3^2 & \dots & b^{n-3}\sigma_3\sigma_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b^{n-1}\sigma_n\sigma_1 & \dots & \dots & b\sigma_n\sigma_{n-1} & \sigma_n^2 \end{bmatrix}, \sigma_i \neq \sigma_j,$$

а матрица точности, подобно матрице (6), трехдиагональна с элементами главной диагонали  $\{\sigma_1^{-2} \quad (1+b^2)\sigma_2^{-2} \quad \dots \quad (1+b^2)\sigma_{n-1}^{-2} \quad \sigma_n^{-2}\} / (1-b^2)$  и элементами следующих диагоналей  $d_{ij} = -b\sigma_i^{-1}\sigma_j^{-1} / (1-b^2)$ , где  $i, j$  — номера строк и столбцов.

Например, пусть корреляционная матрица  $\mathbf{B}$  стационарной последовательности трансформируется в матрицу  $\mathbf{B}_m$  последовательности с переменной дисперсией:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & b & b^2 & b^3 \\ b & 1 & b & b^2 \\ b^2 & b & 1 & b \\ b^3 & b^2 & b & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 1 & 2b & 3b^2 & 4b^3 \\ 2b & 4 & 6b & 8b^2 \\ 3b^2 & 6b & 9 & 12b \\ 4b^3 & 8b^2 & 12b & 16 \end{bmatrix},$$

тогда матрица точности трехдиагональна:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{1-b^2} \begin{bmatrix} 1 & -b/2 & 0 & 0 \\ -b/2 & (1+b^2)/4 & -b/6 & 0 \\ 0 & -b/6 & (1+b^2)/9 & -b/12 \\ 0 & 0 & -b/12 & 1/16 \end{bmatrix}.$$

Использование соотношения (8) позволяет получить еще один результат. Из равенства  $\mathbf{B}_{21}\mathbf{D}_{12} + \sigma_n^2 d_{22} = 1$  следует

$$\sigma^2 = \frac{1 - \mathbf{B}_{21}\mathbf{D}_{12}}{d_{22}};$$

условная дисперсия значения  $x_n$  равна

$$\sigma_{nC}^2 = \sigma^2 - \mathbf{B}_{21}\mathbf{B}_{11}^{-1}\mathbf{B}_{12} = \frac{1}{d_{22}} - \frac{\mathbf{B}_{21}\mathbf{D}_{12} + d_{22}\mathbf{B}_{21}\mathbf{B}_{11}^{-1}\mathbf{B}_{12}}{d_{22}}. \quad (9)$$

Из равенства  $\mathbf{B}_{11}\mathbf{D}_{12} + d_{22}\mathbf{B}_{12} = \mathbf{I}_{12} = \mathbf{0}$  следует

$$\mathbf{D}_{12} = -d_{22}\mathbf{B}_{11}^{-1}\mathbf{B}_{12}. \quad (10)$$

Подстановка уравнения (10) в формулу (9) дает соотношение для условной дисперсии

$$\sigma_{nC}^2 = \frac{1}{d_{22}} - \frac{-d_{22}\mathbf{B}_{21}\mathbf{B}_{11}^{-1}\mathbf{B}_{12} + d_{22}\mathbf{B}_{21}\mathbf{B}_{11}^{-1}\mathbf{B}_{12}}{d_{22}} = \frac{1}{d_{22}},$$

которая обратна последнему элементу матрицы точности.

Этот результат справедлив также для нестационарных марковских последовательностей. Так, в предыдущем примере для  $b = 1/2$  матрица связи

$$\mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 2/3], \quad d_{22} = 1/12,$$

условная дисперсия

$$\sigma_{4\mathbf{C}}^2 = d_{22}^{-1} = \sigma_4^2 - \mathbf{C}\mathbf{B}_{12} = 16 - 4 = 12.$$

**Гауссовы марковские последовательности  $k$ -го порядка.** Марковская последовательность  $k$ -го порядка определяется как последовательность с условной плотностью распределения (1), т.е. последние значения зависят от  $k$  предыдущих [1]. Такая зависимость задает общий вид матрицы связи (4): в ней отличен от нуля хотя бы один элемент каждого из  $k$  последних столбцов:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & c_{1(p-k+1)} & \dots & c_{1p} \\ 0 & \dots & 0 & c_{2(p-k+1)} & \dots & c_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & c_{(n-p)(p-k+1)} & \dots & c_{(n-k)p} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Например, при наблюдении семи значений процесса третьего порядка с нулевыми средними математическое ожидание (3) шестого и седьмого значений равно

$$\mathbf{M}[x_6, x_7 | x_1, \dots, x_5] = \mathbf{C}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} c_{13}x_3 + c_{14}x_4 + c_{15}x_5 \\ c_{23}x_3 + c_{24}x_4 + c_{25}x_5 \end{bmatrix},$$

так как матрица связи (11) имеет вид

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ 0 & 0 & c_{23} & c_{24} & c_{25} \end{bmatrix}.$$

При умножении (8) блочных матриц  $\mathbf{B}\mathbf{D} = \mathbf{I}$  одна их четырех сумм

$$\mathbf{B}_{21}\mathbf{D}_{12} + \mathbf{B}_{22}\mathbf{D}_{22} = \mathbf{I},$$

где  $\mathbf{I}$  —  $(n-p) \times (n-p)$ -единичная матрица ( $p$  первых значений фиксированы). Отсюда

$$\mathbf{B}_{22} = \mathbf{D}_{22}^{-1}(\mathbf{I} - \mathbf{B}_{21}\mathbf{D}_{12}); \quad \mathbf{D}_{22}^{-1} = \mathbf{B}_{22} + \mathbf{D}_{22}^{-1}\mathbf{B}_{21}\mathbf{D}_{12}, \quad (12)$$

следовательно, для матрицы связи и условной корреляционной матрицы имеют место соотношения

$$\mathbf{C} = -\mathbf{D}_{22}^{-1}\mathbf{D}_{21}; \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_{\mathbf{C}} = \mathbf{D}_{22}^{-1}, \quad (14)$$

так как в этом случае условная корреляционная матрица  $\mathbf{B}_{\mathbf{C}} = \mathbf{B}_{22} - \mathbf{C}\mathbf{B}_{12}$  и матрица (12) равны. Таким образом, если элементы  $l$  первых столбцов матрицы  $\mathbf{D}_{21}$  равны нулю, а элементы матрицы  $\mathbf{D}_{22}^{-1}$  отличны от нуля, матрица (13) имеет вид матрицы  $\mathbf{D}_{21}$ :  $l$  первых столбцов нулевые. Равенство (14) в общем случае справедливо для уравнения (9).

На основе этих результатов в работе [3] формулируется утверждение о том, что матрица точности марковской последовательности  $k$ -го порядка имеет  $2k+1$  главных (ненулевых) диагоналей (остальные элементы матрицы точности равны нулю).

Необходимость  $(2k+1)$ -диагональности матрицы точности следует из того, что ее блок  $\mathbf{D}_{21}$  при  $k < p$  имеет  $p-k$  первых нулевых и  $k$  ненулевых столбцов, следовательно, матрица связи имеет вид (11). Например, условно изображенную матрицу точности (звездочками обозначены ненулевые элементы) с семью диагоналями можно разбить на блоки следующим образом:

$$\mathbf{D} = \begin{array}{c|cc} * & * & * & * & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & * & * & * & * & * & * \\ \hline 0 & 0 & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * & * & * & * \end{array}, \mathbf{D}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * & * \end{bmatrix}.$$

Произведение (13) преобразуется к матрице связи двух значений с пятью предыдущими марковской последовательности третьего порядка:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * & * \end{bmatrix}.$$

Матрица связи (13)  $\mathbf{C} = -\mathbf{D}_{22}^{-1}\mathbf{D}_{21} = -\mathbf{B}_C\mathbf{D}_{21}$ , условная корреляционная матрица  $\mathbf{B}_C$  — положительно-определенная:  $\det \mathbf{B}_C > 0$ . Пусть элементы первого столбца матрицы  $\mathbf{C}$  равны нулю (фиксированы первые  $p$  из  $n$  значений последовательности  $k$ -го порядка,  $r_{ij}$  — элементы матрицы  $-\mathbf{B}_C$ ):

$$\left. \begin{array}{l} r_{(p+1)(p+1)}d_{(p+1)l} + r_{(p+1)(p+2)}d_{(p+2)l} + \dots + r_{(p+1)n}d_{nl} = c_{1l} = 0; \\ r_{(p+2)(p+1)}d_{(p+1)l} + r_{(p+2)(p+2)}d_{(p+2)l} + \dots + r_{(p+2)n}d_{nl} = c_{2l} = 0; \\ \dots \\ r_{n(p+1)}d_{(p+1)l} + r_{n(p+2)}d_{(p+2)l} + \dots + r_{nn}d_{nl} = c_{(n-k)l} = 0. \end{array} \right\} \quad (15)$$

При заданных  $r_{ij}$  система (15) представляет собой систему однородных линейных уравнений относительно  $d_{ll}$ ,  $l = n - p$ . Определитель  $\mathbf{B}_C$  не равен нулю, следовательно, система (15) имеет нулевое решение. Система уравнений вида (15) существует для второго, третьего и последующих столбцов матрицы связи, если столбец равен нулю. Таким образом, столбец матрицы (11) равен нулю только в том случае, если равен нулю соответствующий столбец матрицы  $\mathbf{D}_{21}$ , что определяет достаточность условия  $(2k + 1)$ -диагональности матрицы точности.

Понятие  $(2k + 1)$ -диагональности матрицы точности распространяется на случай, когда диагонали с первой по  $(k - 1)$ -ю нулевые: порядок гауссовой марковской последовательности определяется номером  $k$  последних ненулевых диагоналей (главная диагональ имеет номер  $k = 0$ ).

**Пример 1.** Отсчеты процесса с функцией корреляции  $R(\tau) = e^{-|\tau|} \cos \pi \tau$ , взятые с интервалом  $\Delta = 0,5$ , образуют марковскую последовательность второго порядка. Действительно,  $n = 6$  отсчетов описываются пятидиагональной матрицей точности

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1,1565 & 0 & 0,4255 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,1565 & 0 & 0,4255 & 0 & 0 \\ 0,4255 & 0 & 1,3130 & 0 & 0,4255 & 0 \\ 0 & 0,4255 & 0 & 1,3130 & 0 & 0,4255 \\ 0 & 0 & 0,4255 & 0 & 1,1565 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,4255 & 0 & 1,1565 \end{bmatrix};$$

при фиксировании первых трех значений последовательности матрица связи и условная корреляционная матрица определяются как

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & -0,3679 & 0 \\ 0 & 0 & -0,3679 \\ 0 & 0,1353 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_C = \begin{bmatrix} 0,8647 & 0 & 0,3181 \\ 0 & 0,8647 & 0 \\ -0,3181 & 0 & 0,9817 \end{bmatrix}.$$

Условные математические ожидания равны

$$m_{4c} = m_4 - 0,3679x_2, m_{5c} = m_5 - 0,3679x_3, m_{6c} = m_6 + 0,1353x_4.$$

Этот результат обусловлен корреляционными свойствами последовательности.

Анализ четырех составляющих блочного произведения  $\mathbf{B}\mathbf{D} = \mathbf{I}$  приводит также к смешанным соотношениям для матрицы связи

$$\mathbf{C} = -\mathbf{B}_{22}\mathbf{D}_{21}\mathbf{D}_{11}^{-1}\mathbf{B}_{11}^{-1} = -\mathbf{B}_{22}\mathbf{D}_{21}(\mathbf{I} - \mathbf{B}_{12}\mathbf{D}_{21})^{-1}$$

и вектору связи последнего значения  $x_n$  при фиксированных предыдущих [3]:

$$\mathbf{C} = -\frac{\mathbf{D}_{21}}{d_{nn}} = -\frac{1}{d_{nn}} \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & d_{p-k+1} & \dots & d_p \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{22} = d_{nn}.$$

**Аппроксимация немарковского гауссова процесса марковской последовательностью.** Марковское приближение отсчетов  $\mathbf{X}$  немарковского гауссова процесса с корреляционной матрицей  $\mathbf{B}_X$  реализуется приведением его матрицы точности  $\mathbf{D}_X$  к многодиагональному виду  $\mathbf{D}$  путем замены нулями всех элементов за исключением элементов  $2k + 1$  главных диагоналей. Матрица  $\mathbf{D}$  при условии положительной определенности матрицы  $\mathbf{B} = \mathbf{D}^{-1}$  есть матрица точности марковской последовательности  $k$ -го порядка (в общем случае нестационарной). Если обнуляются элементы  $d_{ij} \approx 0$ , можно ожидать, что погрешность такого представления невелика, т.е.  $\mathbf{B} \approx \mathbf{B}_X$ . На основе корреляционной матрицы  $\mathbf{B}$  можно построить программу-генератор марковской последовательности  $\mathbf{X}'$ , близкой к последовательности  $\mathbf{X}$  по корреляционным свойствам. Условные матрицы (13) и (14) позволяют генерировать траектории  $\mathbf{X}'$  точка за точкой, парами, триадами точек и т. д. [3].

**Пример 2.** Рассмотрим матрицы  $\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2$  точности отсчетов  $\mathbf{X}_1$  и  $\mathbf{X}_2$  процессов с функциями корреляции  $R_1(\tau) = 0,5e^{-|\tau|} + 0,5e^{-2|\tau|}$ ;  $R_2(\tau) = 2e^{-|\tau|} - e^{-2|\tau|}$ ;  $\Delta = 0,5, n = 5$ :

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1,3118 & -0,6269 & -0,0186 & -0,0093 & -0,0060 \\ -0,6269 & 1,6114 & -0,6181 & -0,0142 & -0,0093 \\ -0,0186 & -0,6181 & 1,6116 & -0,6181 & -0,0186 \\ -0,0093 & -0,0142 & -0,6181 & 1,6114 & -0,6269 \\ -0,0060 & -0,0093 & -0,0186 & -0,6269 & 1,3118 \end{bmatrix},$$

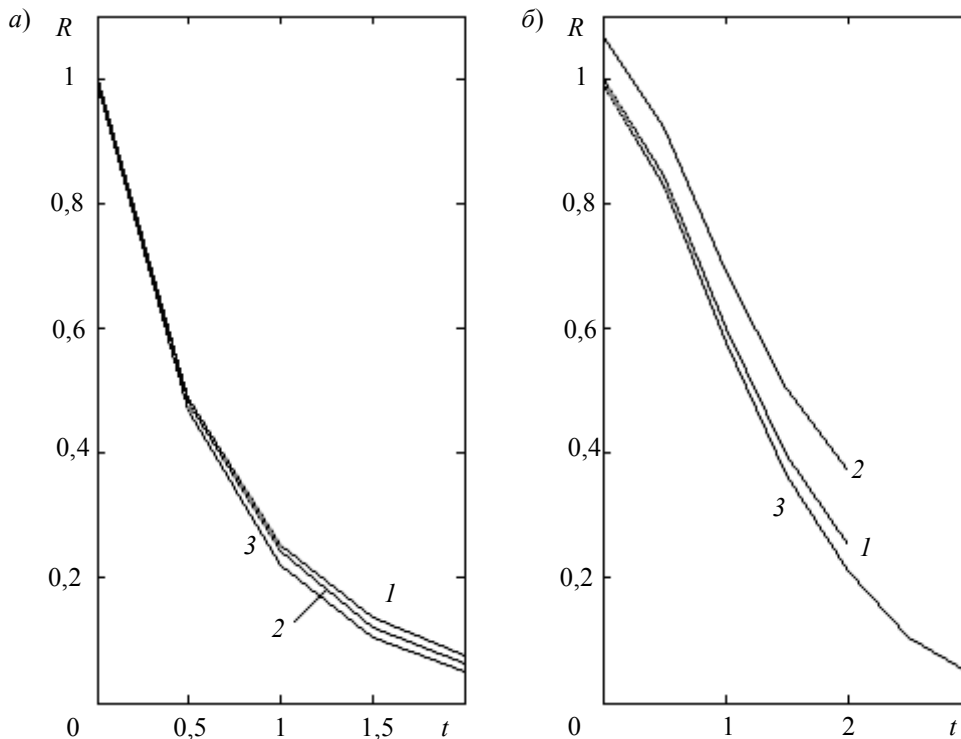
$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 4,2057 & -5,1474 & 2,2201 & -0,5406 & 0,1034 \\ -5,1474 & 10,5031 & -7,8513 & 2,8272 & -0,5406 \\ 2,2201 & -7,8513 & 11,6055 & -7,8513 & 2,2201 \\ -0,5406 & 2,8272 & -7,8513 & 10,5031 & -5,1474 \\ 0,1034 & -0,5406 & 2,2201 & -5,1474 & 4,2057 \end{bmatrix}.$$

Элементы  $d_{15}$ ,  $d_{14}$ ,  $d_{13}$ ,  $d_{24}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{35}$  матрицы  $\mathbf{D}_1$  по абсолютной величине значительно меньше предыдущих, следовательно, можно, обнуляя их и оставляя пять или три ненулевые диагонали, аппроксимировать  $\mathbf{X}_1$  марковской последовательностью второго или первого порядка. Результаты аппроксимации показаны в таблице и на рисунке, а, где кривая 1 соответствует функции корреляции исходной немарковской последовательности (в таблице —  $R$ ), кривые 2 и 3 — функции корреляции аппроксимирующих последовательностей второго и первого порядков (в таблице —  $R_2$  и  $R_1$ ).

$R$	1,0000	0,4872	0,2516	0,1365	0,0768
$R_2$	0,9962	0,4822	0,2438	0,1218	0,0616
$R_1$	0,9857	0,4674	0,2188	0,1031	0,0493

Нестационарность аппроксимирующей последовательности первого порядка проиллюстрирована ниже, где представлены диагональные элементы корреляционной матрицы.

diag( $B_1$ )	0,9857	0,9780	0,9717	0,9780	0,9857
---------------	--------	--------	--------	--------	--------



Применение процедуры обнуления элементов к матрице  $\mathbf{D}_2$  приводит к неудовлетворительным результатам: аппроксимация  $\mathbf{X}_2$  последовательностью третьего порядка сопровождается заметными погрешностями воспроизведения корреляционных свойств (рисунок, б, кривая 2). Если увеличить протяженность  $\mathbf{X}_2$  до  $n = 7$ , то удовлетворительной становится аппроксимация последовательностью четвертого порядка (см. рисунок, б, кривая 3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
2. Королук В. С. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
3. Осипов Л. А., Воробьева Ю. Г. Генерирование гауссовых марковских последовательностей // Информационно-управляющие системы. 2006. № 4 (23). С. 4—9.

*Сведения об авторах*

- Станислав Николаевич Воробьев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий
- Наталья Владимировна Гирина** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: natalia.girina@gmail.com
- Леонид Андроникович Осипов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий

Рекомендована кафедрой  
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию  
15.10.10 г.

---

---

# ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.372.82:621.383.8-752.4:536.7

Е. И. ВАХРАМЕЕВ, К. С. ГАЛЯГИН, А. С. ИВОНИН, М. А. ОШИВАЛОВ, Т. А. УЛЬРИХ  
**ТЕПЛОВОЙ ДРЕЙФ ВОЛОКОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**

Рассматривается математическая модель возникновения „кажущейся“ (фиктивной) угловой скорости гироскопа, индуцированной нестабильностью теплового состояния. Модель базируется на численном решении краевой дифференциальной задачи термо- и фотоупругости.

*Ключевые слова:* волоконный оптический гироскоп, тепловая нестабильность, фазовая невязанность, термоупругость, пьезооптика.

Интерес к волоконному оптическому гироскопу (ВОГ) базируется на потенциальных возможностях его применения в системах навигации, управления и стабилизации. Вместе с тем при разработке конструкции ВОГ и доведении его до серийных образцов возникает ряд трудностей, связанных с чувствительностью прибора к различным внешним воздействиям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. Особое значение имеют возмущения, вызванные тепловыми изменениями. Практика испытаний гироскопа в условиях изменяющегося теплового состояния окружающей среды показывает, что даже относительно небольшие колебания температур способны порождать фиктивное изменение показаний прибора. Основную роль при этом играет датчик блока чувствительности, содержащий главный измерительный элемент гироскопа — оптоволоконный контур.

Проблема повышения точности ВОГ в условиях воздействия внешних факторов решается различными способами. Прежде всего, это совершенствование технологии изготовления узлов и элементов гироскопа: в частности, большое внимание уделяется конструкции чувствительного элемента — способам укладки волокна, используемым материалам, вариантам тепло-, вибро- и шумоизоляции. Другим подходом к решению проблемы является физическое и математическое моделирование поведения гироскопа в различных условиях в целях анализа основных закономерностей процесса, а также выработки алгоритмов прогноза и коррекции индуцированной внешними воздействиями фазовой невязанности.

Настоящая статья посвящена разработке и апробации математической модели, описывающей возникновение изменений показаний волоконного оптического гироскопа, вызванных тепловой нестабильностью датчика чувствительности.

Принцип измерения угловой скорости ВОГ основан на использовании эффекта Саньяка. Этот эффект заключается в определении разности оптических путей световых лучей, встречно распространяющихся по кольцевому оптоволоконному контуру. Если оптические характеристики светопроводящей жилы не изменяются во времени, то угловая скорость  $\Omega$  контура относительно оси чувствительности определяется разностью фаз  $\Delta\varphi$  лучей на выходе из световода:



$$\Omega = \frac{c}{4kS_B} \Delta\varphi, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $k$  — волновое число;  $S_B$  — суммарная площадь витков оптического контура.

В случае когда контур находится в условиях нестационарных тепловых воздействий (например, изменения температуры окружающей среды), разность фаз вследствие зависимости оптико-механических характеристик волокна от температуры возникает и при отсутствии вращения контура. Схема возникновения термически индуцированной („кажущейся“, фиктивной) угловой скорости контура достаточно проста и заключается в следующем. Один и тот же элемент по длине неподвижного оптического контура встречно распространяющиеся лучи проходят в различные моменты времени. Если показатель преломления кварцевого волокна изменяется, то рассматриваемый участок контура лучи проходят с различной скоростью, что приводит к разности оптических путей и фазовому набегу  $\Delta\varphi$ .

Показатель преломления волокна сам по себе является функцией температуры. Кроме того, он зависит от напряженно-деформированного состояния светопроводящей жилы, что выражается в виде так называемого фотоупругого (пьезооптического) эффекта, когда механически изотропная среда приобретает оптическую анизотропию. Это происходит в основном под действием термоупругих напряжений, вызванных несогласованным деформированием каркаса катушки и оптоволоконного контура. Вместе с этим удлинение волокна при его нагревании за счет конечного значения коэффициента линейного теплового расширения, в свою очередь, также приводит к разности оптических путей встречных лучей.

Таким образом, для определения величины термически индуцированного смещения гироскопа необходима информация о динамике изменения температурного поля и связанного с ним напряженно-деформированного состояния датчика чувствительности. Описанный выше механизм порождения теплового дрейфа ВОГ определяет стратегию построения математической модели этого явления.

Для теоретического анализа принята расчетная схема (рис. 1), представляющая собой осевое сечение катушки оптоволоконного датчика. Вертикальная ось катушки совпадает с осью чувствительности гироскопа. Центральную часть расчетной области (см. рис. 1, а) занимает массив кварцевого оптического волокна 1, навитого на металлический каркас катушки 2 и залитого компаундом. Снаружи оптоволоконный контур закрыт защитным кольцом 3. Витки равномерно распределены по объему, образованному каркасом и защитным кольцом. По наружной поверхности вся конструкция покрыта теплоизолирующим слоем из пенополиуретана 4.

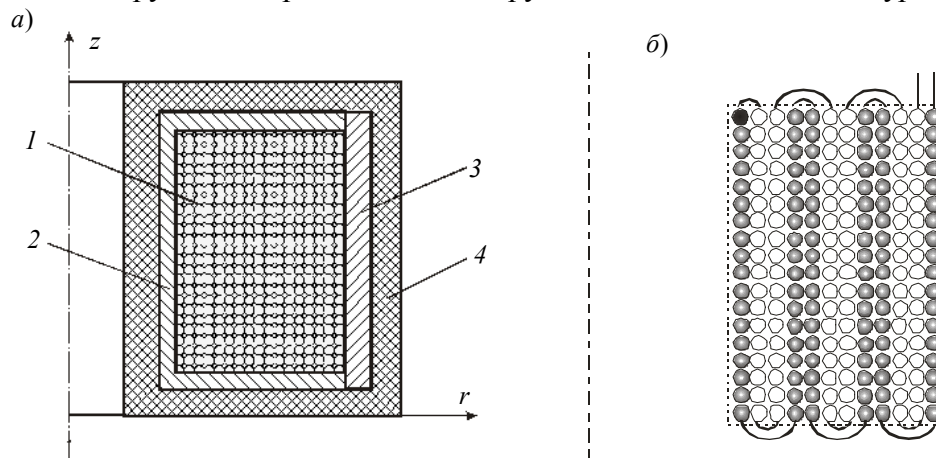


Рис. 1

Укладка волокон на катушку начинается от середины контура двумя ветвями в противоположных направлениях. Схемы укладки могут быть различными. На рис. 1, б приведена

двухслойная симметричная схема: черным цветом отмечен срединный по длине контура виток, от которого начинается укладка, одна ветвь волокна изображена белыми кружками, витки другой половины контура помечены серым цветом. При такой схеме укладки в случае четного количества витков выводы оптоволоконна располагаются на одном торце катушки, а при нечетном числе слоев — на противоположных торцах. Количество слоев волокна и число витков в каждом слое обусловлено их равномерным распределением по объему катушки.

Математическая модель возникновения теплового дрейфа гироскопа ориентирована на использование численных методов. Общая архитектура модели представляет собой достаточно громоздкий и разветвленный алгоритм, поэтому ограничимся схематичным его описанием. Поскольку рассматривается нестационарный процесс, расчет проводится в рамках пошаговой процедуры интегрирования по времени. На каждом шаге организуются вычисления, которые условно можно разделить на три последовательных этапа.

На первом этапе определяется тепловое состояние датчика чувствительности. С учетом канонической формы расчетной области используется нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат  $r - z$  [1]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c_p} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right], \quad (2)$$

где  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  — соответственно теплопроводность, плотность и теплоемкость материала;  $\tau$  — время процесса.

Уравнение (2) решается методом конечных разностей для всей расчетной области по схеме сквозного счета. При таком подходе на границах отдельных элементов контура автоматически создаются условия идеального контакта. Схема дискретизации позволяет учитывать зависимость теплофизических характеристик материалов от температуры. Оптоволоконный массив считается изотропной средой, теплофизические свойства которой определяются как средневзвешенные между свойствами кварцевой жилы, защитной оболочки световода и компаунда. Для внешнего контура расчетной области предусмотрена возможность задания граничных условий, соответствующих различным вариантам тепловой нагрузки. Решение уравнения (2) позволяет получить информацию о распределении температуры и темпе ее изменения (временных градиентов) в каждом элементе расчетной области.

Второй этап посвящен расчету термоупругих напряжений в конструкции датчика чувствительности. С учетом того, что массив оптоволоконна представляет собой структурно-неоднородную среду с периодическим расположением однотипно ориентированных волокон, при решении задачи используется известный подход, основанный на численном определении физических характеристик среды путем решения краевой задачи механики для ячейки периодичности [2, 3]. В рассматриваемом случае ячейка представляет собой фрагмент оптоволоконного массива, содержащий один виток волокна в защитной оболочке, окруженный компаундом. Сначала решаются краевые задачи о простом деформировании ячейки в целях определения структурных напряжений и деформаций. На основе полученных данных рассчитываются макрохарактеристики и осредненные значения термомеханических характеристик анизотропной среды. Одновременно с этим определяется алгоритм восстановления компонентов тензора структурных напряжений в центре светопроводящей жилы с использованием значений средних по объему ячейки макроскопических напряжений, что потребуется в дальнейшем для расчета показателя преломления. При расчете напряженно-деформированного состояния оптоволоконного массива все это позволяет рассматривать его как однородную среду с анизотропными свойствами. Задача решается методом конечных элементов для всей расчетной области. На границах контакта отдельных элементов конструкции выполняются условия совместного деформирования.

На третьем заключительном этапе пошагового алгоритма рассчитываются фазовый набег и „кажущаяся“ угловая скорость ВОГ. Эта процедура выполняется следующим образом. Для центра каждого витка контура (светопроводящей жилы) с учетом его координат путем интерполяции сеточных функций определяются значения температур и макронапряжений. Эти данные трансформируются в одномерные зависимости по длине волокна в соответствии со схемой намотки. Далее восстанавливаются структурные компоненты и рассчитываются квазиглавные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , на основе которых, а также температуры  $t_i$  волокна в данном витке определяется его показатель преломления [4]:

$$n_i = n_{0_i} \sqrt{1 + \frac{c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3)}{n_{0_i}^2}},$$

где  $c_1, c_2$  — фотоупругие постоянные кварца;  $n_{0_i} = n_0 (1 + \alpha t_i)$  — показатель преломления кварцевого волокна в данном витке; здесь  $n_0$  — начальное значение показателя преломления;  $\alpha$  — температурный коэффициент.

Эти данные образуют одномерную зависимость изменения показателя преломления светопроводящей жилы по длине всего оптического контура. При этом вследствие осевой симметрии задачи полагается линейный характер изменения показателя от витка к витку с учетом длины каждого из них:

$$n(x, \tau^*) = n(x, 0) + n'(x, 0)\tau^*,$$

где  $x$  — координата вдоль оптического контура;  $n'$  — скорость изменения  $n$ , определяемая численным дифференцированием по времени;  $\tau^*$  — время прохождения луча через оптический контур.

Оптический путь и время прохождения контура для каждого из встречных лучей ( $\tau_1^*$  и  $\tau_2^*$ ) с учетом их направления определяются с помощью численного интегрирования уравнения движения:

$$\frac{dx}{d\tau^*} = \frac{c}{n(x, \tau^*)}.$$

Согласно полученным данным с учетом длины волны излучения  $\lambda$  вычисляется фазовый набег

$$\Delta\varphi_{\tau} = \frac{2\pi c}{\lambda} (\tau_1^* - \tau_2^*)$$

и по формуле (1) фиктивная угловая скорость  $\Omega_{\tau}$ .

Для оценки корректности предлагаемой методики расчета дрейфа были проведены эксперименты по провокационному нагреву неподвижной катушки датчика с вертикально ориентированной осью чувствительности (см. рис. 1, а) при следующих основных параметрах контура: диаметр кварцевого волокна 100 мкм, наружный диаметр защитной оболочки 200 мкм, длина волокна в контуре 1100 м, число витков 4472. Датчик подвергался нагреву с термодатчиком контролем наружной поверхности теплоизолирующего покрытия.

На рис. 2 приведены результаты расчета теплового смещения гироскопа при нагреве сверху до температуры  $T = 60$  °С в течение 50 мин в сравнении с натурной регистрацией дрейфа ВОГ. Видно, что расчетный и экспериментальный дрейф достаточно хорошо согласуются на качественном уровне: начало возникновения смещения, его продолжительность и характер изменения во времени совпадают. Максимальный дрейф гироскопа наблюдается в первые минуты нагрева, когда темп изменения температуры высок: он и определяет величину смещения. В дальнейшем временные градиенты температуры уменьшаются, но смещение продолжает оставаться большим за счет несогласованной деформации металлического каркаса катушки и оптоволоконного массива из-за различных значений коэффициента линейного теплового расширения. Наблюдаемое на графике количественное несовпадение результатов

можно объяснить как неточностью численных значений характеристик материалов (которые принимались на основе литературных данных), так и нарушениями идеальности укладки витков.

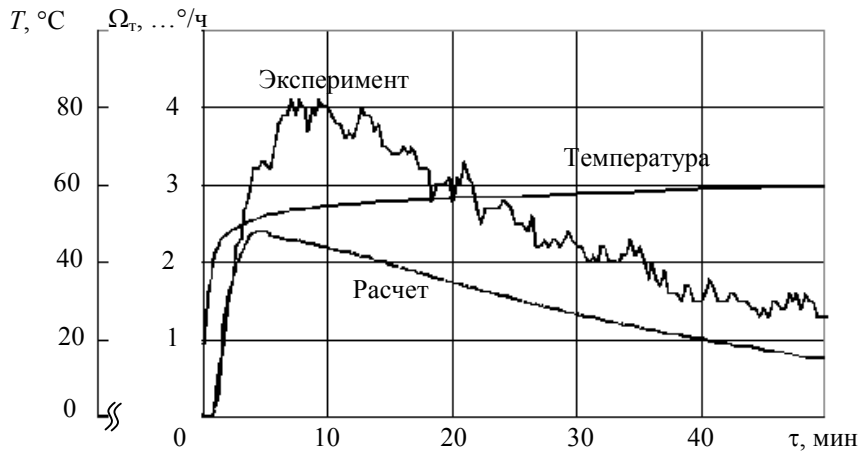


Рис. 2

Механизм возникновения фазовой невязки проиллюстрирован на рис. 3, где представлена информация о характеристиках состояния датчика чувствительности в виде одномерных функций температуры, темпа нагрева ( $\partial T/\partial \tau$ ) и главных напряжений в зависимости

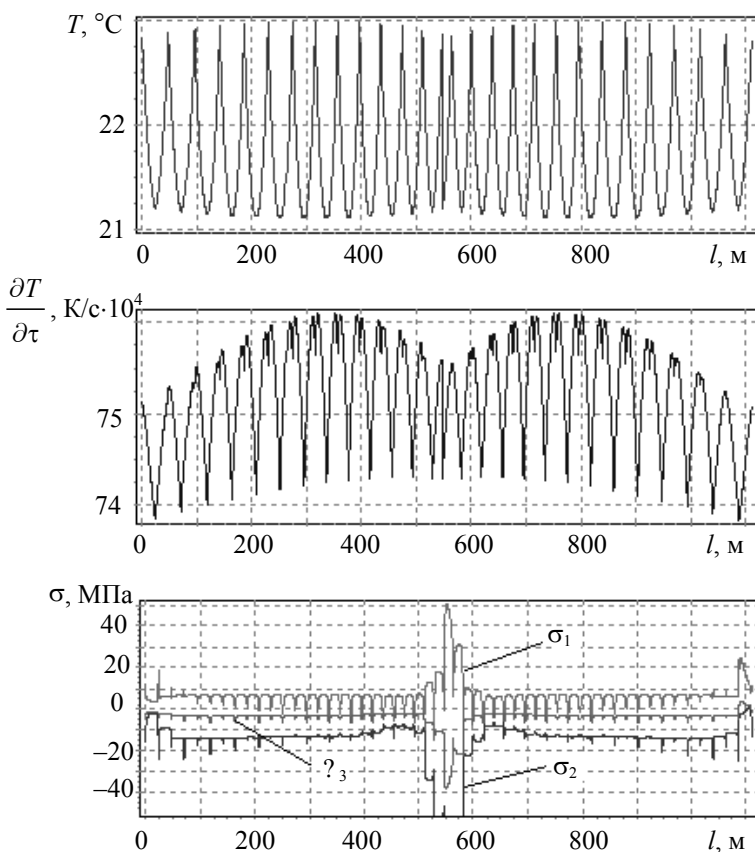


Рис. 3

от длины волокна ( $l$ ) в порядке укладки витков контура в момент времени, соответствующий максимальному значению дрейфа. Как видно из графиков, все характеристики, а следовательно, и условия поляризации существенно неоднородны по длине волокна. Это приводит к возникновению невязки фазового сдвига, график которого представлен на рис. 4. Фазовый набег приведен здесь по абсолютной величине. На самом деле в правой и левой половине контура он имеет противоположные знаки, а в середине равен нулю. Результирующее значение дрейфа гироскопа, вызванного изменением теплового состояния контура во времени, определяется асимметрией графика и количественно равно интегралу фазового набегу по виткам с учетом его знака.

Следует отметить высокую вычислительную трудоемкость

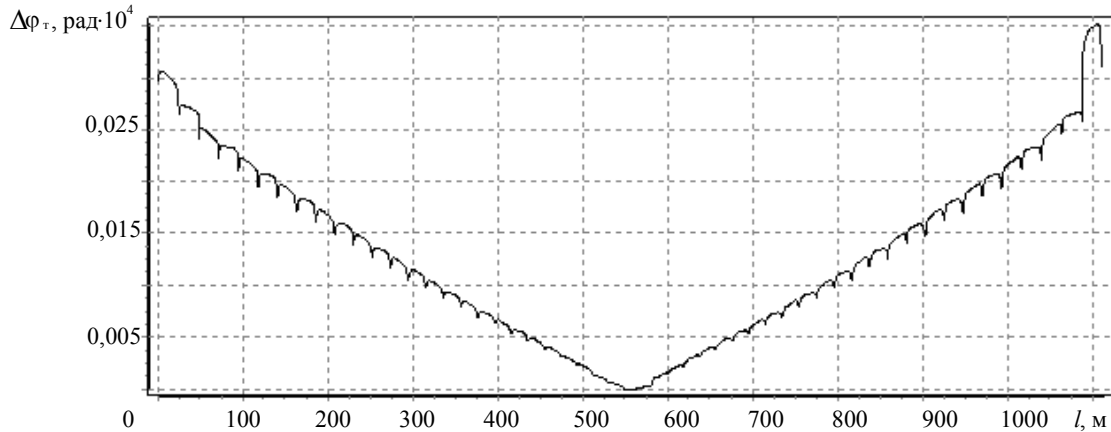


Рис. 4

Разработанная компьютерная модель использовалась в численных экспериментах по оценке конструкторских решений, направленных на снижение теплового дрейфа волоконного оптического гироскопа, и зарекомендовала себя как эффективный инструмент анализа условий возникновения термически индуцированной фазовой невязки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М.: Наука, 1984.
3. Свисткова Л. А. О вычислении коэффициентов теплового расширения композитных материалов // Механика деформируемых неоднородных структур: Сб. науч. трудов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 60—67.
4. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.
5. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987.
6. Джашишов В. Э., Панкратов В. М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001.

**Сведения об авторах**

- Евгений Иванович Вахрамеев** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; E-mail: abins@pstu.ru
- Константин Спартакович Галягин** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; зав. кафедрой; E-mail: abins@pstu.ru
- Александр Сергеевич Ивонин** — ОАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“, инженер-исследователь; E-mail: alex\_sambist@mail.ru
- Михаил Анатольевич Ошивалов** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; E-mail: abins@pstu.ru
- Татьяна Александровна Ульрих** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; E-mail: uta@pstu.ru

Рекомендована кафедрой  
теплотехники ПГТУ

Поступила в редакцию  
01.03.10 г.

П. П. КОВАЛЕНКО, В. М. МУСАЛИМОВ

## ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ ПАТТЕРНИЗАЦИИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Предложен новый метод преобразования сигналов и изображений на базе переходов от одномерного представления к двумерному и трехмерному. Рассмотрена обратная задача: переход от трехмерного представления к одномерному сигналу. Полученные результаты могут быть использованы при объектно-ориентированном программировании тактильного зрения роботов.

*Ключевые слова:* обработка изображений и сигналов, паттерны, бинарное преобразование, сложение по модулю два.

**Введение.** Разработка методов преобразования сигналов и изображений для расширения их информационных возможностей, а также приведения к виду, удобному для хранения и передачи, является актуальной задачей. Один из наиболее известных методов — вейвлет-преобразование сигналов, заключающееся в разложении исходного сигнала по частотам [1].

Суть предлагаемых в настоящей статье преобразований связана с понятием паттерна. Математические основы теории паттернов разработал американский математик Ульф Гренандер [2]. Слово “pattern” означает трафарет, образец, образ. Последнее значение используется специалистами по обработке изображений. Данный термин, применяемый также в медицине при анализе результатов исследований, характеризует устойчивый набор признаков того или иного заболевания.

Наличие в результатах исследований паттерна позволяет поставить диагноз. Термин „паттерн“ используется также и в других сферах деятельности: в объектно-ориентированном программировании — как некий набор команд, представляющий собой готовое решение задачи [3]; в психологии — как устойчивая совокупность реакций или действий; в шахматах — как характерное расположение фигур, позволяющее добиться определенного результата.

Применительно к преобразованиям сигналов можно сказать, что наличие в двумерных и трехмерных представлениях сигнала того или иного паттерна позволяет сделать определенный вывод об особенностях исследуемого сигнала. Следовательно, прямое преобразование  $1D \rightarrow 2D \rightarrow 3D$  обеспечивает возможность проведения более тщательного анализа исходного сигнала и выявления каких-либо дополнительных его особенностей, а получаемый в ходе обратного преобразования  $3D \rightarrow 2D \rightarrow 1D$  одномерный сигнал удобен для передачи и хранения.

Рассматриваемые в настоящей статье задачи тесно связаны также с задачами технического зрения, обработки изображений и распознавания образов.

**Паттернизация.** Рассмотрим процесс трансформации одномерного исходного сигнала (0-1-вектор-строки  $a_{1i}$ ) с помощью двоичного вектор-столбца  $b_{j1}$ , представляющего собой перечислительную маску-анализатор. Этот анализатор может быть представлен, например, двоичным кодом [4].

Осуществим сложение по модулю два исходного 1D-сигнала  $a_{1i}$  и анализатора  $b_{j1}$ . Результат такого сложения будет представлять собой матрицу элементов  $c_{ij}$  (рис. 1). При сложении по модулю два результат равен 0, если слагаемые равны, и 1, если слагаемые не равны.

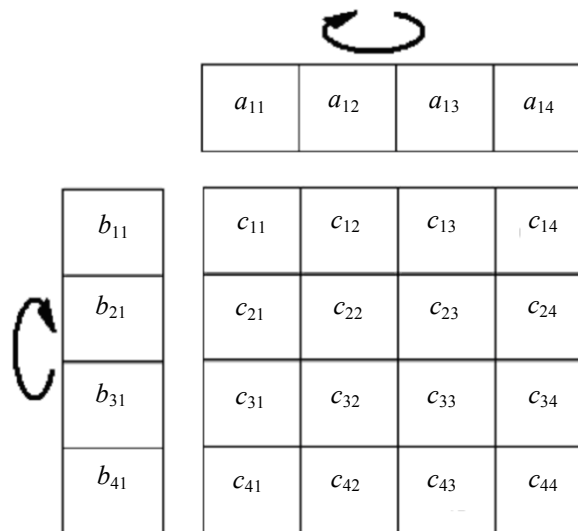


Рис. 1

Элементы этой матрицы формируются путем сложения по модулю два соответствующих элементов исходного двоичного образа и анализатора:

$$\begin{aligned} c_{11} &= a_{11} \oplus b_{11}; c_{12} = a_{12} \oplus b_{11}; c_{13} = a_{13} \oplus b_{11}; c_{14} = a_{14} \oplus b_{11}; \\ c_{21} &= a_{11} \oplus b_{21}; c_{22} = a_{12} \oplus b_{21}; c_{23} = a_{13} \oplus b_{21}; c_{24} = a_{14} \oplus b_{21}; \\ c_{31} &= a_{11} \oplus b_{31}; c_{32} = a_{12} \oplus b_{31}; c_{33} = a_{13} \oplus b_{31}; c_{34} = a_{14} \oplus b_{31}; \\ c_{41} &= a_{11} \oplus b_{41}; c_{42} = a_{12} \oplus b_{41}; c_{43} = a_{13} \oplus b_{41}; c_{44} = a_{14} \oplus b_{41}. \end{aligned}$$

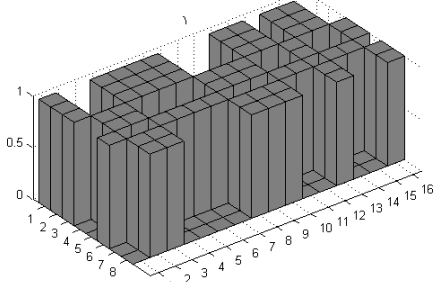
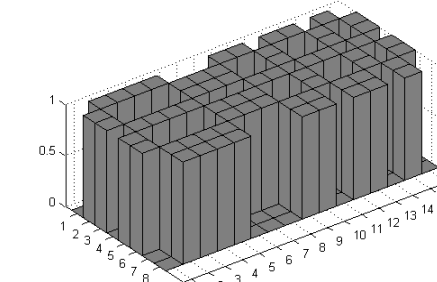
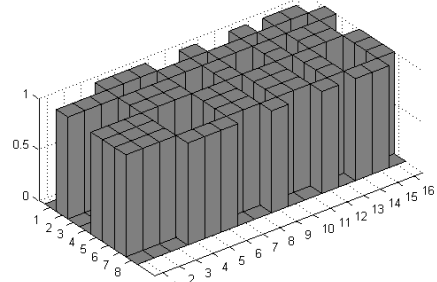
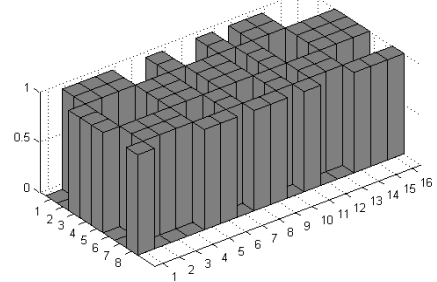
Матрица  $c_{ij}$  является своего рода двумерным представлением на плоскости исходного одномерного сигнала.

Описанную выше процедуру можно представить на поверхности тора [5]. При этом осуществляется одновременный поразрядный сдвиг как исходного сигнала, так и маски-анализатора (показано стрелками на рис. 1). При таком сдвиге второй элемент становится первым, третий — вторым, а первый — последним. После каждого акта сдвига (перемещения) вновь производится сложение по модулю два соответствующих элементов строки исходного сигнала и столбца маски-анализатора. Использование поверхности тора позволяет осуществлять сдвиг сигнала и анализатора по замкнутым циклам. Каждый из результатов сдвига назовем фазой. На плоскости каждой фазе соответствует своя результирующая матрица сложения по модулю два элементов маски и исходного одномерного сигнала. Таким образом, каждая фаза поверхности тора является отображением 0-1-матрицы и представляет собой двумерное многообразие исходного одномерного сигнала — паттерн. Это представление можно назвать торовой фазой, если ориентироваться на топологическую перспективу исследований. Количество возможных торовых фаз определяется количеством поразрядных сдвигов и, следовательно, количеством разрядов исходного сигнала.

Данный подход реализуется с помощью последовательных перечислительных операций.

В результате вышеописанных действий формируется набор 2D-паттернов исходного одномерного сигнала. Этот процесс назовем паттернизацией сигнала.

Для осуществления перехода от двумерных паттернов к трехмерному образу необходимо произвести суммирование всех полученных двумерных представлений. В результате формируется 3D-образ исходного одномерного сигнала. Последовательность процедуры построения 0-1-паттернов продемонстрирована в таблице.

Двумерное представление (матрица сложения по модулю два элементов маски-анализатора и исходного одномерного сигнала)	Поверхность двумерного представления (паттерн)																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>m_1</math></th> <th>10</th> <th>01</th> <th>11</th> <th>10</th> <th>00</th> <th>11</th> <th>01</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>0</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>1</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>1</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td></tr> <tr><td>0</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>1</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td></tr> <tr><td>1</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td></tr> </tbody> </table>	$m_1$	10	01	11	10	00	11	01	10	0	10	01	11	10	00	11	01	10	0	10	01	11	10	00	11	01	10	1	10	01	11	10	00	11	01	10	1	01	10	00	01	11	00	10	01	0	10	01	11	10	00	11	01	10	1	01	10	00	01	11	00	10	01	1	01	10	00	01	11	00	10	01										
$m_1$	10	01	11	10	00	11	01	10																																																																										
0	10	01	11	10	00	11	01	10																																																																										
0	10	01	11	10	00	11	01	10																																																																										
1	10	01	11	10	00	11	01	10																																																																										
1	01	10	00	01	11	00	10	01																																																																										
0	10	01	11	10	00	11	01	10																																																																										
1	01	10	00	01	11	00	10	01																																																																										
1	01	10	00	01	11	00	10	01																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>m_2</math></th> <th>01</th> <th>11</th> <th>10</th> <th>00</th> <th>11</th> <th>01</th> <th>10</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td></tr> <tr><td>1</td><td>10</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td></tr> <tr><td>0</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td></tr> <tr><td>1</td><td>10</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td></tr> <tr><td>1</td><td>10</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td></tr> <tr><td>0</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td></tr> <tr><td>0</td><td>01</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>00</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td></tr> </tbody> </table>	$m_2$	01	11	10	00	11	01	10	10	0	01	11	10	00	11	01	10	10	1	10	00	01	11	00	10	01	01	0	01	11	10	00	11	01	10	10	1	10	00	01	11	00	10	01	01	1	10	00	01	11	00	10	01	01	0	01	11	10	00	11	01	10	10	0	01	11	10	00	00	01	10	10										
$m_2$	01	11	10	00	11	01	10	10																																																																										
0	01	11	10	00	11	01	10	10																																																																										
1	10	00	01	11	00	10	01	01																																																																										
0	01	11	10	00	11	01	10	10																																																																										
1	10	00	01	11	00	10	01	01																																																																										
1	10	00	01	11	00	10	01	01																																																																										
0	01	11	10	00	11	01	10	10																																																																										
0	01	11	10	00	00	01	10	10																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>m_3</math></th> <th>11</th> <th>10</th> <th>00</th> <th>11</th> <th>01</th> <th>10</th> <th>10</th> <th>01</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>0</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td></tr> <tr><td>1</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>1</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td></tr> <tr><td>0</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td></tr> <tr><td>0</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td></tr> <tr><td>0</td><td>11</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td></tr> <tr><td>1</td><td>00</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td></tr> </tbody> </table>	$m_3$	11	10	00	11	01	10	10	01	1	00	01	11	00	10	01	01	10	0	11	10	00	11	01	10	10	01	1	00	01	11	00	10	01	01	10	1	00	01	11	00	10	01	01	10	0	11	10	00	11	01	10	10	01	0	11	10	00	11	01	10	10	01	0	11	10	00	11	01	10	10	01	1	00	01	11	00	10	01	01	10	
$m_3$	11	10	00	11	01	10	10	01																																																																										
1	00	01	11	00	10	01	01	10																																																																										
0	11	10	00	11	01	10	10	01																																																																										
1	00	01	11	00	10	01	01	10																																																																										
1	00	01	11	00	10	01	01	10																																																																										
0	11	10	00	11	01	10	10	01																																																																										
0	11	10	00	11	01	10	10	01																																																																										
0	11	10	00	11	01	10	10	01																																																																										
1	00	01	11	00	10	01	01	10																																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>m_4</math></th> <th>10</th> <th>00</th> <th>11</th> <th>01</th> <th>10</th> <th>10</th> <th>01</th> <th>11</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td></tr> <tr><td>1</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td></tr> <tr><td>0</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td></tr> <tr><td>0</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td></tr> <tr><td>0</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td></tr> <tr><td>1</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td></tr> <tr><td>1</td><td>01</td><td>11</td><td>00</td><td>10</td><td>01</td><td>01</td><td>10</td><td>00</td></tr> <tr><td>0</td><td>10</td><td>00</td><td>11</td><td>01</td><td>10</td><td>10</td><td>01</td><td>11</td></tr> </tbody> </table>	$m_4$	10	00	11	01	10	10	01	11	1	01	11	00	10	01	01	10	00	1	01	11	00	10	01	01	10	00	0	10	00	11	01	10	10	01	11	0	10	00	11	01	10	10	01	11	0	10	00	11	01	10	10	01	11	1	01	11	00	10	01	01	10	00	1	01	11	00	10	01	01	10	00	0	10	00	11	01	10	10	01	11	
$m_4$	10	00	11	01	10	10	01	11																																																																										
1	01	11	00	10	01	01	10	00																																																																										
1	01	11	00	10	01	01	10	00																																																																										
0	10	00	11	01	10	10	01	11																																																																										
0	10	00	11	01	10	10	01	11																																																																										
0	10	00	11	01	10	10	01	11																																																																										
1	01	11	00	10	01	01	10	00																																																																										
1	01	11	00	10	01	01	10	00																																																																										
0	10	00	11	01	10	10	01	11																																																																										

Далее осуществим накопительное сложение элементов матрицы, расположенных в эквивалентных ячейках, в целях получения 3D-образа сигнала (рис. 2).



**Депаттернизация.** Решим обратную задачу — задачу депаттернизации. Рассмотрим этот процесс на конкретном примере. Пусть имеется 3D-образ, поверхность которого (см. рис. 2) представлена матрицей  $ms$  :

$$ms = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 4 & 3 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 1 & 4 & 2 & 2 & 3 & 0 \\ 3 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 0 & 2 & 3 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 3 & 0 & 0 & 2 & 3 & 4 & 2 & 2 & 2 & 0 & 3 & 2 & 0 & 4 & 3 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 0 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 0 & 1 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 3 & 0 & 2 & 2 & 1 & 4 \\ 3 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 4 & 2 & 0 & 2 & 3 & 2 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 4 & 4 & 2 & 1 & 0 & 2 & 2 & 2 & 4 & 1 & 2 & 4 & 0 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 & 0 & 2 & 4 & 2 & 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 2 \end{pmatrix}.$$

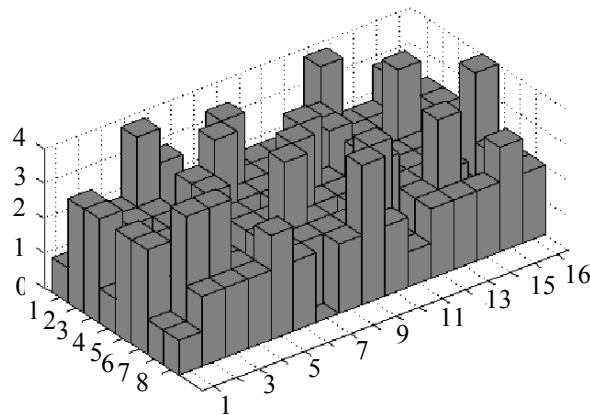


Рис. 2

Выделим поверхности  $ms$  по уровням 1 и 3. Иными словами, произведем бинаризацию имеющихся исходных данных по заданным уровням. В результате получим матрицы  $l_1$  и  $l_3$  :

$$l_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

$$l_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$



и единиц составляем оба варианта: осуществив их паттернизацию, можно определить, какой из вариантов оказался правильным.

Для рассмотренного примера получен одинаковый одномерный сигнал  $a$  по двум уровням поверхности  $ms$  :

$$a = [1001111000110110].$$

Следовательно, решены прямая и обратная задачи паттернизации сигнала, представляющего собой 0-1-вектор.

Для осуществления паттернизации и депаттернизации сигналов были написаны программы, структурные схемы которых приведены на рис. 4 и 5.

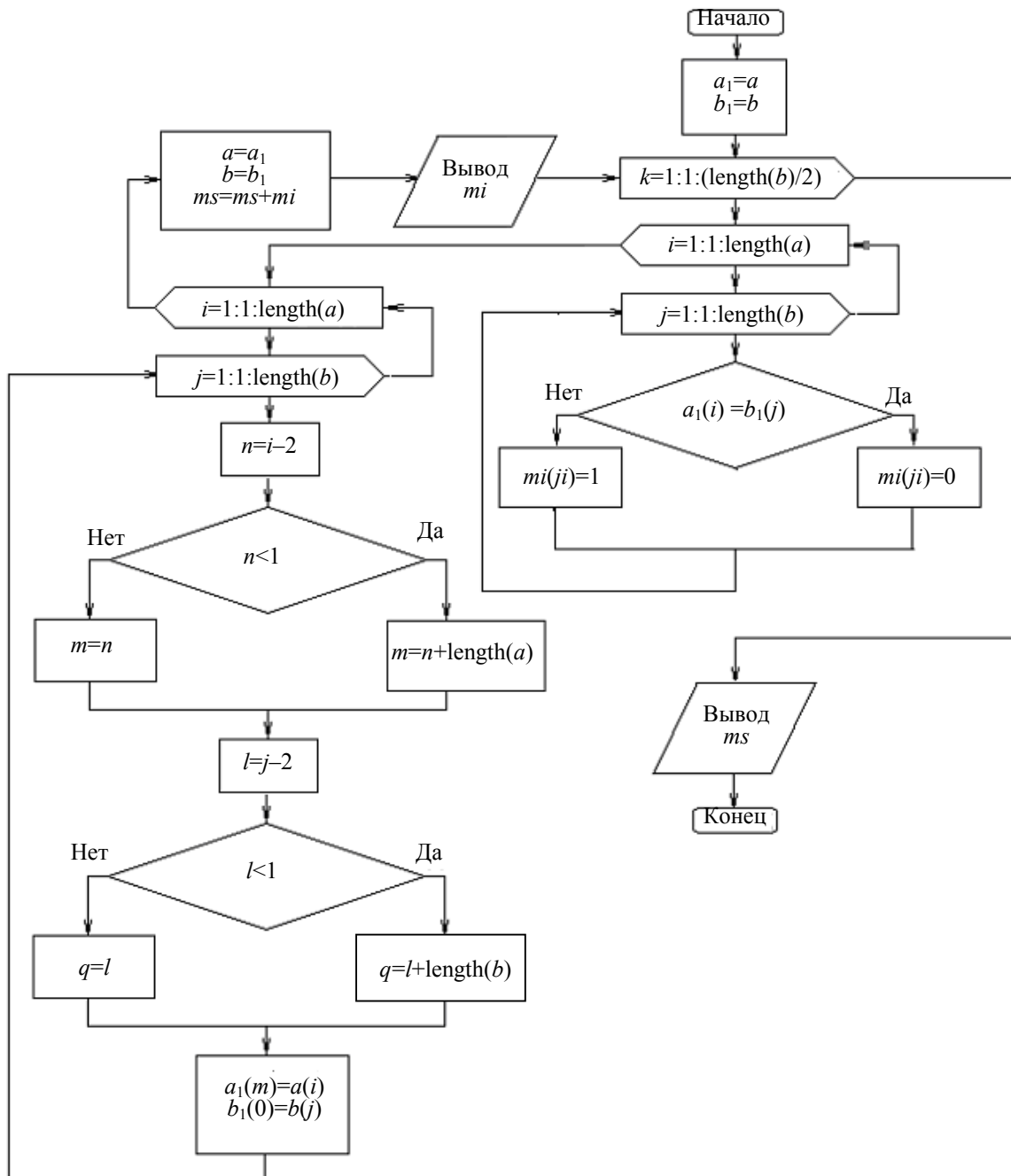


Рис. 4

Программа паттернизации (см. рис. 4) позволяет производить сложение по модулю два исходного сигнала и анализатора, осуществлять их сдвиг и повторное сложение. Результатом

работы программы являются двумерные паттерны и трехмерный паттерн, представляющий собой сумму двумерных паттернов.

Программа депаттернизации (см. рис. 5) позволяет осуществлять бинаризацию исходной поверхности по двум уровням и производить сложение полученных данных с анализатором, после чего получаемые результаты анализируются и формируется одномерный сигнал.

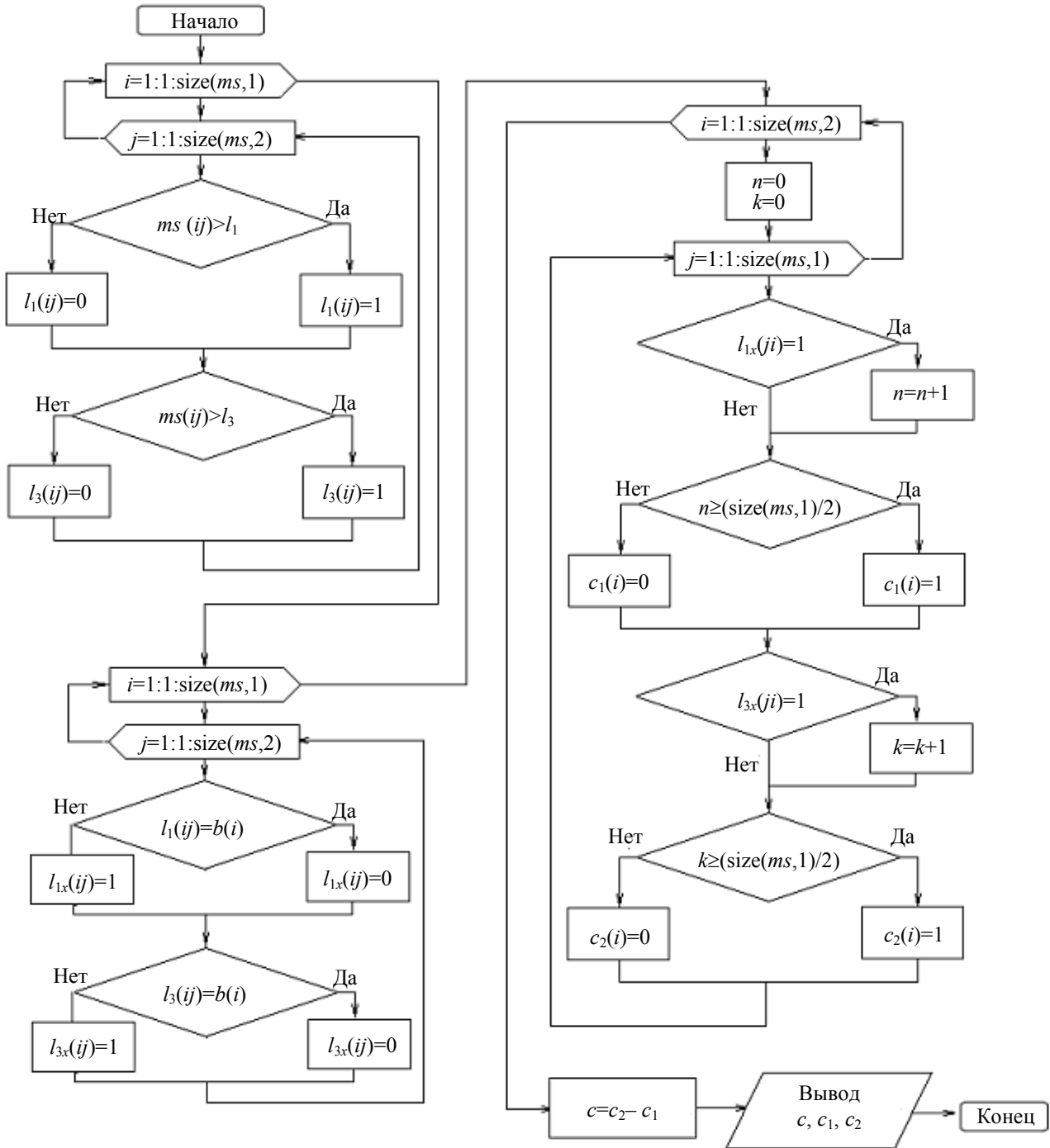


Рис. 5

**Заключение.** Разработанные новые алгоритмы трансформации сигналов и изображений с использованием переходов от одномерного представления сигнала к его двумерным и трехмерным представлениям позволяют расширить информационные возможности сигналов. Данный подход может быть использован при объектно-ориентированном программировании

тактильного зрения роботов. Отметим также, что работа в определенной степени перекликается с рядом публикаций [3, 6] по применению теории паттернов в компьютерных системах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
2. Grenander U. General Pattern Theory / Oxford University Press, 1993. 904 p.
3. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб: Питер, 2007.
4. Романовский И.В. Дискретный анализ. СПб: Невский диалект, 2000. 240 с.
5. Коваленко П. П. Визуализация изображений на цилиндре и торе // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2007. Вып. 37. С. 26—29.
6. Шуткин Л. В. Паттерновая модель данных [Электронный ресурс]: <<http://osp.ru/os/1995/06/178747/>>.

#### Сведения об авторах

**Павел Павлович Коваленко**

— Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; ассистент;  
E-mail: kovalenko\_p.p@mail.ru

**Виктор Михайлович Мусалимов**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musVM@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
05.10.10 г.

УДК 621.865.8-781.2.001.63

А. В. АМВРОСЬЕВА, В. М. МУСАЛИМОВ

### УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МИНИАТЮРНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СХВАТА

Решена задача о трещине в пьезоэлектрическом схвате, предложен смешанный критерий разрушения, показано, что для построения предельных кривых целесообразно использовать агрегатный  $D$ -модуль.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрический схват, энергетический критерий разрушения, пьезомодуль.

Микроманипуляторы с пьезоэлектрическими захватными устройствами находят в настоящее время все более широкое применение. Для решения вопроса о прочности системы авторами настоящей статьи предлагается новый подход к решению задачи о статическом нагружении пьезоэлектрика и циклическом разрушении, предложен смешанный критерий разрушения.

Рассматриваемая задача (см. рис. 1) была решена в работе [1] для полупространства  $z \geq 0$  из пьезоэлектрического материала; прямолинейный разрез расположен в плоскости изотропии  $z = 0$  на границе с упругим изотропным проводником ( $z \leq 0$ ) с берегами трещины  $|x| \leq 1$  и  $|y| < \infty$ , свободными от нагрузки; условие на бесконечности:  $\sigma_\infty = \sigma_0$ . В настоящей статье для решения задачи будем рассматривать случай плоской деформации:  $\chi = (3 - 4\nu)$ , где  $\nu$  — коэффициент Пуассона.

Запишем выражение, связывающее критическую длину  $l$  трещины нормального отрыва и приложенную нагрузку:

$$\sigma = \left[ \frac{8d_z \gamma_z}{\pi l (1 + 4\chi^2)} \right]^{1/2}. \quad (1)$$

Аналогично получено выражение, связывающее критическую длину  $l$  трещины продольного сдвига и нагрузки:

$$\tau = \left[ \frac{2d_y \gamma_y}{\pi l (1 + 4\chi^2)} \right]^{1/2}. \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2)  $\gamma_z = \gamma_y = \gamma$  — плотность эффективной энергии разрушения,  $d_y = \Lambda d_z$  — приведенные пьезомодули, где  $\Lambda$  — коэффициент.

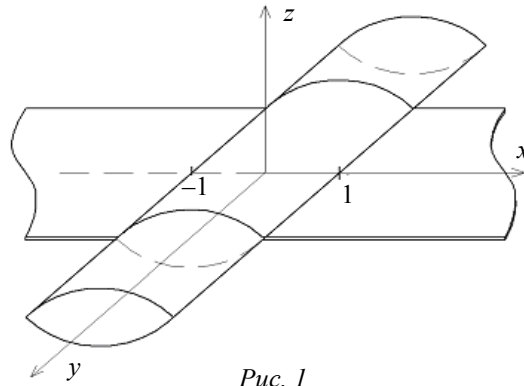


Рис. 1

Для рассматриваемой трещины смешанного типа (нормального отрыва и продольного сдвига) интенсивность освобождения упругой энергии рассчитывается как

$$G = G_I + G_{III}, \quad (3)$$

где  $G_I = 2\gamma$  для трещины нормального отрыва,  $G_{III} = 2\gamma$  для трещины продольного сдвига.

Смешанный критерий разрушения можно выразить, используя коэффициенты интенсивности напряжений [1]:

$$G_c = \frac{1+\nu}{E} \left[ (1-\nu)K_I^2 + K_{III}^2 \right], \quad (4)$$

где  $K_I$  и  $K_{III}$  — коэффициенты интенсивности напряжений для трещины нормального отрыва и трещины продольного сдвига соответственно,  $E$  — модуль упругости.

Из формул (1) и (2) получаем

$$G_I = \frac{\sigma^2 \pi l (1 + 4\chi^2)}{4d_z};$$

$$G_{III} = \frac{\tau^2 \pi l (1 + 4\chi^2)}{\Lambda d_z},$$

а из уравнений (3) и (4) следует

$$\frac{\sigma^2}{a^2} + \frac{\tau^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

где  $a^2 = \frac{G_c 4d_z}{\pi l (1 + 4\chi^2)}$ ,  $b^2 = \frac{G_c \Lambda d_z}{\pi l (1 + 4\chi^2)}$  (далее индекс в обозначениях пьезомодуля и критерия разрушения опускаем).

На рис. 2 представлен график зависимости (5), где по оси абсцисс отложена нагрузка  $\sigma$ , по оси ординат — нагрузка  $\tau$ .

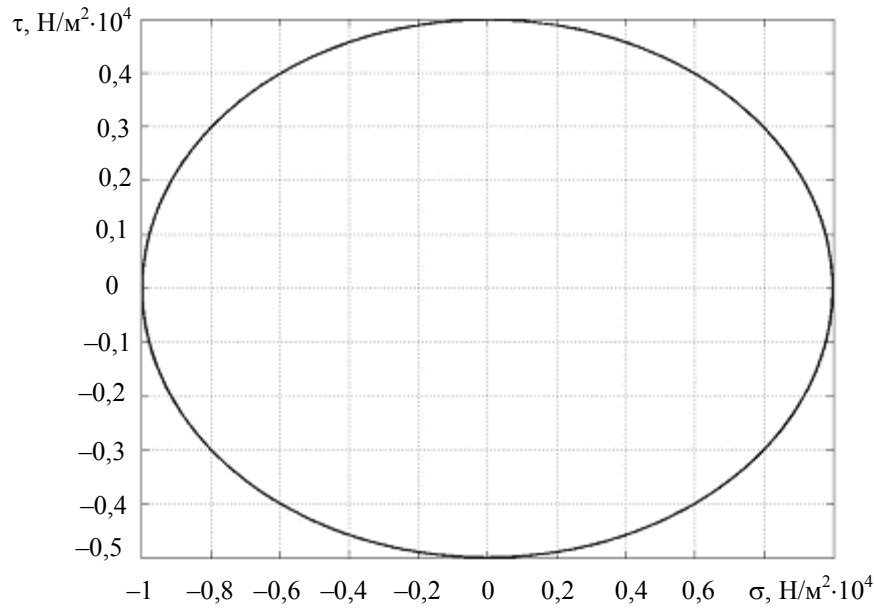


Рис. 2

Введем обозначение:

$$D^2 = \frac{Gd}{l}, \quad (6)$$

тогда

$$a^2 = D^2 \pi^4 (1 + 4\chi^2), \quad b^2 = D^2 \pi \Lambda (1 + 4\chi^2).$$

В формуле (6) пьезомодуль  $d$ , интенсивность освобождения энергии  $G$  (скорость освобождения энергии) и длина трещины  $l$  связаны зависимостью, где  $D^2$  имеет размерность „напряжение в квадрате“. Таким образом, зная предельную кривую (см. рис. 2), можно определить допустимый размер трещины при заданном пьезоупругом нагружении. Агрегатный модуль  $D^2$  в определенной степени характеризует „энергию ускорений“ [2], умноженную на плотность приповерхностного слоя трещины.

Обратимся, далее, к решению рассматриваемой задачи применительно к телу конечных размеров. На рис. 3 представлено схематическое изображение пьезоэлектрического схвата, для которого справедливы следующие значения параметров [3]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot Y_1 \left( \frac{l}{L} \right) = 237 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2; \quad K_{III} = \tau \sqrt{\pi l} \cdot Y_3 \left( \frac{l}{L} \right) = 59 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2,$$

где  $Y_1$  [4—6] и  $Y_3$  [7] — поправочные функции.

Тогда

$$\sigma Y_1 \left( \frac{l}{L} \right) = \frac{6M_1 l}{t h^3} = \frac{6MP_1 l^2}{t h^3} = 1728 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2,$$

где  $l = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м;  $t = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $P_1 = 100$  Н, и

$$\tau Y_3 \left( \frac{l}{L} \right) = \frac{6M_3 l}{t^3 h} = \frac{6MP_3 l^2}{t^3 h} = 432 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2,$$

где  $l = 0,6 \cdot 10^{-2}$  м;  $t = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $P_3 = P_1 \cdot 10^{-2}$  Н.

Вычислим плотность эффективной энергии разрушения  $\gamma = G/2 = 1425 \cdot 10^8$  Н/м и найдем предельные нагрузки:  $\sigma = 10^4$  Н/м<sup>2</sup>,  $\tau = 0,5 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>.

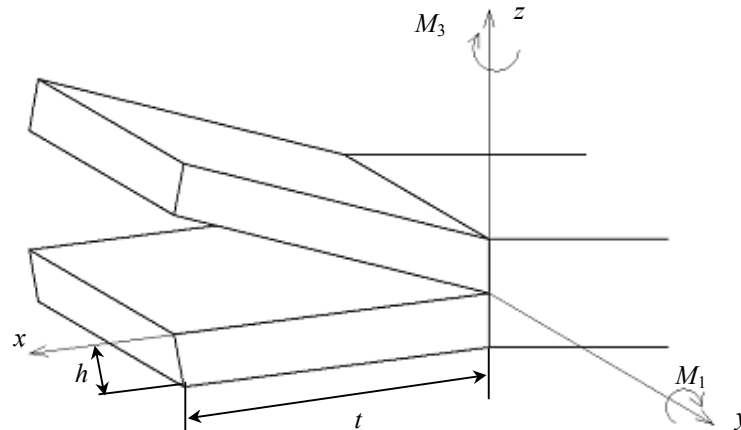


Рис. 3

Рассмотрим задачу об усталостном разрушении. Примем, что размах цикла напряжений

$$\Delta\sigma = 2\sqrt{a^2 + b^2} = 24 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2 \text{ или } \Delta\sigma = 2D\sqrt{\pi(4 + \Lambda)(1 + 4\chi^2)},$$

тогда  $\sigma = \frac{\Delta\sigma}{2 \sin(\omega t)}$ .

Для оценки усталостной прочности используется закон Пэриса [4, 5]:

$$\frac{dl}{dN} = C_1 (\Delta K)^n,$$

где  $\Delta K = f\Delta\sigma$  — размах коэффициента интенсивности при  $f = 1$ ; для  $n = 4$  и  $C = 2 \cdot 10^{-10}$  [6, 7]

получим значение  $\frac{dl}{dN} = 66,36 \cdot 10^6$ , где  $N$  — число циклов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения: Специальные задачи механики разрушения. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 192 с.
2. Анпель П. Теоретическая механика. М.: Гостехиздат, 1960. Т. 1, 2.
3. Смирнов А. Б. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами: Мехатроника и робототехника. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. 160 с.
4. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения на базе компьютерных технологий: Практикум. СПб: „БХВ-Петербург“, 2007. 450 с.
5. Хеллан К. Введение в механику разрушения. М.: Мир, 1988. 364 с.
6. Amvrosieva A., Musalimov V. Fracturing mechanism the push-wire connector // Proc. of the 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference. Lisbon, 2009.
7. Amvrosieva A., Musalimov V. Fatigue fracture of miniature piezoelectric grabs // Proc. of the XV Intern. Colloquium Mechanical Fatigue of Metals. Opole, 2010.



*Сведения об авторах*

- Анна Владимировна Амвросьева** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: destyni@mail.ru
- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musVM@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
05.10.10 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.313, 621.314.58

П. А. БОРИСОВ, Д. В. ЛУКИЧЕВ

## МЕТОДИКИ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭНЕРГОПОДСИСТЕМ ПРИБОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Рассматриваются методики структурно-параметрического анализа и синтеза энергетических подсистем приборных электроприводов с высокими энергетическими показателями. Предлагаемые методики позволяют в процессе решения оптимизационной задачи осуществить поиск вариантов проекта энергоподсистемы.

*Ключевые слова:* звено постоянного тока, инвертор рекуперации, приборный электропривод, широтно-импульсный преобразователь, энергетическая подсистема.

В настоящее время основные усилия по энергосбережению сконцентрированы в сфере потребления электроэнергии. Учитывая, что более 60% всей вырабатываемой электроэнергии потребляют электроприводы, высокую актуальность при их проектировании, эксплуатации и модернизации приобретают задачи энергосбережения. При построении энергетических подсистем (ЭП) современных систем электропривода с двусторонним обменом энергией между питающей сетью и электрической машиной наиболее важными являются вопросы определения структуры и параметров ЭП, обеспечивающих эффективный способ использования энергии рекуперации. Реализация в замкнутых системах (ЗС) электропривода эффективных тормозных режимов накладывает жесткие требования к выбору состава оборудования ЭП и определению электромагнитных нагрузок на ее элементы. Поэтому создание комплексных методик анализа и синтеза энергоподсистем приборных электроприводов с высокими энергетическими показателями является актуальной задачей.

В регулируемых электроприводах наиболее массовое практическое применение в настоящее время получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока (ЗПТ) [1]. Энергоподсистема современных систем приборного электропривода содержит: силовые цепи сети переменного тока, выпрямитель (диодный или на управляемых ключах), ЗПТ с силовым фильтром (СФ), тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад широтно-импульсного преобразователя (ШИП), исполнительный двигатель (ИД).

Среди ИД приборных электроприводов наилучшими регулировочными свойствами обладают двигатели постоянного тока (ДПТ). Однако наличие щеточно-коллекторного узла создает ряд трудностей при использовании таких машин в системах с повышенными требованиями к надежности. Поэтому наряду с коллекторными двигателями находят широкое применение бесконтактные ДПТ (БДПТ), в качестве которых может быть использован любой из известных типов синхронных двигателей переменного тока [2]. Управление скоростью и на-

правлением вращения БДПТ осуществляется, как и управление коллекторными ДПТ, путем изменения значения и полярности подводимого напряжения, т.е. принцип управления остается таким же.

Основой построения ЗС электропривода в отечественной и зарубежной практике служит структура подчиненного регулирования [1, 2], содержащая ряд замкнутых контуров, последовательно охватывающих друг друга. Поэтому будем рассматривать только ЗС приборного электропривода, построенные в соответствии со структурой подчиненного регулирования, в которой электрическая цепь машины является объектом для подчиненного контура регулирования тока, а механическая часть — объектом для контуров регулирования скорости вращения и положения.

Предельные динамические возможности электропривода определяются параметрами ЭП, так как информационная подсистема не может обеспечить требуемые характеристики ИД (моменты, скорости и ускорения), если они не заложены в ЭП [2].

Для энергоподсистем ЗС электропривода решающими факторами при выборе их структуры и расчете параметров элементов являются прием энергии рекуперации вращающихся частей электропривода и обеспечение надежной коммутации силовых ключей ШИП [3, 4]. Последний фактор определяет минимальное значение емкости конденсатора СФ, который обеспечивает в моменты коммутации тока в ШИП отсутствие опасных перенапряжений на силовых ключах. Пульсации напряжения на конденсаторе СФ являются функцией ( $\gamma$ ) относительной продолжительности включения цепи ИД посредством ШИП в цепь звена постоянного тока и достигают максимума при  $\gamma = 0,5$ :

$$\Delta U_{C_{\max}} = 0,25 I_{\text{я max}} / (f_{\text{к}} C_{\text{ф}}).$$

Для режима ограничения тока, когда  $I_{\text{я max}} = I_0$ , получим

$$C_{\text{ф min}} = 0,25 I_0 / (\Delta U_{C_{\max}} f_{\text{к}}),$$

где  $f_{\text{к}}$  — частота коммутации ШИП.

В общем случае мощность, расходуемая в системе электропривода, используется для:

- преодоления нагрузки (в рассматриваемом случае статического момента);
- создания запаса кинетической энергии вращающихся масс электропривода, определяемой динамическим моментом;
- покрытия потерь в электродвигателе.

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Избыточную энергию необходимо аккумулировать или преобразовывать в другую форму. Для этого принципиально существует три основные возможности [1]:

- 1) аккумулярование (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- 2) использование тормозной цепи, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- 3) рекуперация энергии в сеть посредством инвертора рекуперации (ИР), т.е. использование электрической энергии другим пользователем.

В случае аккумулярования энергии рекуперации в конденсаторе СФ звена постоянного тока возможно построение энергоподсистемы ЗС электропривода с односторонним потреблением электроэнергии. При проектировании современных ЭП с односторонним потреблением электроэнергии, к которым предъявляются жесткие требования по значениям гармонических составляющих потребляемого из сети тока, эффективным является построение звена постоянного тока по схемам импульсных преобразователей. Энергоподсистема в этом случае реализуется в соответствии со схемой: источник переменного тока — выпрямитель с СФ —

конвертор ЗПТ — ШИП — ИД. Конвертор обычно строится на базе индуктивного импульсного преобразователя дроссельного или трансформаторного типа, что позволяет формировать кривую сетевого тока, близкую к гармонической, обеспечивая высокие энергетические показатели ЭП.

В случае когда значение энергии, которая может быть возвращена в ЗПТ, велико и практическая реализация требуемой батареи конденсаторов СФ неприемлема, а вариант с тормозной цепью не дает экономии при использовании электроэнергии, то реализуется энергоподсистема ЗС электропривода с двусторонним энергопотреблением, т.е. с инвертором рекуперации.

Для анализа энергетических процессов в ЭП ЗС электропривода в предельных динамических режимах работы целесообразно применить методику, использующую диаграмму нагрузки привода в области располагаемых моментов и скоростей [3]. Введем следующие базовые величины: скорость ИД  $\Omega_6 = \Omega_{x,x}$ , напряжение ЗПТ  $E_6 = U_6 = c'_E \Omega_{x,x}$ , ток короткого замыкания ИД  $I_6 = I_{к.з} = U_6 / r_y$ , момент  $M_6 = c'_M I_{к.з}$ , мощность  $P_6 = U_6 I_6$ , энергия  $W_{max} = W_6 = J_\Sigma \Omega_6^2 / 2$ , где  $J_\Sigma$  — приведенный момент инерции ИД с нагрузкой,  $T_M = J_\Sigma \Omega_6 / M_6$  — электромеханическая постоянная времени,  $r_y$  — сопротивление обмотки якоря ИД,  $c'_M$  и  $c'_E$  — конструктивные коэффициенты ИД,  $\eta_{ИД} = M_6 \Omega_6 / I_6 E_6 = c'_M / c'_E$  — КПД ИД.

При проектировании энергоподсистемы необходимо определить максимальные электромагнитные нагрузки на ее элементы. Наиболее тяжелым режимом работы ЭП ЗС электропривода с ШИП, при котором эти нагрузки максимальны, является режим периодического реверса скорости двигателя с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне  $I_0$ . Для этого режима электромагнитные и энергетические процессы в ЭП ЗС электропривода на интервалах разгона ИД, движения с установившейся скоростью и торможения в течение времени  $T_{п}$  подробно рассмотрены в работе [4]. Время рекуперации определяется согласно уравнению

$$t_{рек} = (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) T_M / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{ст}),$$

где  $I_{ст}$  — ток, обусловленный статическим моментом нагрузки;  $\Omega_y$  — заданное значение скорости ИД в установившемся режиме, т.е. на интервале движения с постоянной скоростью.

Кинетическая энергия вращающихся частей электропривода на интервале рекуперации определяется как

$$\bar{W}_{рек} = \bar{\Omega}_y^2 - \bar{I}_0^2.$$

С учетом того, что эта энергия за время рекуперации рассеивается в якорной цепи машины и заряжает конденсатор СФ, т.е. является суммой двух составляющих, получим формулу для определения значения энергии, запасаемой в конденсаторе СФ:

$$\bar{W}_C = \bar{I}_0 (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0)^2 / (\bar{I}_0 + \bar{I}_{ст}). \quad (1)$$

Энергия, потребляемая из звена постоянного тока в течение интервалов разгона  $t_p$ , движения с установившейся скоростью  $t_y$  и торможения  $t_t$  ИД, т.е. за время  $T_{п} = t_t + t_p + t_y$ , определяется выражением

$$\bar{W} = \left[ \frac{\bar{I}_0^3}{\bar{I}_0 + \bar{I}_{ст}} + \frac{\bar{I}_0 \bar{\Omega}_y (\bar{\Omega}_y + 2\bar{I}_0)}{(\bar{I}_0 - \bar{I}_{ст})} + 2\bar{I}_{ст} \left( \frac{T_{п}}{T_M} - \frac{2\bar{\Omega}_y \bar{I}_0}{(\bar{I}_0^2 - \bar{I}_{ст}^2)} \right) (\bar{\Omega}_y + \bar{I}_{ст}) \right] \frac{1}{\eta_\Sigma}, \quad (2)$$

где  $\eta_\Sigma = \eta_{ИД} \eta_{ШИП}$ ,  $\eta_{ШИП}$  — КПД широтно-импульсного преобразователя.

Исходя из электромеханических (низкочастотных) процессов в ЭП ЗС электропривода, когда тормозная цепь и инвертор рекуперации не используются, можно установить соотношение для определения емкости конденсатора СФ из условия ограничения напряжения на нем на заданном уровне  $\bar{U}_{C_{\max 3}}$  в режиме рекуперации:

$$C_{\phi 1} = \left[ \bar{W}_C T_M - (2\bar{I}_{ст} / f) \right] / \left[ r_{я} \left( \bar{U}_{C_{\max 3}}^2 - 1 \right) \right],$$

где  $f$  — частота пульсаций выпрямленного напряжения в звене постоянного тока.

Согласно условию минимально допустимого снижения напряжения  $\bar{U}_{C_{\min}}$  на конденсаторе СФ на интервале разгона при заданном уровне токоограничения  $\bar{I}_0$  его емкость определяется как

$$C_{\phi 2} = 2\bar{I}_0 / \left[ r_{я} \left( 1 - \bar{U}_{C_{\min}}^2 \right) f \right].$$

Для определения спектра токовых воздействий кривая тока, потребляемого из ЗПТ, представляется в виде ряда Фурье. Расчетные соотношения, связывающие амплитудные коэффициенты ряда Фурье кривой тока ЗПТ (его низкочастотной составляющей) с параметрами ИД и режима работы всего электропривода, приведены в работе [4]. Используя область допустимых пульсаций напряжения в ЗПТ в функции частоты токовых воздействий, можно определить значения емкости конденсатора СФ и его номинального напряжения, обеспечивающие надежную работу силовых ключей ШИП.

Полученные зависимости (1) и (2) позволяют соотнести энергию  $\bar{W}_C$ , которая может быть возвращена в звено постоянного тока, с потребляемой из него энергией  $W$  за время  $T_{\Pi}$  при заданных параметрах нагрузки и режима работы, что дает возможность сравнить эффективность различных способов использования энергии рекуперации и определить целесообразность использования инвертора рекуперации в составе ЭП ЗС электропривода. Таким образом, приведенная методика и найденные зависимости позволяют решать вопросы структурно-параметрической оптимизации (синтеза) ЭП систем приборного электропривода.

На начальном этапе работы приходится принимать решения в условиях неопределенности. Чаще всего это относится к построению или выбору варианта структуры объекта проектирования, т.е. к задачам структурной оптимизации. Для рассматриваемых энергоподсистем приборных электроприводов возможны три варианта проекта в зависимости от соотношения расчетных величин  $C_{\phi 1}$  и  $C_{\phi 2}$ :

- при  $C_{\phi 2} \geq C_{\phi 1}$  выбирается конденсатор СФ емкостью  $C_{\phi 2}$ , применение ИР не требуется и реализуется структура ЭП с односторонним потреблением электроэнергии;
- при  $C_{\phi 1} > C_{\phi 2}$  возможны два случая:
  - выбирается конденсатор СФ емкостью  $C_{\phi 1}$ , применение ИР не требуется и реализуется структура ЭП с односторонним потреблением электроэнергии;
  - выбирается конденсатор СФ емкостью  $C_{\phi_{\min}}$  и реализуется структура ЭП с двусторонним энергопотреблением, т.е. с использованием ИР.

Поскольку вариант ЭП с тормозной цепью является самым неэкономичным с точки зрения использования электроэнергии (энергия рекуперации преобразуется в тепло), то выбор этого варианта осуществляется проектировщиком индивидуально.

Таким образом, посредством некоторого перебора различных структур построения проектируемого объекта может быть осуществлена структурная оптимизация устройства. Выбор варианта структуры позволяет устранить неопределенность, что обеспечивает возможность построения математической модели и проведения на ее основе параметрической оптимизации.

В ходе решения задачи оптимизации необходимо определить множество параметров элементов ЭП, обеспечивающих требуемые показатели при заданных ограничениях на множество внутренних переменных [5]. Общие рекомендации по выбору выходных параметров и назначению целевой функции следующие:

- КПД энергоподсистемы должен быть максимальным;
- энергетические показатели ЭП задаются согласно действующему стандарту;
- при условии обеспечения электрических характеристик желательно минимизировать массу и габариты устройства.

Ограничение электромагнитных нагрузок на заданном уровне позволяет снизить массу и габариты ЭП, что приводит, однако, к снижению предельных динамических возможностей электропривода.

В простейшем случае целевая функция представляет собой линейную комбинацию нормированных переменных модели с весовыми коэффициентами  $Y_j$ :

$$S = Y_T Q / Q_0 + Y_C C / C_0 + Y_E (1 - \eta) + Y_{\Sigma i} (1 - K_i) + Y_F |f_{kk} - f_{k0}| + Y_I |\alpha_k - \alpha_0| / \alpha_0 + Y_U |\beta_k - \beta_0| / \beta_0 + Y_\Phi |\varphi_k - \varphi_0| / \varphi_0,$$

где  $Q_0$ ,  $C_0$ ,  $f_{k0}$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\varphi_0$  и  $Q$ ,  $C$ ,  $f_{kk}$ ,  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$ ,  $\varphi_k$  — соответственно начальные и текущие значения массы трансформатора, емкости конденсатора СФ, частоты коммутации ШИП, коэффициентов ограничения по току и напряжению, коэффициента экономической эффективности;  $\eta$  — КПД энергоподсистемы;  $K_i$  —  $i$ -й показатель качества энергопотребления ЭП.

При составлении целевой функции разработчик ограничивает, исключает или дополняет ее требуемыми переменными исходя из технического задания на разработку ЭП системы приборного электропривода. Весовые коэффициенты  $Y_j$  также задаются на этапе экспертной оценки.

Рассмотренная задача поиска оптимального проекта энергоподсистемы ЗС электропривода относится к классу задач нелинейного программирования. Задача сводится к поиску численным методом экстремума (минимума) целевой функции, зависимость которой от внутренних переменных установлена аналитической моделью ЭП. Таким образом, если в процессе оптимизации будет найден глобальный минимум, это будет означать, что спроектированная ЭП системы приборного электропривода соответствует требованиям оптимальности. Решение оптимизационной задачи может быть осуществлено с использованием приведенных в работе [5] методов и алгоритмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию по НИР НК-430П ГК №П2479 от 19.11.2009 г. (мероприятие №1.2.2) по направлению „Многофункциональное приборостроение для промышленных систем управления“ в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SEW Eurodrive. Практика приводной техники. 1996. Т. 7.
2. Сабинин Ю. А. Позиционные и следящие электромеханические системы: Учеб. пособие для вузов. СПб: Энергоатомиздат, 2001. 208 с.
3. Томасов В. С., Синицын В. А., Борисов П. А. Исследование электромагнитных процессов в энергетическом канале замкнутой системы электропривода постоянного тока // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 11. С. 9—16.
4. Борисов П. А., Томасов В. С. Методика выбора наиболее эффективного способа использования энергии рекуперации в системах электропривода на базе ШИП—ДПТ в зависимости от режима работы // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2004. Вып. 15. С. 335—339.
5. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.

**Сведения об авторах**

- Павел Александрович Борисов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: borisov@ets.ifmo.ru
- Дмитрий Вячеславович Лукичев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: ludimit@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
электротехники и прецизионных  
электромеханических систем

Поступила в редакцию  
04.06.10 г.

УДК 621.397; 778.5; 535.6

Т. М. СУХОВ, Е. А. БЕЛЯЕВ

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА ПОСТОЯННОЙ ЦВЕТОВОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

Рассмотрен принцип постоянной цветовой яркости для цифровых систем передачи видеoinформации. Приведены практические результаты, показывающие эффективность использования данного принципа по сравнению с системами, которые основаны на принципе постоянной яркости.

**Ключевые слова:** цифровое телевидение, цветовые преобразования, принцип постоянной яркости, принцип постоянной цветовой яркости.

В настоящее время в цифровых телевизионных системах для формирования цветных сигналов используется принцип постоянной яркости. В соответствии с этим принципом сигнал яркости представляется как сумма прошедших гамма-коррекцию первичных цветowych сигналов с разными весовыми коэффициентами. Уравнения связи между сигналами  $E'_R$ ,  $E'_G$ ,  $E'_B$  и сигналами  $E'_Y$ ,  $E'_{R-Y}$ ,  $E'_{B-Y}$  записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} E'_Y &= 0,299E'_R + 0,587E'_G + 0,114E'_B; \\ E'_{R-Y} &= 0,701E'_R - 0,587E'_G - 0,114E'_B, \\ E'_{B-Y} &= -0,299E'_R - 0,587E'_G + 0,886E'_B. \end{aligned} \right\}$$

На приемной стороне происходит восстановление первичных сигналов  $E'_R$ ,  $E'_G$ ,  $E'_B$  согласно уравнениям

$$\left. \begin{aligned} E'_R &= E'_Y + E'_{R-Y}; \\ E'_G &= -0,509E'_{R-Y} - 0,194E'_{B-Y}, \\ E'_B &= E'_Y + E'_{B-Y}. \end{aligned} \right\}$$

Преимущества, полученные при разработке цветных телевизионных вещательных систем на основе принципа постоянной яркости, позволили обеспечить их совместимость с парком черно-белых телевизоров, находившихся в то время в эксплуатации. При этом шумы и помехи, возникавшие в канале цветности, влияли только на искажение цветности, не вызывая искажений яркости.

На практике в вещательных системах, основанных на принципе постоянной яркости, происходит потеря четкости цветного изображения [1]: обеспечивается точное воспроизведение яркости моноцветных изображений, но неточно воспроизводится яркость насыщенных цветов. В этом случае определенная доля яркости передается по каналу цветности. Вследствие того, что часть сигнала яркости проходит через канал цветности, который имеет более узкую полосу пропускания (имеется в виду сокращение отсчетов цветности в соответствии с форматами представления видеoinформации — 4:2:2, 4:2:0, 4:1:1 [2]), при передаче сигналов от генератора цветных полос возникают провалы яркости на границах перехода от одного цвета к другому.

Другим существенным недостатком передачи цветных сигналов по принципу постоянной яркости является ухудшение четкости воспроизведения моноцветных деталей и изображений по мере увеличения насыщенности цветов.

При передаче цветовой информации по вещательным каналам телевизионного тракта теряется до пяти градаций яркости синего цвета (к примеру, для синего цвета в диапазоне от 110 до 114 яркостные компоненты приобретают одно и то же значение, равное 13) и до трех градаций красного цвета. Четкость изображений, в сочетаниях цветов которых присутствуют красный и синий, также подвержена потерям по яркостной составляющей.

Потеря количества градаций яркости, обусловленная преобразованиями с использованием принципа постоянной яркости, недопустима во многих системах передачи видеoinформации. К таким системам относятся, например, специализированные системы видеонаблюдения, работающие в условиях низкой освещенности [3], и системы, в которых используются видеокамеры или устройства отображения, работающие только в моноцветном режиме. И наконец, наиболее распространенным способом передачи видеoinформации является печать цветных изображений на моноцветных печатающих устройствах, драйверы которых осуществляют перевод изображений в градации серого, что приводит к потере яркости отпечатанных изображений.

Недостатки, свойственные принципу постоянной яркости, устраняются при использовании нового подхода к представлению и передаче цветных сигналов.

В работе [1] предложен принцип постоянной цветовой яркости, в соответствии с которым преобразование первичных цветных телевизионных сигналов после гамма-коррекции осуществляется путем вычисления цветовой амплитуды передаваемого цвета. Для передачи информации о цветности формируются сигналы, отвечающие за насыщенность данного цвета синим и красным первичными цветами телевизионной камеры:

$$E'_C = \sqrt{E'_R{}^2 + E'_G{}^2 + E'_B{}^2};$$

$$E'_1 = E'_R / E'_C, E'_2 = E'_B / E'_C,$$

где  $E'_C$  — цветовая амплитуда передаваемого цвета;  $E'_1$  и  $E'_2$  — сигналы, определяющие насыщенность данного цвета красным и синим первичными цветами.

Восстановление первичных цветных сигналов осуществляется путем перемножения сигналов  $E'_C$  и  $E'_1$ ,  $E'_2$ :

$$E'_R = E'_C E'_1, E'_B = E'_C E'_2.$$

Сигнал  $E'_G$  формируется из сигналов  $E'_C$ ,  $E'_R$ ,  $E'_B$  согласно следующему преобразованию:

$$E'_G = \sqrt{E'_C{}^2 - E'_R{}^2 - E'_B{}^2}.$$

При реализации принципа постоянной цветовой яркости моноцветные изображения и детали изображений передаются с полной четкостью, так как для таких изображений сигналы



$E_1'$  и  $E_2'$  постоянны и все изменения цветовой яркости передаются по широкополосному каналу. Поэтому систему с цветовым кодированием по принципу постоянной цветовой яркости можно назвать моноцветно-широкополосной. В гетерохромных изображениях по узкополосным каналам передается информация о насыщенности цветных деталей синими и красными цветами, а также об изменениях пурпурной составляющей цвета. Таким образом, системы, использующие принцип постоянной цветовой яркости, лучше соответствуют особенностям зрительной системы человека и характеризуются меньшими потерями, связанными с распределением цветных деталей изображений (цветные изображения, как правило, содержат большое число крупных цветных деталей, которые имеют мелкие детали той же цветности).

Для численной оценки преимуществ рассматриваемого подхода в настоящей работе предлагается использовать энтропию яркостной составляющей восстановленного изображения, которая оценивается как

$$H(Y) = -\sum_{i=0}^{255} \left( \frac{n_i}{N} \right) \cdot \log_2 \left( \frac{n_i}{N} \right),$$

где  $n_i$  — частота появления пиксела яркостью  $i$ ,  $N$  — число пикселей в изображении.

Как следует из свойств энтропии, более информативным можно считать то цветовое преобразование, которое при одинаковых входных грациях яркости изображения, будет иметь большее значение энтропии для одного и того же входного сигнала. Другими словами, такое преобразование сохраняет большее количество информации о яркости исходного изображения.

В таблице приведены значения энтропии яркостного сигнала при передаче изображения на основе принципа постоянной яркости ( $Y_1$ ) и принципа постоянной цветовой яркости ( $Y_2$ ). Дополнительно приведены значения энтропии при использовании фильтров моноцветных преобразований, входящих в пакет PhotoShop [4]. Для проведения эксперимента были использованы тестовые изображения [5], различные по цветовым деталям.

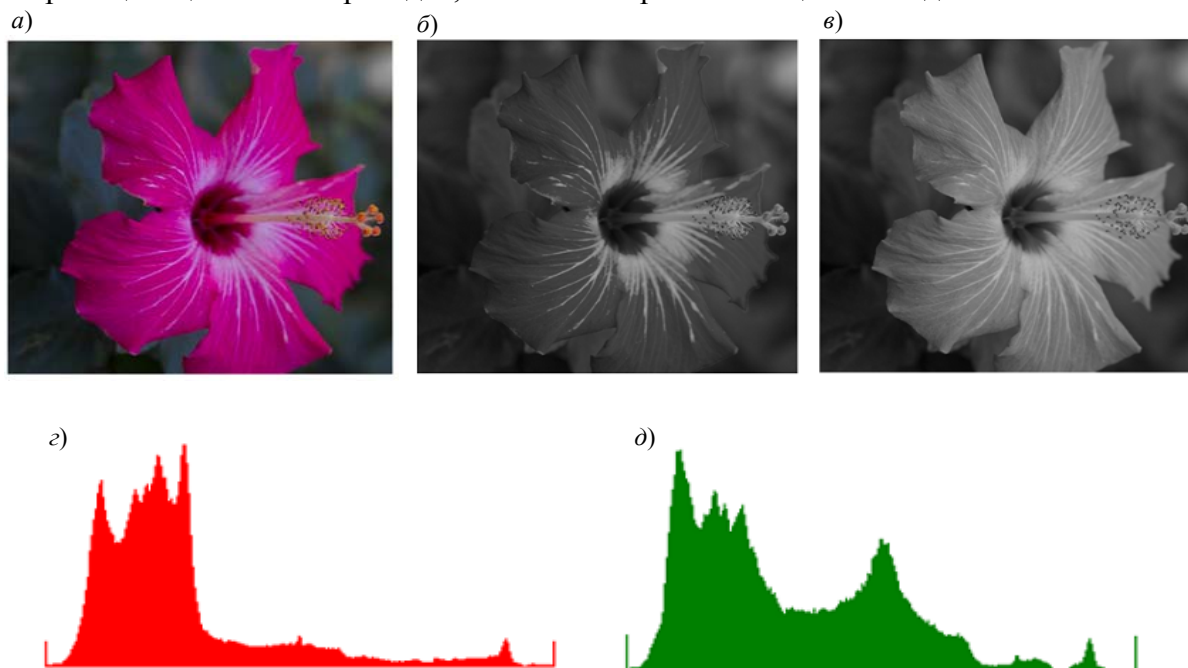
Тестовое изображение	$Y_1$	Photoshop, Grayscale	Photoshop, CMYK	Photoshop, LAB	$Y_2$
Tunnel	6,08	6,54	6,48	6,52	<b>6,67</b>
Hdr	6,98	6,65	6,64	<b>7,15</b>	7,06
Violet	6,80	6,51	6,45	6,45	<b>7,30</b>
Blue flowers	7,19	6,94	6,69	6,94	<b>7,34</b>
Flower foveon	6,98	6,92	6,88	6,92	<b>7,40</b>
Car	7,32	7,16	7,11	7,16	<b>7,44</b>
Bird	7,49	7,35	7,32	7,35	<b>7,53</b>
Fashion girl	7,48	7,23	7,18	7,23	<b>7,54</b>

Как видно из таблицы, предложенное преобразование сохраняет большее количество информации, чем преобразования, использующие принцип постоянной яркости и фильтры.

На рисунке приведены исходное изображение “flower foveon” (а), изображения яркостной составляющей, полученные с использованием принципа постоянной яркости (б) и принципа постоянной цветовой яркости (в), а также гистограммы распределения яркостей для систем, основанных на принципе  $Y_1$  и принципе  $Y_2$  (на рисунке г и д соответственно).

Использование системы передачи информации на основе принципа постоянной цветовой яркости для кодирования изображений и видеопоследовательностей, представленных в форматах с применением прореживания цветоразностных составляющих, позволяет получить выигрыш по четкости изображений. Это обусловлено тем, что в системе с постоянной яркостью часть яркостного сигнала теряется вследствие усреднения отсчетов цветоразностных компонентов.

В проведенном эксперименте для оценки потерь по четкости использовалось изображение “flower foveon”, которое насыщено цветами красного и синего оттенков. Было выполнено прямое преобразование и восстановление сигнала с применением принципа постоянной яркости и постоянной цветовой яркости, при этом было проведено прореживание цветоразностных составляющих в соответствии с форматом представления видеoinформации 4:2:0. В изображении, восстановленном по принципу постоянной яркости, наблюдалась потеря четкости границ на цветовых переходах, а также потеря мелких цветочных деталей.



Итак, принцип постоянной яркости, используемый при формировании цветочных телевизионных сигналов, имеет ряд недостатков, основными из которых являются уменьшение яркости насыщенных цветов и ухудшение четкости цветных изображений. Применение же принципа постоянной цветовой яркости позволяет повысить четкость исходных изображений, а значит, улучшить качество некоторых систем передачи видеoinформации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полосин Л. Л. Принцип постоянной цветовой яркости в телевидении // Телевизионная техника и связь. 1995. Спец. вып. С. 28—37.
2. Смирнов А. В., Пескин А. Е. Цифровое телевидение. От теории к практике. М. : Горячая Линия—Телеком, 2005. 349 с.
3. Уваров Н. Е. Цифровая обработка изображений в телевизионных системах наблюдения и охраны // CCTV фокус. 2004. № 3 [Электронный ресурс]: <[http://www.proccctv.ru/images/file/cctvfocus\\_09.pdf](http://www.proccctv.ru/images/file/cctvfocus_09.pdf)>.
4. [Электронный ресурс]: <<http://www.adobe.com/ru/products/photoshop/family/>>.
5. [Электронный ресурс]: <[http://www.imagecompression.info/test\\_images/](http://www.imagecompression.info/test_images/)>.

#### Сведения об авторах

**Тимофей Михайлович Сухов**

— аспирант; Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург; E-mail: [tuhov@mail.ru](mailto:tuhov@mail.ru)

**Евгений Александрович Беляев**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; E-mail: [e\\_beliaev@mail.ru](mailto:e_beliaev@mail.ru)

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
05.10.10 г.

Ю. Н. ЖУРАВЛЕВ, Д. С. ФЕДОРОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ

Получено соотношение для оценки тягового усилия низкочастотного электродинамического вибровозбудителя, служащего для поверки и градуировки датчиков ускорения. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** вибровозбудитель, датчик ускорения, акселерометр, магнитный подвес, взаимная индуктивность.

Во многих областях современной техники (сейсмология, космическая и авиационная индустрия, мощные энергетические установки, строительство высотных объектов, транспорт) широко используются датчики ускорения (акселерометры), работающие в диапазоне малых частот (0,01...5 Гц). Для поверки и градуировки таких датчиков требуются вибровозбудители, способные обеспечивать одномерные горизонтальные гармонические колебания поверяемого акселерометра. Малые частоты колебаний вызывают необходимость создания больших амплитуд перемещений для обеспечения приемлемых значений ускорений. Эта необходимость исключает возможность использования традиционного вибровозбудителя электромагнитного типа [1]. В связи с этим был выбран электродинамический тип вибровозбудителя с активным магнитным подвесом подвижной части [2].

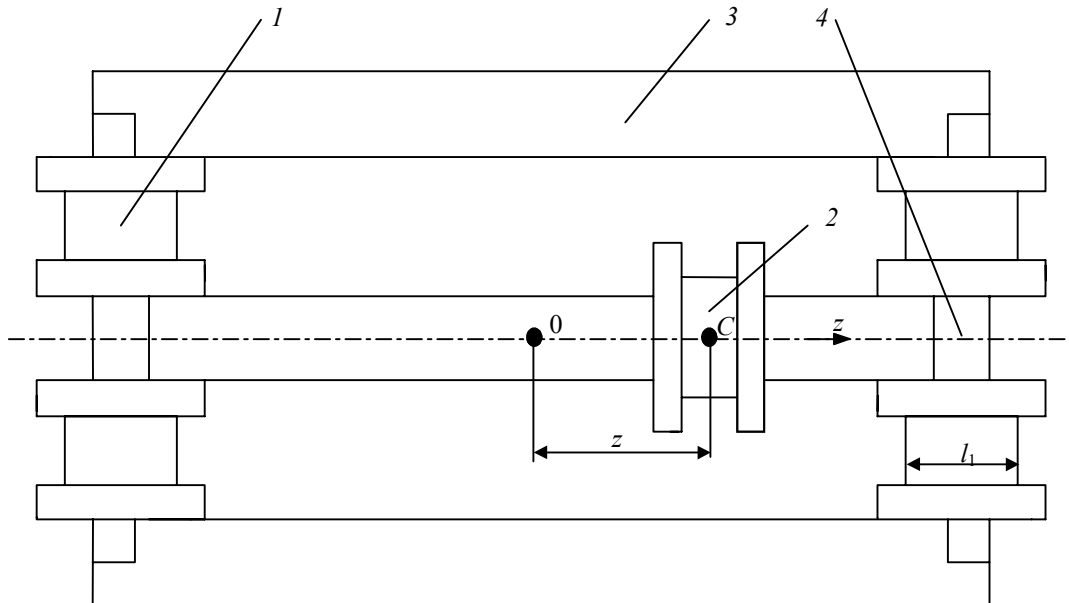


Рис. 1

Приводная часть вибровозбудителя (рис. 1) состоит из магнитопровода, четырех неподвижных катушек намагничивания 1 и одной подвижной катушки 2. Магнитопровод состоит из пяти горизонтально расположенных ферромагнитных стержней круглого поперечного сечения — трех продольных 3 и двух поперечных 4, соединяющих торцевые поверхности продольных стержней. Катушки намагничивания установлены на поперечные стержни, соединены последовательно, питаются постоянным током  $I_1$  и создают постоянное магнитное поле по всей длине рабочего воздушного зазора между центральным и боковыми продольными стержнями. Подвижная катушка свободно установлена на центральный продольный

стержень. При питании катушки синусоидальным током на нее действует в продольном направлении гармоническая сила электродинамического воздействия. Подвижная катушка вместе с прикрепленным к ней акселерометром образует подвижную часть вибровозбудителя, которая снабжена системой подвеса. Из двух возможных типов подвеса без трения — воздушного и магнитного — был выбран активный магнитный подвес [3].

Одним из основных параметров вибровозбудителя является его тяговое усилие. Цель настоящей статьи — получение выражения для тягового усилия вибровозбудителя данной конструкции и сравнительный анализ расчетных значений тягового усилия с экспериментально полученными данными.

Пусть  $z$  — координата центра подвижной катушки, отсчитываемая от середины длины магнитопровода. Записав выражение для магнитной энергии системы и взяв частную производную от нее по координате  $z$ , получим выражение для электромагнитной силы тяги:

$$P_{\text{эм}} = \frac{\partial L_{12}}{\partial z} I_1 i_2(t), \quad (1)$$

где  $I_1$  — ток катушек подмагничивания (первого контура);  $i_2$  — ток подвижной катушки (второго контура);  $L_{12}$  — коэффициент взаимной индуктивности контуров катушек намагничивания.

Взаимную индуктивность контуров можно определить как  $L_{12} = L_{21} = \Psi_{21}/I_1$ , где  $\Psi_{21}$  — потокосцепление катушек первого контура с витками  $w_2$  второго контура.

Предполагается, что магнитная система ненасыщенная и линейная, следовательно, магнитное сопротивление стали постоянно. Поэтому воспользовавшись принципом суперпозиции, декомпозируем магнитную систему на две подсистемы, одна из которых запитывается левыми катушками намагничивания, другая — правыми (рис. 2, а, б соответственно).

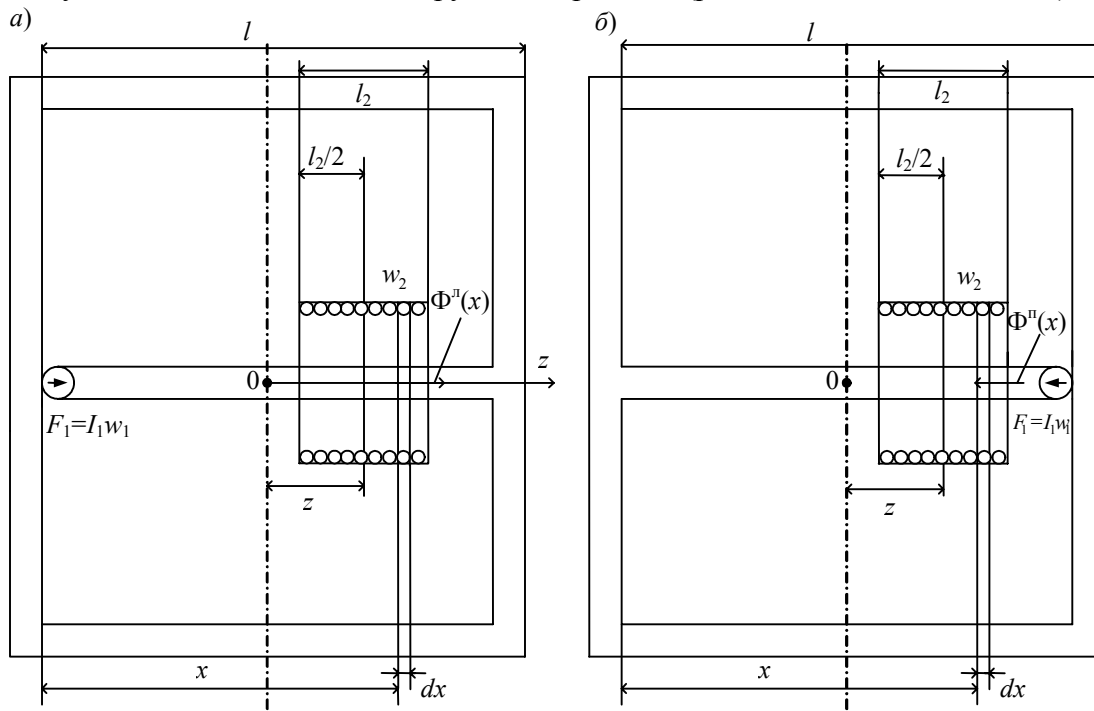


Рис. 2

Магнитодвижущую силу  $F_1 w_1$ , создаваемую двумя катушками намагничивания, расположенными на поперечном стержне, заменим магнитодвижущей силой, создаваемой одной катушкой, расположенной в начале продольного стержня. Тогда

$$\Psi_{21} = \Psi_{21}^{\text{л}} + \Psi_{21}^{\text{п}}, \quad (2)$$

где  $\Psi_{21}^{\text{л}}$  и  $\Psi_{21}^{\text{п}}$  — потокосцепления левой и правой катушек первого контура с витками второго контура.

В подвижной катушке выделим элемент длиной  $dx$  на расстоянии  $x$  от левого конца продольных стержней магнитопровода. Элемент имеет число витков  $dw = \frac{w_2}{l_2} dx$ , где  $l_2$  — длина обмотки подвижной катушки. При этом очевидно, что составляющая магнитной индукции ( $B$ ) в направлении оси  $z$  в воздухе равна нулю, а присутствует только радиальная составляющая. Кроме того, пусть диаметр  $l_1$  катушек намагничивания мал по сравнению с длиной магнитопровода  $l$ .

Полагая, что левые и правые катушки намагничивания создают встречно направленные магнитные потоки, имеем

$$\Psi_{21}(z) = \Psi_{21}^{\text{л}}(z) + \Psi_{21}^{\text{п}}(z) = \frac{w_2}{l_2} \int_{z-l_2/2}^{z+l_2/2} (\Phi^{\text{п}}(x) - \Phi^{\text{л}}(x)) dx. \quad (3)$$

Здесь принято, что направление магнитодвижущей силы подвижной катушки в рассматриваемый момент времени совпадает с направлением магнитного потока правой катушки  $\Phi^{\text{п}}(x)$ .

Определим магнитные потоки, создаваемые левой и правой катушками. Рассматриваемая магнитная система представляет собой магнитную цепь, состоящую из распределенных по длине  $l$  продольных и поперечных магнитных сопротивлений. При этом продольными магнитными сопротивлениями являются магнитные сопротивления ферромагнитных стержней, а поперечными — магнитные сопротивления воздушного зазора между центральным и боковыми стержнями. Данную магнитную цепь можно считать однородной, так как все продольные сопротивления участков стержней одинаковой длины равны друг другу и поперечные сопротивления участков цепи одинаковой длины в силу параллельности стержней также равны друг другу. Магнитными сопротивлениями торцевых стержней пренебрежем. Расчетная схема магнитной цепи, соответствующей системе, представленной на рис. 2, а, приведена на рис. 3, а. Через  $dx$  обозначен бесконечно малый элемент длины магнитной цепи, через  $dR$  — магнитные сопротивления элементов стержней, через  $dG$  — магнитные проводимости воздушного зазора между этими элементами, через  $\varphi$  — магнитный потенциал.

Учитывая, что  $\varphi_2 = F_1 - \Phi dR$ ,  $\varphi_3 = \varphi_1 = \frac{\Phi}{2} dR$ , имеем  $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_2 - \varphi_3 = F_1 - \Phi \frac{3}{2} dR = u_{21} = u_{23}$ , где  $u_{ij}$  — магнитное напряжение между точками  $i$  и  $j$ . Кроме того,  $2d\Phi = u_{21}dG + u_{23}dG = 2u_{21}dG$ . Исходя из этого, трехпроводную систему на первом участке можно заменить двухпроводной. Аналогичным образом от расчетной схемы, представленной на рис. 3, а, можно перейти к схеме, приведенной на рис. 3, б. Для этой упрощенной схемы

$\rho = \frac{3R}{2l} = \frac{R^{\text{пр}}}{l}$  — приведенное продольное магнитное сопротивление единицы длины магнитопровода;  $R$  — магнитное сопротивление одного стержня;  $R^{\text{пр}}$  — приведенное продольное магнитное сопротивление магнитопровода;  $g = 2\frac{G}{l} = \frac{G^{\text{пр}}}{l}$  — приведенная поперечная магнитная проводимость единицы длины цепи;  $G$  — магнитная проводимость зазора между двумя стержнями;  $G^{\text{пр}}$  — приведенная полная поперечная магнитная проводимость трех стержней.

Магнитное сопротивление стержня

$$R = \frac{u}{\Phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{l}{\mu S},$$

где  $S$  — площадь сечения стержня;  $\mu = \mu_r \mu_0$  — осредненная магнитная проницаемость материала. С учетом этого имеем

$$\rho = \frac{3}{2l} R = \frac{3}{2\mu S}; \quad R^{np} = \frac{3}{2} \frac{l}{\mu S}.$$

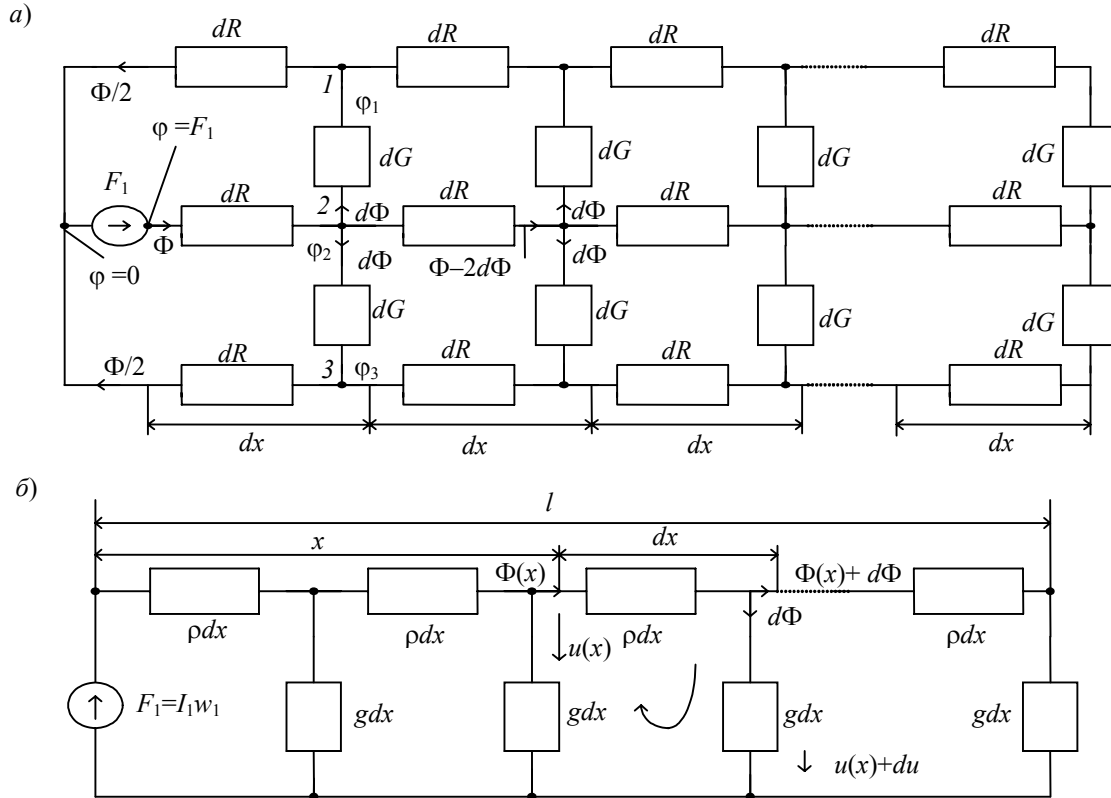


Рис. 3

Магнитную проводимость воздушного зазора между двумя параллельными стержнями длиной  $l$  и диаметром  $d$ , расположенными на расстоянии  $l'$  друг от друга, определим как [4]

$$G = \mu_0 \frac{\pi l}{\ln \left[ l'/d + \sqrt{\{(l'/d)^2 - 1\}} \right]}; \quad g = \mu_0 \frac{2\pi}{\ln \left[ l'/d + \sqrt{\{(l'/d)^2 - 1\}} \right]}; \quad G^{np} = 2G.$$

Из схемы на рис. 3, б следует, что для замкнутого контура, пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, по законам Кирхгофа можно получить следующие уравнения:

$$-\frac{du}{dx} = \rho \Phi(x); \tag{4}$$

$$-\frac{d\Phi}{dx} = g u(x), \tag{5}$$

где  $u(x)$  — магнитное напряжение между линиями эквивалентной двухпроводной схемы.

При решении уравнений (4) и (5) необходимо задать граничные условия: они известны только для  $u$  и имеют вид  $u = F_1$  при  $x = 0$ ;  $u = 0$  при  $x = l$ . Из этих же выражений вытекает дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2u}{dx^2} - a^2u = 0; \quad a = \sqrt{g\rho} = \frac{\sqrt{G^{\text{ип}} R^{\text{ип}}}}{l},$$

решением которого является следующее выражение:

$$u^{\text{л}} = F_1[\text{ch}(ax) - \text{cth}(al) \cdot \text{sh}(ax)]. \quad (6)$$

Подставив уравнение (6) в формулу (4), получим выражение для магнитного потока, создаваемого левой катушкой намагничивания:

$$\Phi^{\text{л}}(x) = F_1 \sqrt{g/\rho} \cdot [\text{cth}(al) \cdot \text{ch}(ax) - \text{sh}(ax)].$$

Проделав аналогичные операции для системы, приведенной на рис. 2, б, получим выражение для магнитного потока, создаваемого правой катушкой:

$$\Phi^{\text{п}}(x) = F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{sh}(al)} \text{ch}(ax).$$

Потоки  $\Phi^{\text{л}}(x)$  и  $\Phi^{\text{п}}(x)$  направлены встречно, поэтому суммарный магнитный поток

$$\Phi(x) = \Phi^{\text{п}}(x) - \Phi^{\text{л}}(x) = F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \left[ \frac{1}{\text{sh}(al)} \text{ch}(ax) + \text{sh}(ax) - \text{ch}(ax) \cdot \text{cth}(al) \right].$$

Введем переменную  $\xi = x - l/2$ , которая позволяет упростить выражение для магнитного потока. Получаем

$$\Phi(\xi) = F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{ch}(al/2)} \text{sh}(a\xi).$$

По формуле (3) находим

$$\Psi_{21}(z) = \frac{w_2}{l_2} \int_{z-l_2/2}^{z+l_2/2} \Phi(\xi) d\xi = \frac{w_2}{l_2} F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{a} \frac{2\text{sh}(al_2/2)}{\text{ch}(al/2)} \text{sh}(az).$$

Данное выражение преобразуется к виду

$$\Psi_{21}(z) = \frac{F_1 w_2 g}{\text{ch}(al/2)} \left( z + \frac{1}{6} a^2 z^3 \right).$$

Теперь можно определить коэффициент взаимной индуктивности контуров

$$L_{12}(z) = \frac{\Psi_{21}(z)}{I_1} = \frac{w_1 w_2 g}{\text{ch}(al/2)} \left( z + \frac{1}{6} a^2 z^3 \right). \quad (7)$$

Выражение для тягового усилия электродинамического вибровозбудителя получается путем подстановки формулы (7) в уравнение (1):

$$P_{\text{эм}} = \frac{\partial L_{12}}{\partial z} I_1 i_2(t) = \frac{F_1 F_2(t) g}{\text{ch}(al/2)} \left( 1 + \frac{1}{2} a^2 z^2 \right). \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что сила тяги будет гармонической при  $F_2(t) = w_2 I_2 \sin \omega t$ , если  $a = \sqrt{g\rho} = 0$ . Так как при  $g = 0$  имеем  $P_{\text{эм}} = 0$ , то необходимое условие принимает вид  $\rho = 0$ . Но так как даже при малых значениях индукции  $\rho \neq 0$ , то в выражении для силы тяги неизбежно наличие отклонения от гармонической зависимости. Это отклонение можно уменьшить за счет недопущения насыщения стали.

Выражение (8) для тягового усилия получено для случая встречного включения левых и правых катушек намагничивания. Используя те же рассуждения, для случая однонаправленного включения катушек, получаем

$$P_{\text{эм}} = \frac{\partial L_{12}}{\partial z} I_1 i_2(t) = \frac{F_1 F_2(t) g}{\text{ch}(al/2)} \left[ 1 + \frac{1}{2} a^2 z^2 + \text{ath} \left( \frac{al}{2} z \right) \right]. \quad (9)$$

Сравнительный анализ выражений (8) и (9) показывает, что схема однонаправленного включения имеет два существенных недостатка:

— величина  $P_{\text{эм}}$  существенно зависит от  $z$ , увеличиваясь при  $z > 0$  и уменьшаясь при  $z < 0$  за счет множителя  $\text{ath} \left( \frac{al}{2} z \right)$ ;

— в выражении для магнитного потока имеется значительная постоянная составляющая  $2F_1 \sqrt{\frac{g}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{sh}(al)} \cong \frac{2F_1}{R^{\text{пр}}}$ , которая приводит к насыщению стали магнитопровода.

Рассмотрим результаты экспериментов. Экспериментальные исследования производились на макете вибровозбудителя, созданном в Псковском государственном политехническом институте.

Макет имеет следующие параметры: амплитуда колебаний на частоте до 1 Гц равна 0,125 м; длина продольных стержней 0,66 м, поперечных стержней 0,42 м, диаметр стержней 10 см, воздушный зазор между продольными стержнями 6 см; постоянное магнитное поле в воздушных зазорах создается с помощью четырех катушек намагничивания, радиус катушки 10 см; подвижная катушка имеет радиус 7,4 см, зазор между катушкой и центральным стержнем магнитопровода, вдоль которого она движется, равен 8 мм; подвижная катушка имеет электромагнитный подвес, состоящий из четырех активных магнитных подшипников, движущихся вдоль двух параллельных направляющих диаметром 25 мм.

Измерение силы тяги производилось посредством измерения силы отрыва. На центральном стержне магнитопровода устанавливался упор. При взаимодействии токов подвижной и неподвижной катушек возникает сила, прижимающая подвижную катушку к упору. К подвижной катушке крепилась нить, перекинутая через блок, к другому концу нити подвешивался груз. Если постепенно уменьшать ток от некоторого максимального значения (1,4 А) до значения, при котором произойдет отрыв катушки от упора, то можно считать, что  $P_{\text{эм}} = mg$ , где  $m$  — масса груза. На неподвижные катушки подавался ток 4 А, на подвижную — 0,16...1,4 А.

Таким образом, была построена зависимость  $P_{\text{эм}}(I_2)$  при фиксированных значениях координаты  $z$  и тока  $I_1$  ( $z = 125$  мм,  $I_1 = 4$  А), график которой приведен на рис. 4, а. Анализ рисунка показывает, что расчетное значение силы тяги на 8—12 % выше экспериментального. Причиной расхождения могут быть не учтенные в расчетах такие факторы, как магнитные сопротивления стыков продольных и поперечных стержней магнитопровода; неоднородность магнитных свойств материала по длине стержней; потоки рассеяния катушек намагничивания.

Аналогичным образом была сформирована зависимость  $P_{\text{эм}}(z)$  при фиксированных значениях  $I_1 = 4$  А и  $I_2 = 0,4$  А (см. рис. 4, б). Из рисунка видно, что экспериментальная зависимость силы тяги от координаты имеет параболический вид, что качественно подтверждает теорию. Теоретическая кривая соответствует второму слагаемому в выражении (8) для силы тяги.

Также в ходе эксперимента на основе измерения магнитного потока при токах  $I_1 = 5$  А и  $I_2 = 1,5$  А было получено значение приведенной поперечной магнитной проводимости еди-



ницы длины магнитной цепи:  $g = 7,78 \cdot 10^{-6}$  Гн/м, что практически совпадает с расчетным значением  $g = 8,2 \cdot 10^{-6}$  Гн/м при тех же параметрах.

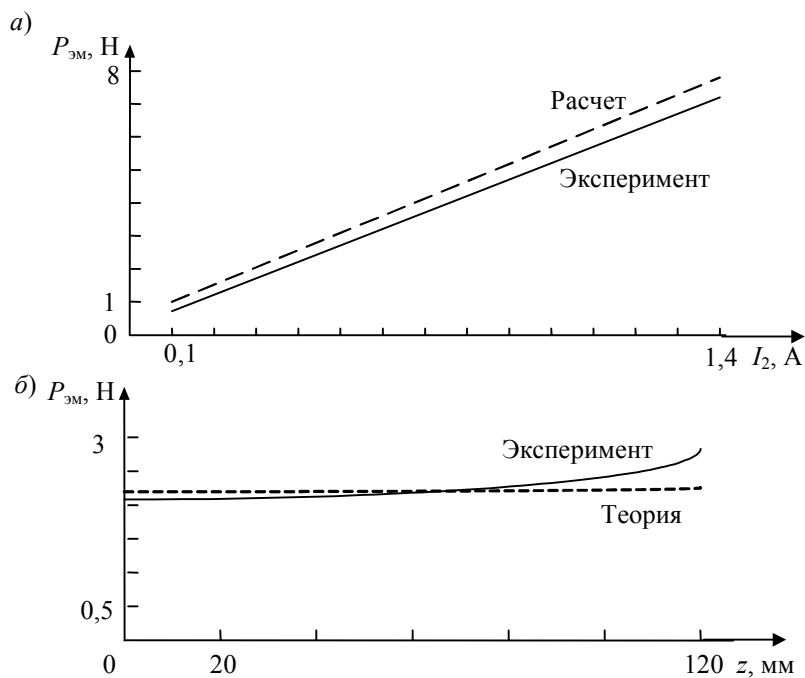


Рис. 4

Результаты эксперимента подтверждают качественно и с допустимой погрешностью количественно справедливость полученного теоретически выражения (8) для тягового усилия.

Результаты, изложенные в данной статье, были положены в основу создания низкочастотного электродинамического вибровозбудителя с магнитным подвесом подвижной части ВМГ-2\* [4]; его основные параметры: диапазон частот 0,1—5,0 Гц; максимальная амплитуда колебаний 500 мм; коэффициент нелинейных искажений 0,6 %; несущая способность магнитного подвеса 60 Н; коэффициент трения в подвесе менее 0,0002.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генкин М. Л., Русаков А. И., Яблонский В. В. Электродинамические вибраторы. М.: Машиностроение, 1975.
2. Грибов А. Н., Журавлев Ю. Н., Мацевич В. Г. Вибровозбудитель низкочастотной вибрации с активной магнитной подвеской подвижной части // Современные проблемы совершенствования средств измерений механических величин: Сб. Л.: Энергоатомиздат, 1986. С. 77—82.
3. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. СПб: Политехника, 2003. 206 с.
4. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Энергия, 1980. С. 488.
5. Zhuravlyov Y. N., Matceevich S. G., Kochevin F. G. et al. Low-frequency electrodynamic vibrator with magnetically suspended movable part // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Motion and Vibration Control. 1998. Vol. 3. P. 1063—1067.

#### Сведения об авторах

- Юрий Николаевич Журавлев** — д-р техн. наук, профессор; Псковский государственный политехнический институт, кафедра строительной механики
- Дмитрий Сергеевич Федоров** — Псковский государственный политехнический институт, кафедра электропривода и систем автоматизации; ассистент; E-mail kreator353@pochta.ru

Рекомендована кафедрой электропривода и систем автоматизации

Поступила в редакцию 26.03.10 г.

\* При совместном участии ФГУП „ВНИИМ им. Д. И Менделеева“ (Санкт-Петербург) и Псковского государственного политехнического института [5].

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.317.2

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, Е. В. ГАВРИЛОВ, А. П. ЖЕВЛАКОВ

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОБЪЕКТИВА ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФА

Рассмотрены современные предпосылки развития микроэлектроники: углубление в вакуумно-ультрафиолетовый рабочий диапазон, создание и применение зеркальных объективов предельной точности, построенных по схеме Шварцшильда, когда требования к точности измерения ошибок строже, чем  $\lambda/100$  для  $\lambda = 0,633$  мкм. На стадии финишной доводки оптических поверхностей объектива, в дополнение к дифракционной интерферометрии, необходима оценка качества изображения, сформированного объективом, с использованием прямого метода изофотометрии структуры изображения точки, чем преодолевается недостаток чувствительности интерференционного контроля.

*Ключевые слова:* нанолитограф, зеркальный объектив, дифракционная интерферометрия, компьютерная изофотометрия.

**Введение.** До последнего времени прогресс в развитии микроэлектроники обеспечивался возможностью непрерывно уменьшать минимальные размеры элементов интегральных микросхем благодаря усовершенствованию фотолитографических процессов. Дальнейшее развитие требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) рабочий диапазон [1]. На сегодняшний день таким способом достигнуто субмикронное разрешение. В последние годы наблюдается устойчивый интерес к проблеме создания оптических элементов, точность формы поверхностей которых составляет доли нанометра [2]. Это обуславливает актуальность поиска новых технологических решений. Например, при решении задач проекционной коротковолновой нанолитографии проблема, как правило, усложняется необходимостью изготовления асферических поверхностей, для которых одновременно с высокой точностью формы требуется обеспечить и низкую, на уровне 0,1 нм (т.е. микрошероховатость поверхности). Согласно одному из основных правил метрологии, погрешность средства измерения должна быть в 10 раз меньше измеряемого отклонения размеров изделия от номинальных. Поэтому погрешности аппаратуры для измерения деформации волнового фронта при создании таких оптических систем не должны превышать  $\lambda/100$  для  $\lambda = 0,633$  мкм [3].

Традиционно применяемый для измерения деформации волнового фронта метод интерферометрии базируется на измерении искривлений системы интерференционных полос. Неизбежные погрешности интерферометрического метода зависят в основном от двух причин [4]:

- погрешности определения координат интерференционных полос;
- погрешности образцовой детали, дающей опорный волновой фронт.

Порог чувствительности, т.е. предельная погрешность визуальной расшифровки координат интерференционных полос, составляет не менее 0,1 периода полосы для незашумленной интерферограммы.

Ограничение точности традиционных интерферометров (построенных, например, по схеме Физо или Тваймана — Грина), заключается в том, что в их конструкции предусмотрено применение образцового оптического элемента (обычно — образцовой оптической поверхности) для формирования опорного волнового фронта. Такой элемент создает волновой фронт с остаточными ошибками, в числе которых:

— остаточные ошибки изготовления: применяемые традиционно методы обработки и контроля точных оптических поверхностей не позволяют гарантировать, что погрешности формы оптических поверхностей будут меньше чем  $\lambda/20$ ;

— возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали в процессе эксплуатации.

Развитие методов интерферометрического контроля позволило использовать на этапе аттестации объектива интерферометры с дифракционной волной сравнения [4, 5], в которых устранены ошибки образцового оптического элемента ввиду его отсутствия в схеме контроля.

Современные методы специальной регистрации изображений дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине при оптических измерениях, но и преобразовать на компьютере структуру изображения к виду, позволяющему повысить в 10 раз точность его расшифровки [4]. Однако погрешности определения координат интерференционных полос с использованием современных технологий компьютерной расшифровки составляют 0,03—0,01  $\lambda$ , при этом точность контроля остается на уровне 0,1  $\lambda$ , что недостаточно применительно к контролю нанообъектива на стадии финишной доводки. Кроме того, для формирования интерференционной картины необходим режим автоколлимации, который, однако, не может быть реализован для всего объектива в целом, так как в этом случае, как известно, в зеркальных системах, состоящих из поверхностей, не имеющих зеркального покрытия, не хватает света. Поэтому необходимо разрабатывать методы контроля объективов, работающих на проходящем свете.

В настоящей статье приводится описание объектива для экспериментального нанолитографа и обосновывается необходимость использования современных методов компьютерной интерферометрии, а также методов компьютерной изофотометрии, позволяющих с высокой точностью исследовать структуру изображения, построенного созданным объективом.

**Описание объектива экспериментального нанолитографа.** Объектив имеет следующие расчетные характеристики:

рабочая длина волны — 13,4 нм,

числовая апертура — 0,36,

экранирование — 0,36,

размер поля изображения — 0,82×0,82 мм,

увеличение составляет –10,

среднеквадратичное отклонение волнового фронта по полю изображения — 0,01 $\lambda$ ...0,12 $\lambda$ ,

глубина фокуса для крайней точки поля изображения —  $\pm 15$  нм,

глубина фокуса для центральной точки поля изображения —  $\pm 50$  нм.

Оптическая схема и общий вид объектива экспериментального нанолитографа представлены на рис. 1, а, б соответственно; здесь 1 — маска (объект), 2 — главное (малое) зеркало, 3 — вторичное зеркало, 4 — плоскость резиста (плоскость изображения).

Уравнение, описывающее зеркало оптической системы, имеет следующий вид:  $y^2(z) = 2R_0z + (e^2 - 1)z^2 + A_3z^3 + \dots + A_nz^n$ , где  $R_0$  — радиус кривизны при вершине,  $e^2$  — квадрат эксцентриситета поверхности,  $A_3 \dots A_n$  — коэффициенты разложения полинома.

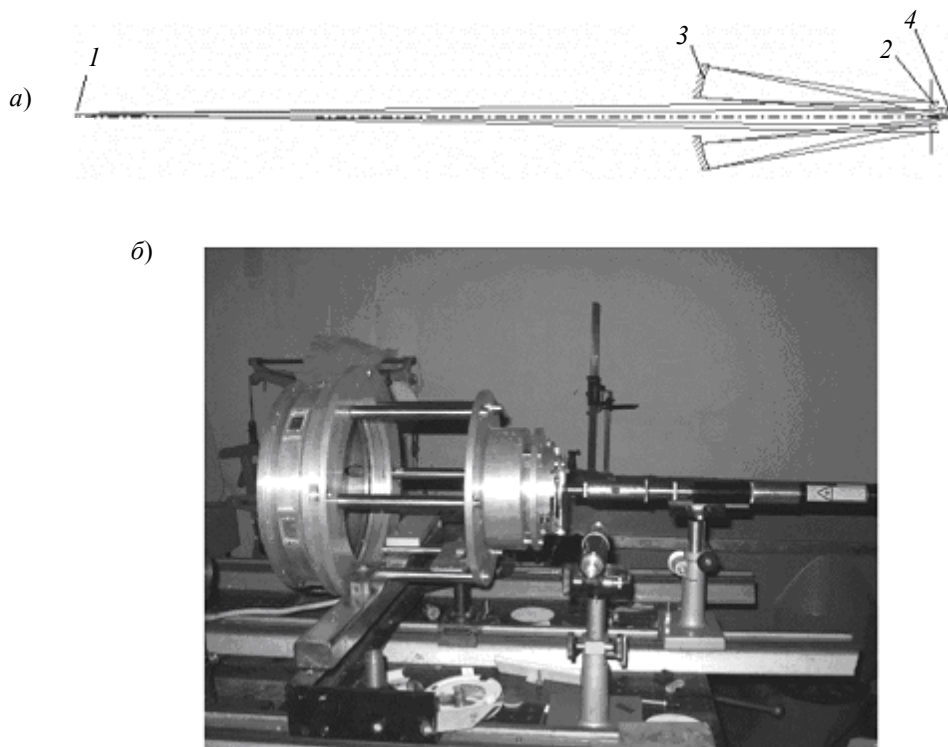


Рис. 1

Основные технологические характеристики асферических поверхностей, используемых в объективе, показаны в таблице.

Характеристика	Главное зеркало	Вторичное зеркало
Асферичность, мкм	14,6	16,5
Градиент, мкм/мм	0,06	0,02
Крутизна, ...°	7,5	18,63

При контроле остаточных ошибок изготовления этих поверхностей необходимо применение прямых методов измерения функции распределения интенсивности в изображении точечного тест-объекта, построенного нанообъективом в схеме контроля [6, 7].

**Методика изготовления объектива экспериментального нанолитографа.** Точность изготовления асферической поверхности зеркала нанообъектива связана с выбранной технологией обработки и системой контроля, обеспечивающей возможность выявления погрешностей формы поверхности детали с последующим однозначным их описанием в любой момент времени для оперативной коррекции технологического процесса [3].

Один из основных способов изготовления сложных асферических элементов — использование компенсационной схемы контроля. Необходимо, однако, отметить существенный недостаток этой схемы, который заключается в возможной неоднозначности результатов контроля поверхности в момент установки компенсатора в схему контроля. В этом случае суммарная ошибка оптической системы „компенсатор + исследуемая деталь“ очень велика и невозможно оценить погрешности формы поверхности никаким другим способом, кроме как теневым, который является только качественным, или с помощью интерферометра сдвига, точность которого ограничена определением самой величины сдвига.

Поэтому в случае двухзеркальных оптических систем классическим способом изготовления объектива является изготовление одного из зеркал в компенсационной схеме контроля.

Ошибки изготовления первого зеркала, полученные на этапе аттестации, вводятся в расчетную программу, например „ОПАЛ“ или „Zemax“, и путем пересчета формы поверхности второго зеркала достигается требуемое расчетное качество оптического изображения. Далее, в соответствии с новой формой поверхности второго зеркала вводятся изменения в технологический процесс. Контроль второго зеркала выполняется в схеме объектива. В рассматриваемом случае контроль изменения качества объектива осуществляется по изображению точки, формируемой оптической системой, и успешное изготовление объектива зависит от методов и средств контроля объектива по формируемой точке. Наиболее чувствительным методом, позволяющим в реальном масштабе времени получать основные характеристики оптической системы — частотно-контрастную характеристику (ЧКХ), функцию рассеяния точки (ФРТ) и функцию концентрации энергии (ФКЭ) изображения светящейся точки, является метод компьютерной изофотометрии [7, 8].

**Метод изофотометрии ФРТ.** Этот метод позволяет регистрировать перепады освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков ( $10^5$ ), строить кривые распределения освещенности в любом сечении и топограмму распределения освещенности, а также вычислять ФКЭ и ЧКХ [6, 8].

Метод фотографической изофотометрии основан на получении серии фотоснимков пятна рассеяния с изменяющимся временем экспозиции (рис. 2, а) и последующем получении совокупности фотометрических сечений, соответствующих различным уровням освещенности. Каждое фотометрическое сечение формируется как фигура с четким контуром. Линия контура называется изофотой. Таким образом, изофота есть геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты и равные значения уровня относительной освещенности. Изофота исследуемого оптического изображения формируется благодаря применению приемника изображения, обладающего световой характеристикой (или функцией преобразования — ФП) типа „импульс“ (см. рис. 2, б).

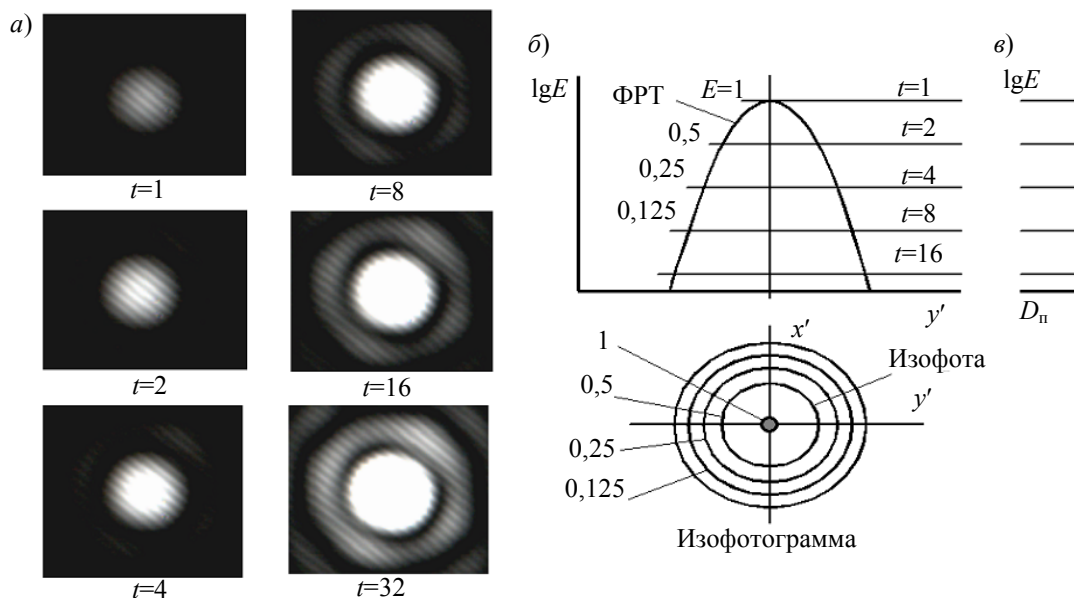


Рис. 2

Для получения системы изофот (изофотোগраммы) исследуемого распределения освещенности выполняется регистрация оптического изображения точечного тест-объекта в виде серии последовательных кадров при осуществлении ряда экспозиций различной длительности на приемник изображения с функцией преобразования типа „импульс“. Полученную суммарную ФП можно назвать функцией преобразования ( $D_n$ ) типа „гребенка“ (по латински — СОМВ). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов [8] (см. рис. 2, в).

Ряд экспозиций целесообразно располагать по шкале длительностей, значения которых определяются степенным законом возрастания:

$$t_i = 2^i, \quad (1)$$

где  $t$  — относительная продолжительность экспозиции.

Равномерная шкала логарифмов экспозиции приводит к перемещению импульсной функции преобразования вдоль оси абсцисс (см. рис. 2, б) с получением ряда фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону изменения интенсивности. Таким образом, достигается эффект перемещения импульсной функции преобразования в новые положения вдоль оси  $\lg E$ .

Процесс регистрации изображений (например, фотографический) подчиняется следующему закону взаимозаменяемости:

$$H = Et,$$

где  $H$  — экспозиция, соответствующая формированию заданного постоянного уровня сигнала изображения (например, максимальной плотности).

Для построенного семейства импульсных ФП  $D_n = f(\lg E)$  при  $t = \text{const}$  каждой отдельной функции соответствует определенное соотношение из следующей совокупности:

$$E_1 = H/t_1; \quad E_2 = H/t_2; \dots \quad E_n = H/t_n. \quad (2)$$

Нормируя полученный ряд значений освещенности к значению максимальной освещенности в данном распределении, получаем выражение в относительных (безразмерных) единицах:

$$E_{\text{отн}} = 1/t_{\text{отн}} \quad (3)$$

или в логарифмической форме:  $\lg E_{\text{отн}} = -\lg t_{\text{отн}}$ . При этом время  $t$  целесообразно задавать в целых числах, а относительную освещенность — в долях от максимального значения, принятого за единицу.

Формулы (2) и (3) являются основными выражениями, характеризующими структурометрический метод изофотометрической регистрации изображений.

На практике при контроле качества изображения, формируемого оптической системой, изображение светящейся точки многократно регистрируют на однотипный фотоприемник высокой контрастности при различных длительностях экспозиции.

Изофоты различных уровней освещенности, сформированные на отдельных снимках, совмещают в топограмму или карту распределения освещенности (изофотограмму).

В современных условиях методы изофотометрии используются в различных электронных приемниках изображения, включая матричные. При этом принципы изофотометрии, рассмотренные выше применительно к фотографическому приемнику изображения, полностью соблюдаются, как показали исследования, при использовании качественно иных приемников изображения, например телевизионных приемников, включая видеокамеры широкого назначения, а также цифровых фотокамер. Эти приемники способны изменять время накопления в широком диапазоне, что обеспечивает перепады регистрируемой освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков.

К достоинствам метода изофотометрии с изменяющимся временем накопления следует отнести большой диапазон измеряемого перепада освещенностей в пятне рассеяния и высокую светочувствительность; последнее особенно важно при недостатке световой энергии в схеме, например при контроле оптических поверхностей без зеркального покрытия. Недостатком метода является необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции: выполнение этого требования без применения компьютерных программ приводит к снижению оперативности исследований.

**Теоретические основы метода.** На основе изложенного алгоритма разработано программное обеспечение „КИЗО ФРТ“ (компьютерная изофотометрия) [7]. Таким образом, можно констатировать создание нового метода — компьютерной изофотометрии с изменяющимся временем накопления — и разработку схемного решения аппаратуры для его осуществления (рис. 3). В представленной схеме ПЗС-камера является приемником изображения, подключенным к компьютеру, который управляет режимом работы этой камеры, т.е. обеспечивает автоматическую регистрацию серии кадров с различным временем накопления.

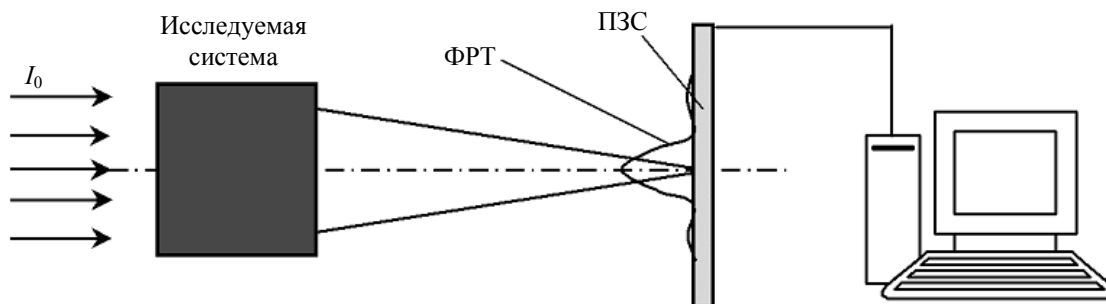


Рис. 3

Разработанный метод компьютерной изофотометрии позволяет определить ФРТ и обработать результаты измерения для получения ряда характеристик качества изображения, формируемого исследуемым объективом. Программа состоит из трех модулей.

1. Модуль „управление камерой“ использует драйвер, позволяющий потребителю ввести основные параметры изображения (такие как чувствительность, яркость, контраст), определить время накопления на основании результатов работы модуля сканирования ФРТ, передавать массив данных об изображении из камеры в память компьютера и пересылать изображение на экран.

2. Модуль „сканирование ФРТ“ позволяет определить  $t_{\min}$  для выделения первой изофоты, соответствующей максимуму ФРТ; последующие изофоты определяются описанным методом изофотометрии. Результаты измерений передаются в базу данных.

3. Модуль „анализ результата измерения“ позволяет получать значения ФРТ из базы данных и обрабатывать их для вычисления характеристик качества изображения исследуемой оптической системы, в числе которых:

- функция рассеяния линии (ФРЛ) (интегрирование ФРТ по направлению  $y$ );
- функция концентрации энергии (интегрирование ФРТ по радиусу  $r$ );
- пограничная кривая (интегрирование ФРЛ);
- частотно-контрастная характеристика (двумерное преобразование Фурье численного массива для ФРТ).

Исследуемая система закрепляется на специальном держателе, который позволяет вращать ее вокруг оси, перпендикулярной оптической оси и проходящей через узловую точку этой системы, для анализа изображения точки по полю.

Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления с использованием ПЗС-камеры представлена на рис. 4, а; осветительная часть данной схемы с применением нелазерного источника излучения приведена на рис. 4, б. Здесь приняты следующие обозначения: 1 — лазер; 2 — фотометрический клин; 3 — система для фокусировки лазерного пучка; 4 — точечная диафрагма; 5 — объектив коллиматора; 6 — исследуемый объектив; 7 — изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 8 — проекционный микрообъектив; 9 — видеокамера (приемник изображения); 10 — компьютер; 11 — лампа накаливания; 12 — конденсор; 13 — светофильтр; 14 — точечная диафрагма.

Порог чувствительности интерферометрии aberrаций, составляющий менее  $0,1\lambda$ , и aberrаций на уровне  $0,01\lambda$  на интерферограмме неразличим, что демонстрирует рис. 5, а, б соответственно.

Метод компьютерной изофотометрии позволяет оценивать качество изображения, формируемого исследуемой системой с чувствительностью на уровне  $0,01\lambda$ . Компьютерное отображение измеренной ФРТ при сферической aberrации  $0,1\lambda$  и  $0,01\lambda$  приведено на рис. 6, а, б соответственно.

Применение логарифмического масштаба при отображении изофотোগраммы позволяет различать aberrации на уровне менее чем  $\lambda/200$ .

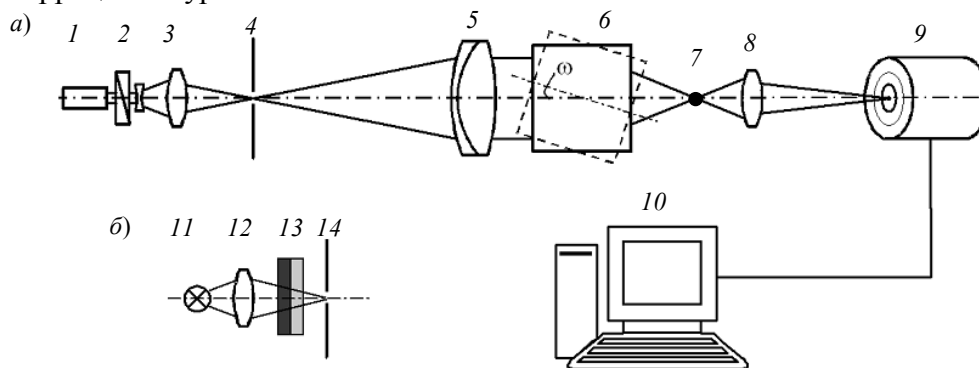


Рис. 4

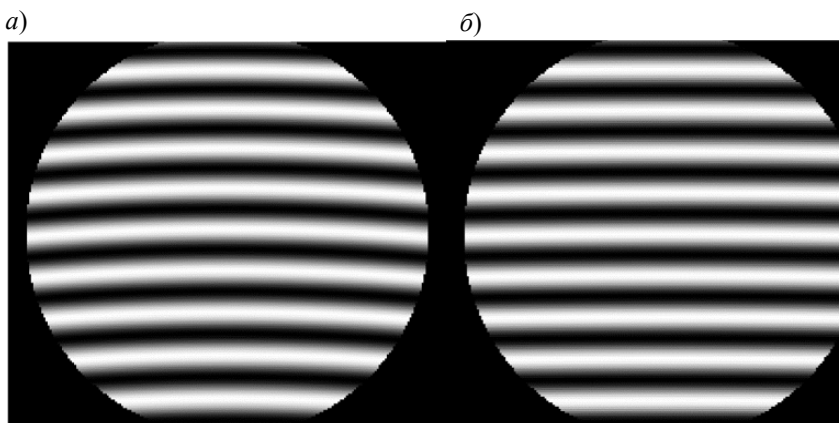


Рис. 5

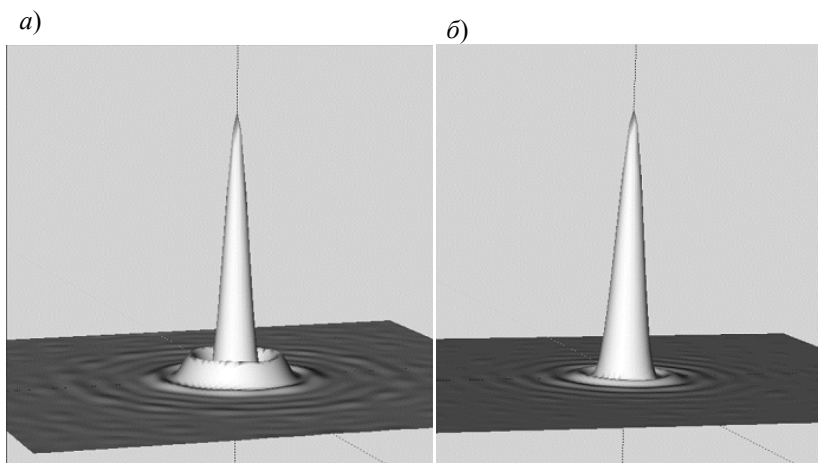


Рис. 6

### Заключение.

1. Дальнейшее развитие микроэлектроники требует углубления в вакуумно-ультрафиолетовый диапазон, для чего необходимо создание оптических элементов с точностью формы поверхностей на уровне долей нанометра.



2. Порог чувствительности, т.е. предельная погрешность визуальной расшифровки координат интерференционных полос, составляет величину не менее 0,1 периода полосы.

3. Применяя современные методы специальной регистрации и расшифровки, можно достичь точности контроля на уровне 0,01λ. Однако для контроля объектива экспериментального нанолитографа при работе в вакуумно-ультрафиолетовом диапазоне требуется чувствительность контроля, на порядок более совершенная.

4. Необходимая чувствительность контроля обеспечивается инновационным методом прямого измерения ФРТ в диапазоне освещенности до пяти порядков — методом компьютерной изофотометрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сейсян Р. П. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем ультрафиолете // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 5.
2. Pat. 5.212.588 USA. Reflective Optical Imaging System for EUV / Vriddhachalam K. Viswanathan. 1993.
3. Гаврилов Е. В., Бакаев М. И., Кирилловский В. К. и др. Состояние и перспективы развития оптики для рентгеновской литографии // Сб. трудов Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2008“. СПб: ГОИ им. С. И. Вавилова, 2008. С. 214—222.
4. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 104. с.
5. Кирилловский В. К., Петрученко И. Р. Дифракционные интерферометры. Л.: ЛИТМО, 1990. 76 с.
6. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
7. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения Ч. 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 128. с.
8. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 89 с.

#### Сведения об авторах

- Владимир Константинович Кирилловский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: vkkir@yandex.ru
- Егор Валерьевич Гаврилов** — Институт лазерной физики ФГУП НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“, Санкт-Петербург; E-mail: egor.gavrilov@itcitmo.ru
- Александр Павлович Жевлаков** — канд. физ.-мат. наук; Институт лазерной физики ФГУП НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики  
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
04.05.10 г.

А. А. ВОРОНИН, Е. В. СМИРНОВА, И. Н. ФАИЗОВ

## АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА

Приводится описание разработанной методики алгоритмической коррекции погрешностей портативных приборов на примере спектрофотометра, входящего в состав прибора „Кедр“, который предназначен для идентификации пород древесины. Предлагаемая методика позволяет повысить достоверность идентификации до 90 %.

**Ключевые слова:** спектр, спектрофотометр, эталон, алгоритмическая коррекция, температурная коррекция, погрешность измерения.

**Введение.** В настоящее время существует ряд задач по идентификации естественных и искусственных объектов, в частности, таких как порода древесины. Одним из вариантов решения подобных задач является применение спектрофотометрических методов неразрушающего контроля.

В Научно-производственном центре „Инновационная техника и технологии“ (Санкт-Петербург) разработан и создан прибор „Кедр“, предназначенный для идентификации лиственных и хвойных пород древесины на основе разработанных алгоритмов идентификации и ряда проведенных исследований. Принцип действия прибора основан на измерении, сравнительном анализе с эталонной базой данных и последующей математической обработке спектров диффузно отраженного от поверхности объекта (древесины) видимого и инфракрасного светового потока. В состав прибора „Кедр“ входит спектрофотометр, функциональная схема которого представлена на рис. 1, где 1 — фотометрический шар со встроенными источниками излучения 2 видимого и инфракрасного диапазонов; 3 — входная щель с электромеханической шторкой; 4, 6 — вогнутые стигматические дифракционные решетки; 5 — ПЗС-линейка (производства фирмы “Toshiba”); 7 — фотогальванический приемник ИК-излучения.

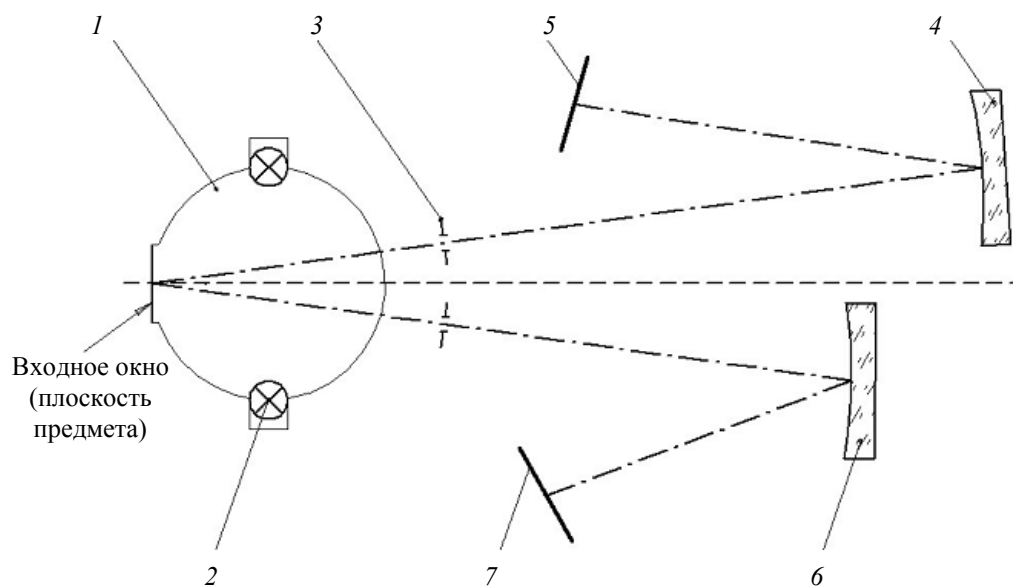


Рис. 1

Световой поток от источников излучения, размещенных в одной интегрирующей сфере, падает на торцевую поверхность исследуемого объекта, отражается от нее и через входную щель попадает на дифракционные решетки. Посредством диспергирующих элементов осуще-

ствляется разложение сигнала, полученного от исследуемого образца, в линейный спектр излучения и проецирование его на ПЗС-линейку приемников. С приемника сигнал поступает на встроенный микроконтроллер, где происходит его первичная обработка и преобразование в цифровой вид для дальнейшей передачи в компьютер.

Более подробно принцип работы и конструкция прибора „Кедр“ рассмотрены в работах [1, 2].

В ходе разработки и создания опытных образцов прибора был обнаружен ряд погрешностей при получении спектральной информации, влияющих на достоверность идентификации объектов. Для повышения достоверности распознавания необходима температурная коррекция результатов измерений. Настоящая статья посвящена алгоритмической (цифровой) коррекции нелинейности свойств приемников и источников излучения в зависимости от уровня интенсивности сигнала и рабочей температуры прибора [3, 4].

**Методика алгоритмической коррекции.** Алгоритмическая коррекция направлена на сохранение достоверности идентификации объектов в широком диапазоне температур. Суть алгоритмической коррекции заключается в следующем: выделяется фиксированный набор объектов (называемых далее эталонами), спектры диффузного отражения которых измерены как на стационарном оборудовании с высокой точностью, так и на портативном спектрофотометре, входящем в состав прибора „Кедр“. Различие вида спектров, полученных на стационарном и портативном спектрофотометрах, позволяет изучить факторы, повлиявшие на изменение вида спектральной информации. В ходе работы в качестве эталонов применялись четыре различные поверхности, внешне представляющие собой градацию серого цвета. Спектры диффузного отражения этих эталонов, измеренные на стационарном специализированном оборудовании в НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“ (Санкт-Петербург), представлены графиками на рис. 2 (кривые 1—4), здесь  $K$  — коэффициент диффузного отражения,  $\lambda$  — длина волны. На рис. 3 приведен график зависимости уровня интенсивности сигнала ( $p$ ) от длины волны, построенный при помощи портативного спектрофотометра.

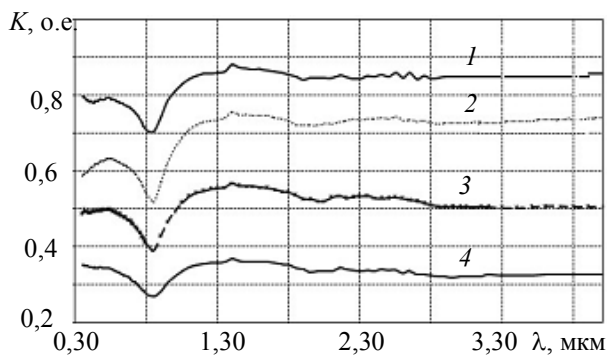


Рис. 2

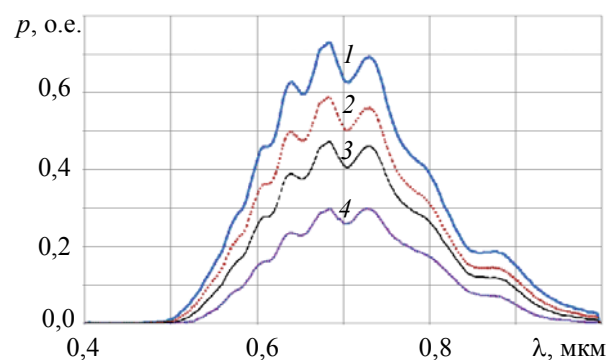


Рис. 3

**Математический аппарат алгоритмической коррекции.** Временно зафиксируем длину волны  $\lambda$ . Обозначим количество эталонов через  $n$ . На стационарном спектрофотометре интенсивность излучения этих эталонов равна  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , на портативном —  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Задача заключается в нахождении функции пересчета интенсивности, измеренной на портативном спектрофотометре, в интенсивность, измеренную на стационарном. Обозначим эту функцию через  $s(p)$ . В конкретной задаче ограничим вид функции  $s(p)$  и будем искать саму функцию методом наименьших квадратов, т.е. выбирать параметры так, чтобы число

$$I[s] = \sum_{i=1}^n (s(p_i) - s_i)^2$$

было минимально.

Экспериментально установлено, что функцию  $s(p)$  можно считать линейной (рис. 4). Положим

$$s(p) = Ap + B,$$

где  $A, B$  — параметры.

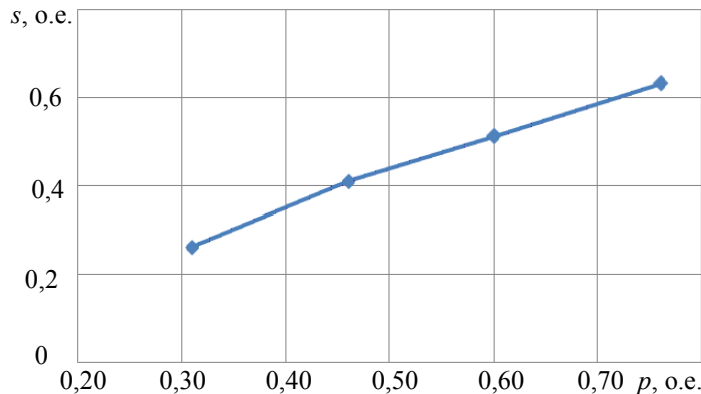


Рис. 4

Точка минимума функционала  $I[s]$  определяется из соотношений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial A} I[s] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial B} I[s] &= 0. \end{aligned} \right\}$$

В результате получена система из двух уравнений с двумя неизвестными ( $A, B$ ). Система всегда невырождена, поэтому решение существует, единственно и задается формулами

$$A = \frac{n \left( \sum_{i=1}^n p_i s_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n s_i \right) \left( \sum_{i=1}^n p_i \right)}{n \left( \sum_{i=1}^n p_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n p_i \right)^2}, \quad B = \frac{\left( \sum_{i=1}^n p_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n s_i \right) \left( \sum_{i=1}^n p_i \right)}{n \left( \sum_{i=1}^n p_i^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n p_i \right)^2}.$$

Отметим, что в рассматриваемом примере  $n=4$  и длина волны  $\lambda$  фиксирована. На самом деле все параметры в этих расчетах зависят от  $\lambda$ :  $p_i = p_i(\lambda)$ ;  $s_i = s_i(\lambda)$ ;  $A = A(\lambda)$ ;  $B = B(\lambda)$ ;  $s(p) = s(\lambda, p)$ .

После расчета функции  $s(\lambda, p)$  спектр диффузного отражения любого объекта, измеренный на портативном спектрофотометре, можно преобразовать в линию, близкую к спектру того же объекта, измеренному на стационарном спектрофотометре. Пусть измеренный спектр есть функция  $p(\lambda)$ . Тогда преобразованный спектр вычисляется по формуле

$$\tilde{p}(\lambda) = s(\lambda, p(\lambda)).$$

В ходе исследований было установлено, что спектр, получаемый на портативном спектрофотометре, существенно зависит от температуры прибора. При изменении температуры уровень интенсивности сигнала фотоприемника изменяется. Таким образом, в соответствии с принятыми обозначениями все данные, полученные на портативном спектрофотометре, являются также и функциями температуры:  $p_i = p_i(t, \lambda)$ ;  $A = A(t, \lambda)$ ;  $B = B(t, \lambda)$ ;  $s(p) = s(t, \lambda, p)$ . В этой связи спектры диффузного отражения эталонов измеряются не однократно, а в течение некоторого интервала времени, пока прогревается прибор. На рис. 5 показана зависимость уровня интенсивности сигнала, получаемого от одного и того же эталона на одной и той же длине волны, от температуры. Это фактически график функции  $p_i(t, \lambda)$  от аргумента  $t$  при фиксированных параметрах.

Термокоррекция заключается в построении функции  $s(t, \lambda, p)$  по значениям  $p_i(t, \lambda)$ . Отметим, что на практике сама функция  $p_i(t, \lambda)$  неизвестна, известны лишь ее значения при определенных значениях температуры:  $t_1 \dots t_j$ . Поскольку алгоритм вычисления функции  $s(t, \lambda, p)$  описан выше, достаточно построить семейство функций  $p_i(t, \lambda)$  по значениям  $p_{i,j}(\lambda)$ , где  $p_{i,j}(\lambda) = p_i(t_j, \lambda)$ .

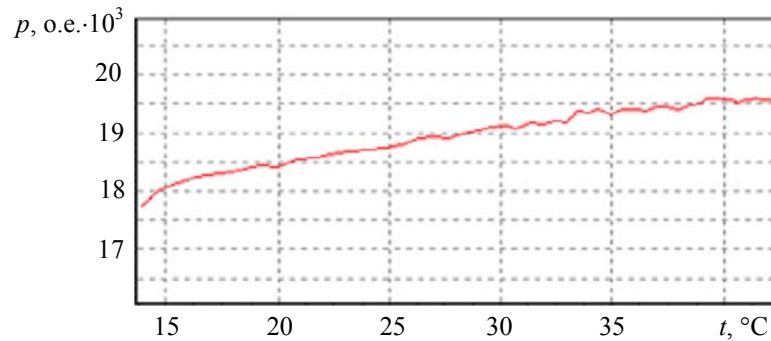


Рис. 5

Экспериментально установлено, что значение  $p_i(t, \lambda)$  можно искать в виде квадратичной функции, т.е.

$$p_i(t, \lambda) = At^2 + Bt + C. \quad (1)$$

Параметры  $A$ ,  $B$ ,  $C$  выбираются как точка минимума функционала

$$I[p_i] = \sum_{j=1}^m (p_i(t, \lambda) - p_{i,j}(\lambda))^2.$$

Точка минимума функционала  $I[p_i]$  определяется из соотношений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial A} I[p_i] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial B} I[p_i] &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial C} I[p_i] &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Выражения (2) представляют собой систему из трех уравнений с тремя неизвестными и решаются по методу Крамера.

Таким образом, определив коэффициенты  $A$ ,  $B$  и  $C$ , можно подставить их в уравнение (1) и получить полную зависимость свойств приемника от температуры.

**Заключение.** В результате применения методики алгоритмической коррекции погрешностей измерений удалось значительно повысить качество входящего в состав прибора „Кедр“ спектрофотометра и уменьшить погрешность измерения спектральных характеристик, что позволило обеспечить существенное повышение достоверности идентификации пород древесины с 15 до 90 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А. А., Смирнова Е. В., Смирнов А. П. К вопросу идентификации пород древесины с применением методов анализа спектров // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 2. С. 5—11.
2. Колгин Е. А., Ухов А. А., Воронин А. А. и др. Спектрометрическое устройство для идентификации пород древесины // Петербург. журн. электроники. 2008. № 2(55)—3(56). С. 116—120.
3. Воронин А. А., Митрофанов С. С. Исследование нелинейности позиционно-чувствительного приемника фирмы “Hamamatsu” // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 47—50.

4. Латышев С. М. Компенсация погрешностей оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1985.

#### Сведения об авторах

- Андрей Анатольевич Воронин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: v-electronics@mail.ru
- Елена Викторовна Смирнова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: smirnova-elen@yandex.ru
- Ильдар Николаевич Фаизов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра высшей алгебры и теории чисел; E-mail: ildar\_faizov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
16.02.10 г.

УДК 543.428.4+ 543.07 + 608.2

В. И. КОЖЕВНИКОВ, П. Г. МЕРЗЛЯКОВ, Г. Р. ВАЛЕЕВ

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ ЭС-2401 И ЭС-3201

Приведено описание разработанных конструктивных технологических узлов спектрометров ЭС-2401 и ЭС-3201 в целях расширения их экспериментальных возможностей для проведения исследований в области материаловедения и нанотехнологий.

**Ключевые слова:** спектрометр, модернизация, шлюзовая камера, удаление поверхностного слоя.

**Введение.** Старение научного сверхвысоковакуумного оборудования является проблемой не только российских, но и многих зарубежных исследовательских институтов. В связи с этим фирмы, занимающиеся изготовлением и продажей такого оборудования, предлагают варианты его модернизации. В частности, при модернизации фотоэлектронных спектрометров предусматривается замена блоков питания и программного обеспечения или установка так называемых „встраиваемых subsystem“, включающих анализатор энергии с блоками управления и современным программным обеспечением, а также оснащение устаревших модификаций приборов технологическими приставками для обработки образцов, установленных на более поздних моделях. Следует отметить, что при всей проработанности принципов действия технологических приставок их конструкция строго индивидуальна и определяется особенностями спектрометров, что не позволяет использовать их для оснащения спектрометров других марок.

Представляется целесообразной модернизация отечественных серийных электростатических фотоэлектронных спектрометров ЭС-2401 и ЭС-3201, разработанных Институтом аналитического приборостроения РАН (Санкт-Петербург). Было выпущено 35 спектрометров [1] и до настоящего времени эти приборы продолжают эксплуатироваться в институтах РАН, российских университетах, институтах бывших республик Советского Союза.

Вакуумный объем спектрометра разделен на две камеры — камеру энергоанализатора и камеру предварительной подготовки образца. Камеры разделены проходным вентилем с уплотняющим элементом из витона. Образец устанавливается на штوك-держатель, который кре-

питается к камере подготовки. При смене образца происходит вскрытие камеры, поэтому для получения сверхвысокого вакуума необходим регулярный прогрев спектрометра в течение 15—20 ч при температуре 150 °С. Камера подготовки промышленного образца спектрометра оснащена ионной пушкой для очистки и послойного травления образцов ионами инертных газов. Для подогрева образца используется нагреватель, который вводится извне в полость штока-держателя. Контроль температуры образца не предусмотрен. В камере анализатора размещены источник рентгеновского излучения, энергоанализатор и ионизационная камера. Конструкция штока-держателя позволяет перемещать образец из камеры предварительной подготовки в камеру анализатора и размещать его по отношению к ионной пушке и источнику рентгеновского излучения в строго определенном положении.

Конструкция промышленного спектрометра не позволяет проводить контролируемую обработку поверхности образцов непосредственно в вакуумном объеме спектрометра (адсорбцию газов, нагрев в вакууме или атмосфере заданного состава при определенной температуре); исследовать образцы, которые деструктурируются под действием ионной бомбардировки (например, фторсодержащие органические соединения, высокотемпературные сверхпроводники); реализовать рентгеноэлектронный анализ с угловым разрешением. На момент изготовления параметры энергоанализатора не уступали зарубежным аналогам того времени (ESCA фирмы “Vacuum Generators”), которые в настоящее время модернизируются и продолжают использоваться для решения задач материаловедения. Поэтому целью работы, описываемой в настоящей статье, явилась модернизация вакуумной системы спектрометров ЭС-2401 и ЭС-3201, направленная на расширение их экспериментальных возможностей для проведения исследований в области материаловедения и нанотехнологий. В соответствии с поставленной целью были разработаны:

- шлюзовая камера для смены образцов без нарушения вакуума в камерах предварительной подготовки и энергоанализатора;
- устройство контролируемого нагрева образца в газовой среде и вакууме;
- устройство механического удаления поверхностного слоя образцов, нестойких к нагреву и ионной бомбардировке;
- механизм поворота для изменения положения образца по отношению к рентгеновскому источнику и ионной пушке.

**Конструкция шлюзового устройства с системой транспортировки образцов.** Для ввода образца без нарушения вакуума в основных камерах спектрометров в конструкцию всех современных фотоэлектронных спектрометров входят шлюзовые устройства. Для спектрометров ЭС-2401 и ЭС-3201 разработаны два варианта шлюзовых устройств. Шлюзовое устройство с реечной системой транспортировки образцов, состоящей из рейки со сменным наконечником-образцедержателем, двух вводов вращения и фиксатора рейки, описано в работе [2].

Схема шлюзового устройства с системой транспортировки образцов с использованием постоянных магнитов приведена на рис. 1. Шлюзовая камера 4 и камера подготовки образца разделены проходным клапаном 5 с уплотняющим элементом. Все уплотняющие элементы выполнены из меди. Откачная система шлюзовой камеры выполнена по сверхвакуумному варианту. Образец 3, установленный на держатель, перемещается с помощью магнитной системы 1 по подшипникам 2. В камере подготовки образца 7 и камере энергоанализатора 8 установлены захваты 6, в которых образец фиксируется. Затем система перемещения возвращается в шлюзовую камеру, и проходной клапан между камерами 7 и 8 переключается.

Для уменьшения газовой выделенности с поверхности устройства перемещения образца, что влияет на условия проведения экспериментов, транспортировка образца в камеры спектрометра осуществляется одним штоком-манипулятором, который одновременно перемещает и фиксирует образец в камере подготовки с дальнейшим захватом и перемещением в камеру

анализатора. Этот способ принципиально отличается от используемых в известных устройствах, где для транспортировки и фиксации образца применяются дополнительные манипуляторы.

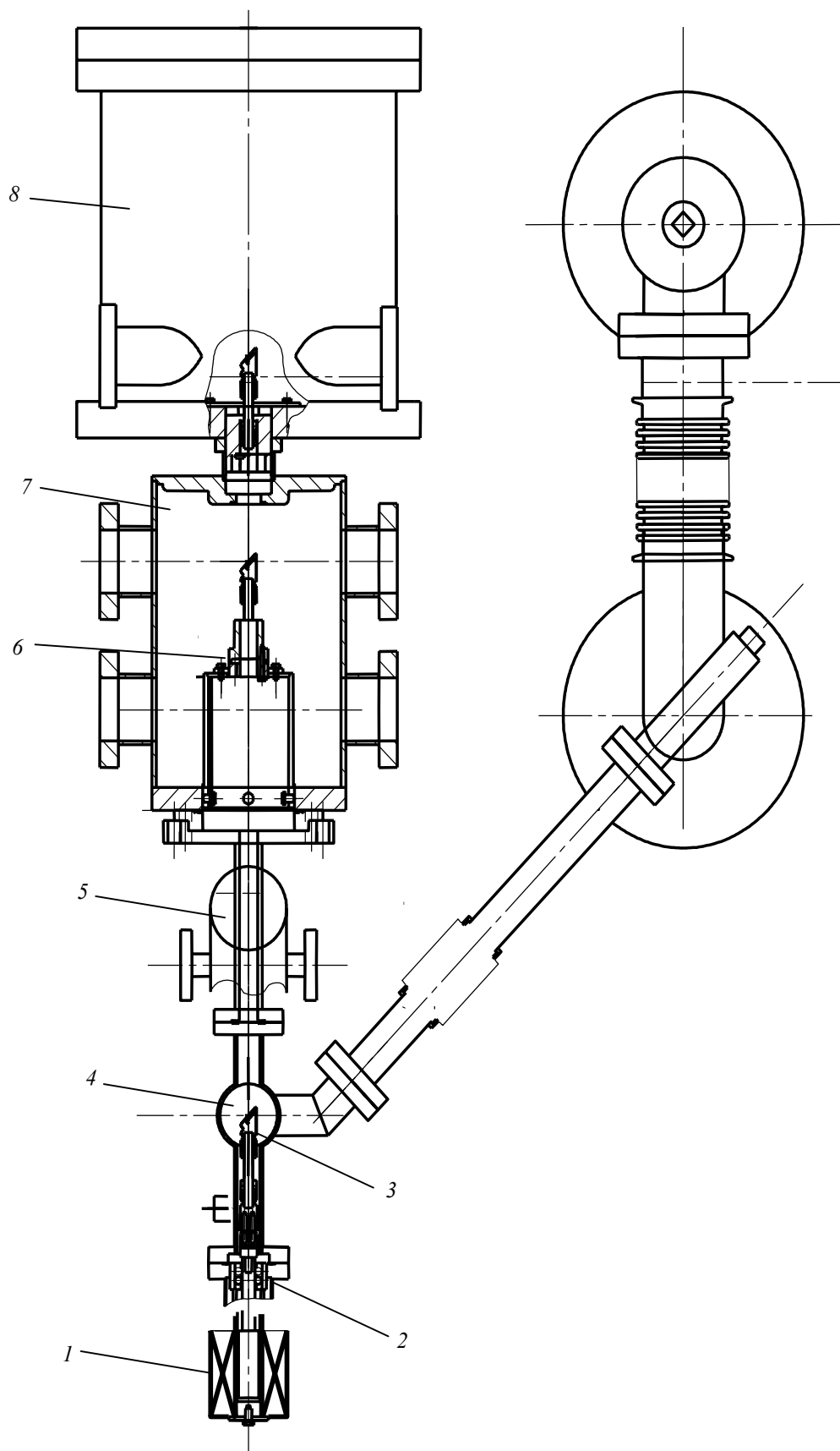


Рис. 1



**Технологические приставки для обработки образцов.** В камере предварительной подготовки установлены устройство нагрева образца и механизм механической чистки (скребок) его поверхности. Разработаны два варианта устройств для термообработки исследуемых образцов: устройства индукционного и электронного нагрева. Устройство индукционного нагрева образца до температуры 600 °С описано в работе [3].

Устройство электронного нагрева образца (рис. 2) собрано на двух фланцах с двумя одинаковыми механизмами перемещения на сильфонах 2 с высоковольтными изоляторами 1. Катод 3 подводится к образцедержателю 4 на расстояние 10—15 мм. Посредством второго механизма перемещения к образцу подводятся хромель-алюмелевая термопара 5 и высоковольтный контакт 6 положительного электрода источника. С термопарой на образец подается ускоряющее напряжение 4 кВ, ток эмиссии 10 мА. Это устройство позволяет нагревать образец до 1000 °С и контролировать температуру исследуемой поверхности с точностью 3 °С.

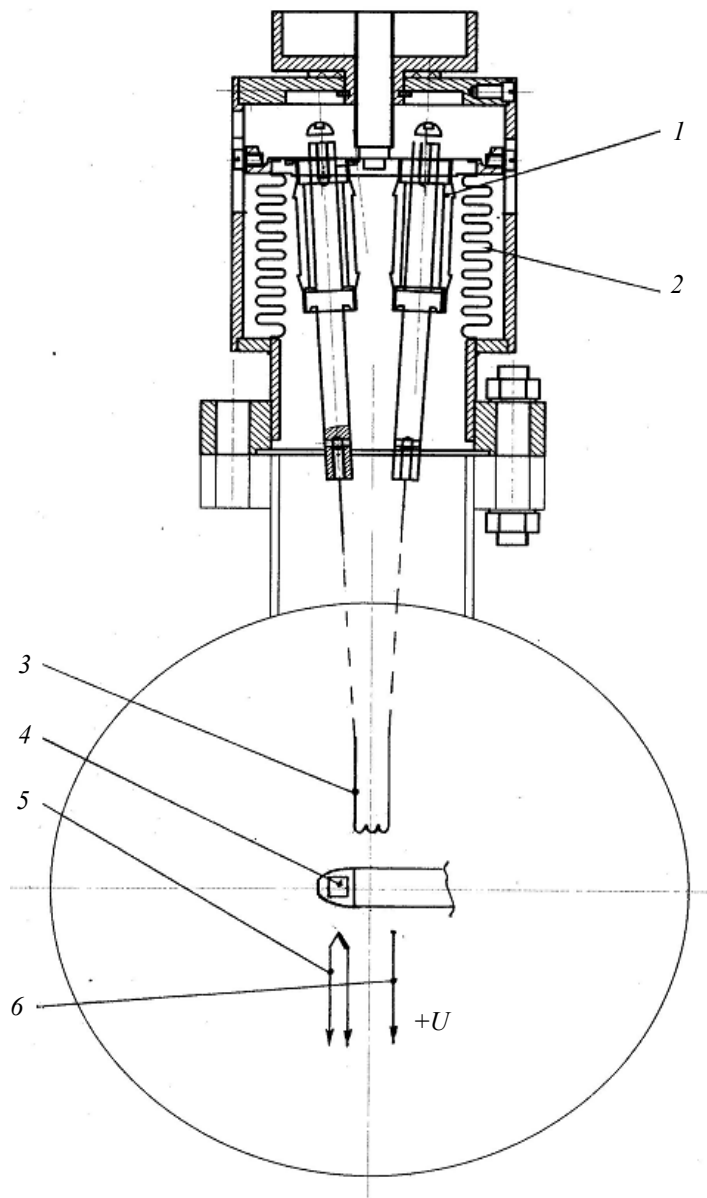


Рис. 2

Устройство механической чистки образца состоит из двух узлов, собранных на разных фланцах (рис. 3, а). На одном фланце собран упор 4, предотвращающий излом керамического изолятора, расположенного перед держателем образца. На втором фланце собран механизм

перемещения 1 резца 3 и поджима резца 2. Герметизация подвижных частей механизма — сильфонная. Резец изготовлен из сплава ВК-8. Схема работы механизма представлена на рис. 3, б, где 1 — держатель с образцом, 2 — упор, 3 — резец.

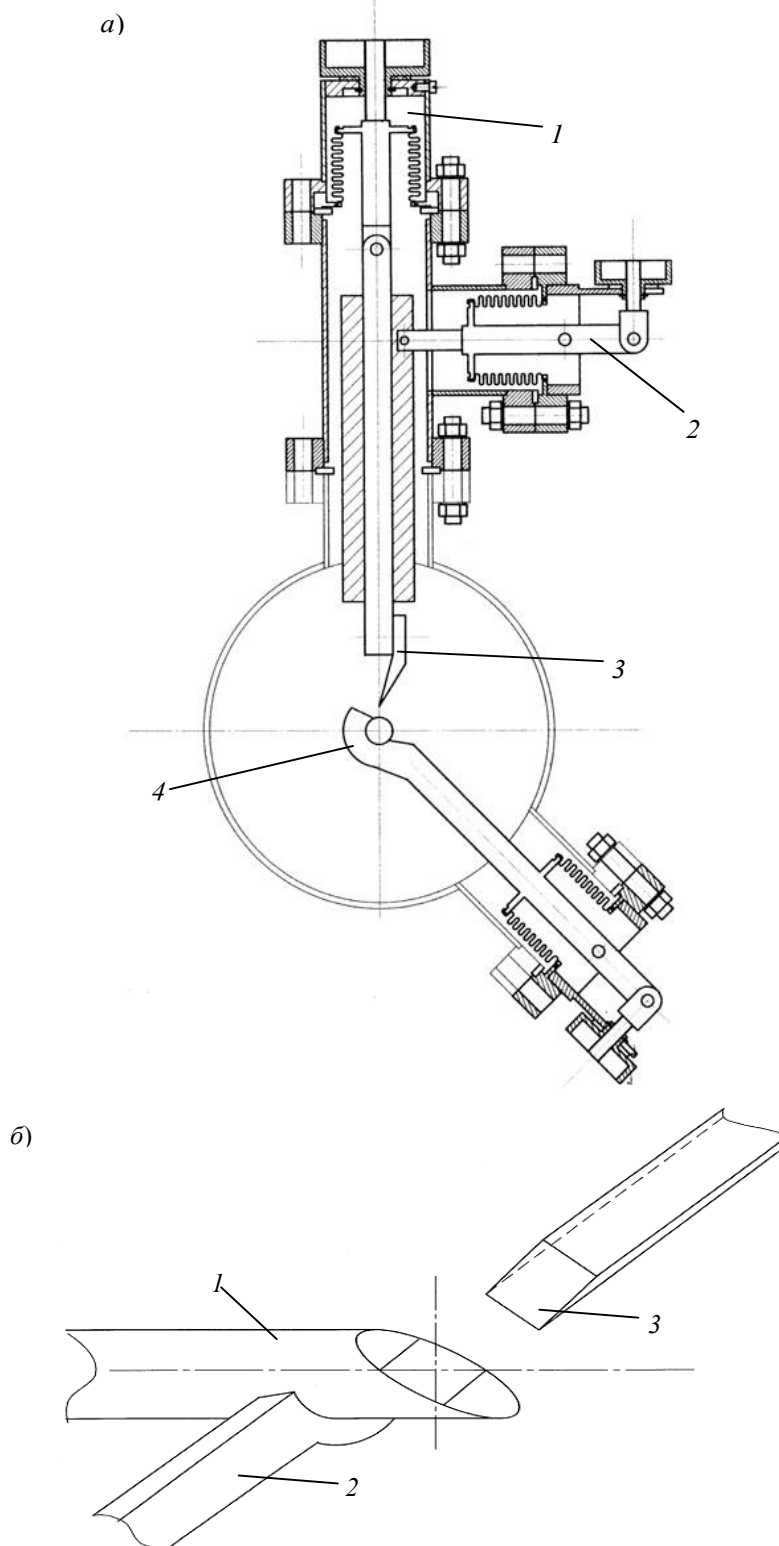


Рис. 3

**Механизм поворота образцов в ионизационной камере энергоанализатора (рис. 4).** Механизм поворота предназначен для изменения положения образца сложной формы по отношению к рентгеновскому источнику или ионной пушке.

Механизм размещен в корпусе 1. Поворот захвата 8 с подведенным к нему образцом 10 осуществляется с помощью микрометрического винта 2. Через разделительный сильфон 3 линейное перемещение передается посредством ленточной тяги 4, которая поворачивает барабан 6. Вращение барабана через изолятор 7 передается на захват 8. С помощью пружины 9 через ленточную тягу 5, закрепленную на барабане, осуществляется выборка люфтов в подшипниковых узлах и узлах крепления.

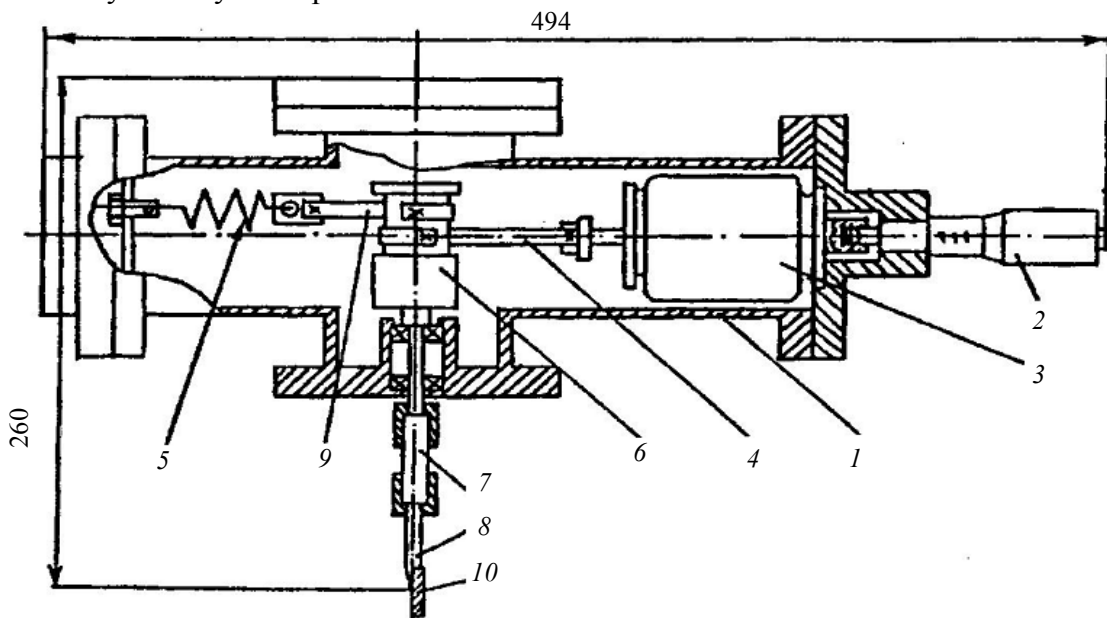


Рис. 4

**Заключение.** Представленный в статье вариант модернизации отечественного спектрометра позволяет проводить исследования в области материаловедения, связанные с влиянием внешних воздействий на поверхностные слои материалов.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук Ф. З. Гильмутдинову и канд. физ.-мат. наук О. М. Канунниковой за отработку методик использования технологических приставок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В. Д., Мамро Н. В. История и предпосылки развития отечественных инструментальных средств рентгено-фотоэлектронной спектроскопии // Науч. приборостроение. 2002. Т. 12, № 4. С. 35—41.
2. Вотяков В. А., Мерзляков П. Г., Кожевников В. И. Шлюзовая камера для электронных спектрометров // Заводская лаборатория. 1993. С. 24—25.
3. Кожевников В. И., Мерзляков Д. В., Гильмутдинов Ф. З. и др. Индукционный нагрев образцов в электронных спектрометрах // Приборы и техника эксперимента. 1991. № 2. С. 200—201.

#### Сведения об авторах

- Владимир Изосимович Кожевников** — Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, отдел физики и химии наноматериалов; ведущий инженер-конструктор;  
E-mail: olam@nm.ru
- Петр Геннадьевич Мерзляков** — ООО „Чистые технологии“, Ижевск; ведущий конструктор
- Геннадий Растамович Валеев** — ООО „Чистые технологии“, Ижевск; конструктор

Рекомендована  
Физико-техническим институтом УрО РАН

Поступила в редакцию  
15.02.10 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 536, 621.1

А. Л. ЕМЕЛЬЯНОВ, Е. С. ПЛАТУНОВ

## КИНЕТИКА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ

Рассматриваются условия теплообмена капель воды с воздушным потоком в свободном полете. Получены соотношения для оценки продолжительности испарения и охлаждения капли в потоке. Показано, в частности, что время охлаждения капли на два порядка меньше времени ее полного испарения, что позволяет использовать полученные соотношения при выборе режимов работы воздушно-испарительных охлаждающих устройств.

*Ключевые слова:* охлаждение приборов, кинетика испарения капель, теплообмен при испарении.

Одним из наиболее эффективных способов охлаждения теплонагруженных элементов приборов и устройств является их обдув предварительно адиабатно охлажденным на 5—10 К наружным воздухом. Однако при его высокой исходной влажности эффективность охлаждения резко снижается. Поэтому часто в воздушный поток добавляют воду, диспергированную до состояния мелких капель, и этим потоком обдувают соответствующие теплонагруженные элементы приборов. Эффективность теплосъема воздушно-капельного потока при этом резко возрастает не только за счет снижения его температуры до температуры мокрого термометра, но и благодаря интенсивному испарению капель в потоке при бомбардировке ими теплонагруженных металлических поверхностей приборов. Такой способ охлаждения позволяет в несколько раз увеличить коэффициент теплоотдачи, что существенно влияет на конструкцию соответствующих приборов, в частности генераторных ламп, узлов мощных компьютеров, тепловых труб, теплообменников в системах кондиционирования и т. п.

Настоящая статья посвящена анализу кинетики испарения капель воды при их свободном полете в воздушном потоке. Результаты такого анализа позволят сформулировать требования к оптимальному размеру капель в создаваемой воздушно-капельной смеси, чтобы обеспечить ей необходимую тепловую эффективность.

Рассмотрим ситуацию, когда капля воды с начальной температурой  $t_k(0)$  попадает в открытую воздушную среду с температурой  $t_c$ . Температура  $t_c$  и относительная влажность  $\varphi_c$  среды сохраняются, причем влажность  $\varphi_c$  остается ниже насыщенной. Примем для упрощения  $t_k(0) = t_c$ . Опыт показывает, что, несмотря на равенство температур, такая капля оказывается в неравновесном термодинамическом состоянии со средой и начинает испаряться. Первопричиной неравновесности при этом становится скачок парциального давления водяного пара, возни-

кающий вблизи границы „капля—воздушная среда“, так как на самой границе давление водяных паров сохраняется насыщенным для температуры  $t_k(\tau)$  поверхности капли [1].

Процесс испарения капли в рассматриваемых условиях происходит за счет диффузии водяных паров в воздушную среду и сопровождается быстрым охлаждением капли, так как расходуемая на испарение теплота поставляется непосредственно самой каплей. Однако по мере охлаждения между средой и каплей возникает обратный процесс теплообмена, подчиняющийся закону конвекции Ньютона. Поступающая к капле из среды теплота начинает сначала частично, а затем и полностью компенсировать теплоту испарения, благодаря чему температура капли стабилизируется и сохраняется такой до момента ее полного исчезновения.

Количественные закономерности испарения капель воды, принудительно впрыскиваемых в воздушный поток, имеют ряд особенностей, поэтому нуждаются в специальном анализе. Выделим среди них две основные. Во-первых, капля при испарении расходует свою массу и в конечном итоге исчезает. Во-вторых, следует учитывать, что мелкие капли находятся в потоке во взвешенном состоянии и подвержены значительному влиянию сил вязкого трения, поэтому движутся в воздухе с малыми относительными скоростями. Вокруг капли образуется устойчивый ламинарный пограничный слой, практически не искажаемый конвекцией и, тем более, возможной турбулентностью потока, поэтому диффузия пара от капли в среду осуществляется в основном на молекулярном уровне. А это означает, что происходящие при испарении капли тепло- и массообменные процессы остаются близкими к тем, которые имеют место при охлаждении мокрого термометра.

При испарении капли в системе „капля—среда“ действуют два изменяющихся во времени  $\tau$  встречных тепловых потока:

— тепловой поток испарения  $Q_{\text{и}}(\tau)$  от капли в среду (подчиняется эмпирическому закону Фика для диффузии):

$$Q_{\text{и}}(\tau) = q_{\text{и}} \alpha_{\text{м}} 4\pi r^2(\tau) [d_{\text{к}}(\tau) - d_{\text{с}}]; \quad (1)$$

— конвективный тепловой поток  $Q_{\text{т}}(\tau)$  от среды к капле (подчиняется эмпирическому закону Ньютона для тепловой конвекции):

$$Q_{\text{т}}(\tau) = \alpha_{\text{т}} 4\pi r^2(\tau) [t_{\text{с}} - t_{\text{к}}(\tau)]. \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2)  $q_{\text{и}}$  — удельная теплота испарения воды, Дж/кг;  $\alpha_{\text{м}}$  — коэффициент массоотдачи с поверхности капли в среду, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $r(\tau)$  — радиус испаряющейся капли (считаем, что капля сохраняет форму шара), м;  $d_{\text{к}}(\tau)$ ,  $d_{\text{с}}$  — влагосодержание воздушной среды на границе с каплей и вдали от нее соответственно;  $\alpha_{\text{т}}$  — коэффициент теплоотдачи капли в воздушную среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

На начальной стадии испарения капли ее температура и энтальпия быстро снижаются. Поэтому уравнение теплового баланса системы „капля—среда“ в общем случае имеет вид

$$Q_{\text{и}}(\tau) = Q_{\text{т}}(\tau) - c\rho \frac{4}{3} \pi r^3(\tau) \frac{dt_{\text{к}}}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость капли, Дж/(кг·К);  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Объединяя соотношения (1)—(3), получаем нестационарное дифференциальное уравнение для тепловых потоков:

$$\frac{1}{3} c\rho r(\tau) \frac{dt_{\text{к}}}{d\tau} + q_{\text{и}} \alpha_{\text{м}} [d_{\text{к}}(\tau) - d_{\text{с}}] - \alpha_{\text{т}} [t_{\text{с}} - t_{\text{к}}(\tau)] = 0. \quad (4)$$

Ограничимся упрощенным анализом процесса испарения капли. Для этого воспользуемся тем, что в рассматриваемой задаче температурное изменение энтальпии капли на два порядка меньше скрытой теплоты ее испарения. Следовательно, попадая в воздушный поток, капля очень быстро приобретает психрометрическую температуру, и процесс ее испарения протекает в основном при установившейся температуре.

Итак, на начальной стадии процесс охлаждения капли будем считать подчиняющимся уравнению

$$\frac{1}{3} c \rho r(\tau) \frac{dt_k}{d\tau} + q_n \alpha_m [d_k(\tau) - d_c] = 0, \quad (5)$$

а процесс испарения капли на основной стадии — стационарному уравнению теплового баланса

$$q_n \alpha_m [d_n(t_{пс}) - d_c] = \alpha_t (t_c - t_{пс}), \quad (6)$$

где  $t_{пс}$  — психрометрическая температура капли;  $d_n(t_{пс})$  — влагосодержание насыщенного воздуха при температуре  $t_{пс}$ , причем в уравнениях (5) и (6) всегда выполняется неравенство

$$[d_k(\tau) - d_c] > [d_n(t_{пс}) - d_c].$$

Уравнение (6) совпадает с уравнением теплового баланса мокрого термометра и хорошо исследовано. В частности, в области температур 293—353 К с высокой точностью выполняется соотношение [2]

$$\frac{t_c - t_{пс}}{d(t_{пс}) - d_c} = \frac{q_n \alpha_m}{\alpha_t} \cong 2,5 \cdot 10^3 \text{ К}. \quad (7)$$

Достоверность условия (7) подтверждается экспериментально. Физически это означает, что при испарении капель процессы теплопроводности и диффузии в воздушном потоке имеют общую, сугубо молекулярную тепловую природу.

Для дальнейшего анализа уравнений (5) и (6) необходимы дополнительные сведения [3]. С этой целью рассмотрим процесс переноса испаряющейся воды от капли в виде пара в воздушную среду. При испарении закон изменения массы подчиняется следующему уравнению:

$$\frac{dM}{d\tau} = -4\pi \rho r^2 \frac{dr}{d\tau}. \quad (8)$$

Этот поток массы в виде пара уносится с поверхности капли в воздушную среду. В соответствии с законом Фика имеем

$$\frac{dM}{d\tau} = \alpha_m 4\pi r^2 [d_k(\tau) - d_c]. \quad (9)$$

Соотношения (8) и (9) образуют дифференциальное уравнение, определяющее закономерности переноса массы капли в среду:

$$\rho \frac{dr}{d\tau} + \alpha_m [d_k(\tau) - d_c] = 0. \quad (10)$$

Дифференциальные уравнения (4) и (10) в совокупности определяют все особенности испарения капли в воздушной среде.

Чтобы исследовать начальную стадию испарения капли (стадию охлаждения), подставим уравнение (10) в формулу (5). После преобразований имеем

$$\frac{dt_k}{dr} \cong \frac{3q_n}{c r_0}, \quad (11)$$

где  $r_0$  — начальный радиус капли (учтено, что радиус капли на начальной стадии практически сохраняется).

Соотношение (11) позволяет количественно оценить справедливость допущения о том, что длительность стадии охлаждения мелких капель составляет лишь незначительную часть от общей длительности их испарения в воздушном потоке.

Для оценки длительности стадии испарения капель обратимся к уравнению (6) и преобразуем его с помощью выражения (10). Получаем новое дифференциальное уравнение

$$\frac{dr}{d\tau} + \frac{\alpha_t}{q_n \rho} (t_c - t_{пс}) = 0. \quad (12)$$

Найденное уравнение представляет самостоятельный интерес, так как позволяет определять скорость, а следовательно, и общую длительность испарения находящейся в воздушном потоке капли. Для этого достаточно принять во внимание, что вокруг свободно движущейся в воздушном потоке капли образуется сферический ламинарный пограничный слой, эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_T$  которого определяется простым по структуре выражением [1]

$$\alpha_T = \lambda_B / r, \quad (13)$$

где  $\lambda_B$  — коэффициент теплопроводности воздуха.

После подстановки в (12) соотношения (13) уравнение, характеризующее испарение капли, приобретает вид

$$r \frac{dr}{d\tau} = - \frac{\lambda_B}{q_{и} \rho} (t_c - t_{пс}). \quad (14)$$

На стадии испарения капли правая часть уравнения остается постоянной (не зависящей от времени  $\tau$ ), поэтому уравнение (14) допускает прямое интегрирование. Из него, в частности, следует, что продолжительность испарения капли  $\tau_{исп}$  может оцениваться с помощью выражения

$$\tau_{исп} = \frac{q_{и} \rho r_0^2}{2\lambda_B (t_c - t_{пс})}. \quad (15)$$

В качестве примера оценим продолжительность начального охлаждения  $\tau_{охл}$  и последующего испарения  $\tau_{исп}$  капли с начальным радиусом  $r_0 = 0,1$  мм, если она находится в воздушном потоке с температурой  $t_c = 308$  К и приобретает при испарении психрометрическую температуру  $t_{пс} = 298$  К. При удельной теплоте испарения воды  $q_{и} \cong 2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг, ее удельной теплоемкости  $c = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К) и плотности  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> теплопроводность воздуха составляет  $\lambda_B = 0,023$  Вт/(м·К); из соотношения (15) получим общую продолжительность испарения капли  $\tau_{исп} = 50$  с.

Для оценки продолжительности охлаждения капли  $\tau_{охл}$  следует еще раз обратиться к уравнениям (5), (6) и учесть, что второй член уравнения (5) по мере охлаждения капли плавно уменьшается, причем его предельное значение определяется уравнением (6). Поэтому при оценке величины  $\tau_{охл}$  вместо уравнения (5) можно воспользоваться уравнением

$$\frac{1}{3} c \rho r_0 \frac{dt_k}{d\tau} + \alpha_T (t_c - t_{пс}) = 0 \quad (16)$$

и учесть, что на стадии охлаждения  $\alpha_T \cong \lambda_B / r_0$ .

Из уравнения (16) следует, что время, за которое капля на стадии охлаждения успеет достигнуть психрометрической температуры  $t_{пс}$ , т.е. изменить свою температуру на величину  $(t_c - t_{пс})$ , можно приближенно определить с помощью соотношения

$$\tau_{охл} = \frac{c \rho r_0}{3\lambda_B}. \quad (17)$$

Из выражения (17) получаем, что в рассматриваемом примере продолжительность охлаждения капли близка к  $\tau_{охл} = 0,6$  с, т.е. практически на два порядка меньше продолжительности ее полного испарения, что согласуется с априорными оценками.

Таким образом, при оценках продолжительности охлаждения и полного испарения капель воды, впрыскиваемых в воздушный поток, вполне могут использоваться полученные расчетные выражения (17), (15), из которых четко видно, что время „жизни“ впрыскиваемых в воздушный поток капель воды оказывается обратно пропорциональным их начальному радиусу. В частности, капли с начальным радиусом  $r_0 = 0,01$  мм испаряются в потоке за время  $\tau_{исп} \cong 0,5$  с.

Найденные выше закономерности испарения капель могут быть использованы при выборе конструкции и режима работы воздушно-испарительных и охлаждающих устройств теплонагруженных элементов приборов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
2. Кафаров В. В. Основы массопередачи. Системы газ—жидкость, пар—жидкость, жидкость—жидкость. М.: Высш. школа, 1979.
3. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. 560 с.

#### *Сведения об авторах*

- Анатолий Леонович Емельянов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, кафедра кондиционирования воздуха; E-mail: info@petroclime.ru
- Евгений Степанович Платунов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, кафедра физики

Рекомендована кафедрой  
физики

Поступила в редакцию  
16.12.09 г.



В. П. ВЕЙКО, Т. В. БЕЖЕНАР, В. А. ЧУЙКО, Г. Д. ШАНДЫБИНА, М. В. ЯРЧУК

## ЛАЗЕРНАЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПЛЕНОК ХРОМА

Представлены результаты экспериментальных исследований морфологии пленок хрома на отдельных этапах лазерной записи. Анализируются основные механизмы записи „скрытого“ изображения. Предложена методика оценки разрешающей способности термохимического метода записи.

*Ключевые слова:* лазерная запись, лазерное окисление, термохимические реакции.

**Введение.** Прогресс во многих современных областях науки и техники связан с использованием оптических элементов абсолютного контраста, которые представляют собой прозрачные пластины с нанесенной на их поверхность микроструктурой. Это, в первую очередь, фотосаблоны микросхем, дифракционные оптические элементы, а также различные шкалы и сетки оптических приборов, кодовые маски фотоэлектрических преобразователей информации, лимбы, растры, элементы микромеханики и т.п.

При записи микроизображений предпочтительно использовать малостадийные технологии. К их числу относится лазерная термохимическая запись. Особенностью лазерной термохимической технологии является то, что в результате инициированного лазерным излучением нагрева тонкой металлической пленки (ниже температуры ее плавления) происходит необратимое изменение свойств и состава пленки, локализованное в пределах нагреваемой зоны, т.е. образуется „скрытое“ изображение. Область скрытого изображения отличается по физическим свойствам и химическому составу от исходной пленки, поэтому проявление пленки в селективном травителе позволяет выявить записанную структуру [1].

В настоящее время широкое распространение получил термохимический метод микроструктурирования сканирующим непрерывным лазерным излучением видимого диапазона [2, 3], позволяющий изготавливать уникальные дифракционные оптические элементы. Выявляемые в ходе практического использования погрешности термохимического метода записи микроизображений [4] могут быть устранены эмпирическим путем. Исследование особенностей механизма записи скрытых изображений позволит предвидеть появление возможных дефектов и избежать их появления, что будет способствовать расширению практического использования термохимического метода записи.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований морфологии пленок хрома на отдельных этапах лазерной записи, проанализированы возможные механизмы записи скрытого изображения и предложена упрощенная экспериментальная методика оценки разрешающей способности термохимического метода записи.

**Исследование морфологии поверхности пленок хрома на различных этапах обработки.** Термохимическая запись скрытых изображений на пленках хрома состоит из двух этапов: экспозиции сфокусированным лучом лазера и последующей обработки пленки хрома в селективном травителе. В ходе исследований использовалось излучение азотного лазера (длительность импульса 8 нс, размер сфокусированного пятна примерно 10—40 мкм, число облучающих импульсов 5—10, а в качестве образцов — пленки хрома толщиной 60 нм, нанесенные на стеклянные подложки. Подобные структуры применяются при изготовлении фотомасок в микроэлектронике.

На рис. 1, *a* — *в* приведены изображения поверхности пленки хрома, полученные на различных этапах записи: *a* — исходная пленка; *б* — лазерооблученная (ниже температуры испарения) пленка; *в* — пленка после операции селективного травления. Изображения получены с помощью сканирующего зондового микроскопа “NanoEducator”, работающего в режиме атомно-силовой моды. При этом сканирование осуществлялось по площади, не превышающей размера сфокусированного лазерного пятна.

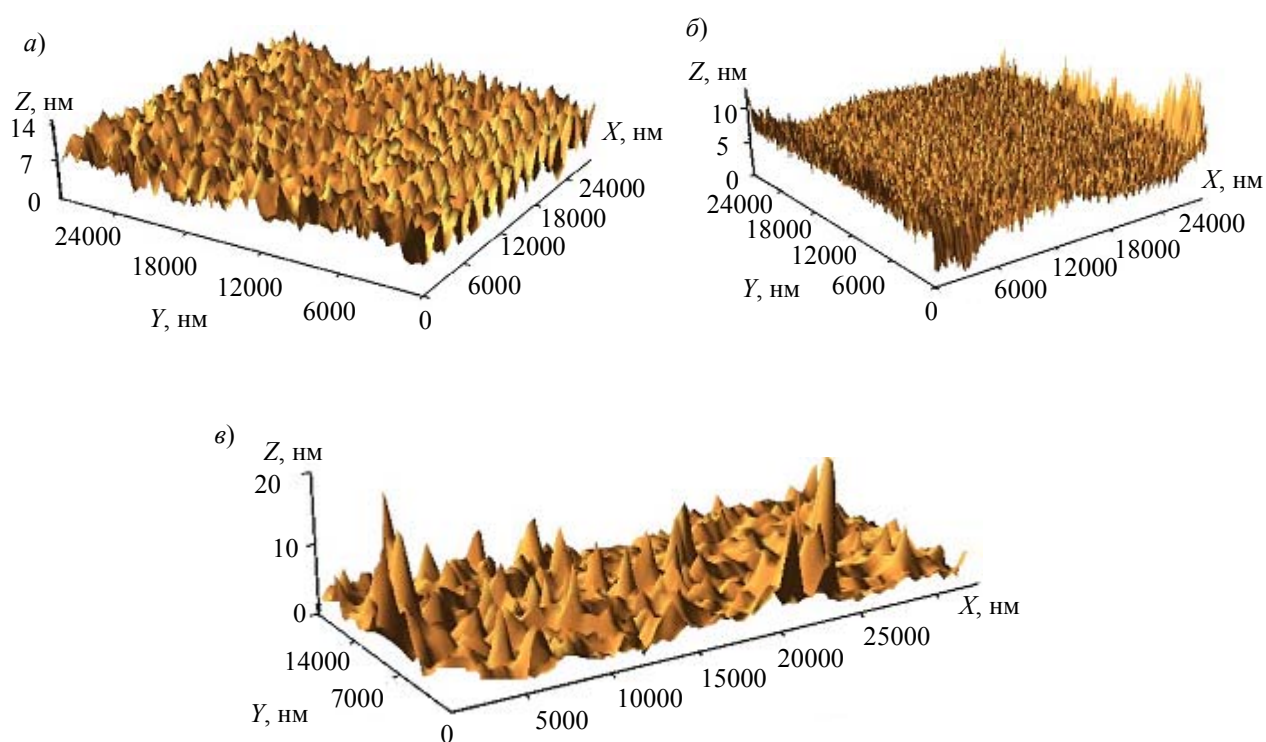


Рис. 1

Анализ полученных изображений показывает, что шероховатость исходной хромовой пленки составляет примерно 8—9 нм. После облучения образца излучением азотного лазера шероховатость поверхности пленки уменьшается до 5 нм, а в результате травления образца шероховатость поверхности увеличивается до 14—18 нм.

Полученные результаты согласуются с результатами исследований изменения топологии поверхности пленок хрома в процессе использования термохимической технологии при сканирующей обработке непрерывным лазерным излучением [5], где размер характерных неровностей на поверхности исходной хромовой пленки составлял около 8 нм, шероховатость поверхности после лазерного воздействия в термохимическом режиме примерно 2—5 нм, а после селективного травления шероховатость увеличивалась до 16 нм.

Было проведено также зондовое сканирование поверхности образца на границе тестового штриха экспонированной хромовой пленки и исходной пленки хрома (до операции травления) и на границе штриха экспонированной хромовой пленки и стеклянной подложки (по-

сле операции травления): см. рис. 2, а, б соответственно. Как показывает анализ полученных изображений, облученная область пленки выступает по отношению к исходной пленке на высоту примерно 12—15 нм, а после операции селективного травления высота штриха относительно стеклянной подложки составляет около 40—50 нм.

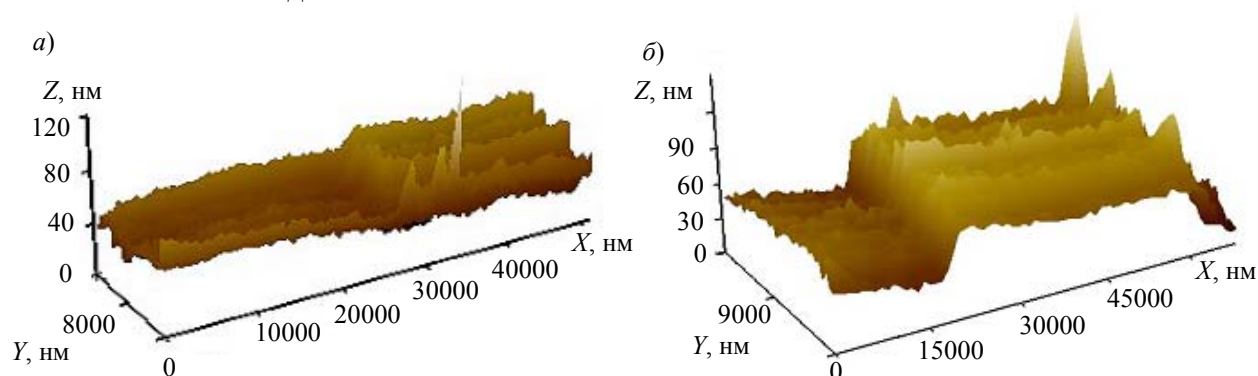


Рис. 2

### Анализ механизма лазерной записи скрытого изображения на пленках хрома.

Впервые лазерная термохимическая запись была предложена в работе [6], где предполагалось, что доминирующим процессом в формировании скрытого изображения является окисление тонких пленок хрома под действием лазерного излучения. М. Н. Либенсоном была разработана модель лазерного окисления. Предложенная в работе [7] процедура предварительного термического отжига напыленных пленок хрома позволила исключить влияние процессов рекристаллизации пленки при последующей лазерной обработке (серией импульсов наносекундной длительности), а результаты электронной спектроскопии подтвердили образование тонких окисных слоев на облученных участках пленок хрома. В работе [8] были даны рекомендации по снижению термических напряжений в системе „пленка—подложка“ при лазерном импульсном воздействии.

В то же время исследование кинетики травления экспонированных лазером тонких пленок хрома [9] (при временах экспозиции 5—10 мкс) показало, что под действием лазерного излучения физико-химические изменения происходят по всей глубине пленки. При защите пленок хрома от воздействия атмосферного кислорода посредством нанесения слоя фоторезиста не выявлены существенные различия на стадии селективного травления по сравнению с пленками, экспонированными без покрытия.

В работе [10] предложена модель записи скрытых изображений на пленках хрома на основе взрывной рекристаллизации. Суть модели состоит в следующем: хромовые пленки, как и другие металлические пленки, напыленные в вакууме, содержат много дефектов, их структура близка к аморфной. При воздействии на пленку сфокусированного лазерного излучения вблизи центра пучка может начаться плавление аморфной пленки. Известно, что кристаллизация жидкой фазы — процесс экзотермический. Переход в кристаллическое состояние будет сопровождаться дополнительным подогревом, что способствует расширению зоны расплава. При перемещении луча след лазерного воздействия будет расширяться и стабилизируется на некотором значении, когда количество выделяемой скрытой теплоты кристаллизации будет уравновешено соответствующим уменьшением плотности энергии на краях зон поперечного сечения пучка. По мнению автора [10], эта модель, в отличие от модели окисления, объясняет природу появления дефектов топологии микроструктуры, которые проявляются в виде уширения передней кромки штрихов при записи радиальных структур (лимбов, шкал и др.).

С другой стороны, первоначальное расширение следа лазерного воздействия можно объяснить и на основе модели окисления, учитывая, что обработка производится сфокусированным лучом: по мере действия лазерного излучения увеличивается окисный слой, при этом

возрастает поглощательная способность облученной зоны, что равносильно снижению порога реакции окисления на гауссовой кривой распределения интенсивности излучения, — соответственно след расширяется; след полностью стабилизируется, как только значение интенсивности приближается к пороговому для данной мощности излучения (см., например, [11]).

Вернемся к анализу экспериментальных данных по изменению морфологии поверхности пленок хрома на различных этапах обработки (см. рис. 1, 2).

Результаты анализа изображений, приведенных на рис. 1 и 2, показывают, что пленки хрома, используемые как при облучении серией наносекундных импульсов, так и при микросекундных экспозициях при сканировании непрерывным излучением имеют одну и ту же исходную шероховатость, а при лазерном воздействии шероховатость сглаживается. Это явление частично можно объяснить лазерной десорбцией примесей, когда при нагревании с поверхности удаляются легко летучие и, в первую очередь, углеводородные соединения.

Появление вертикального выступа облученной зоны относительно уровня исходной пленки свидетельствует об образовании окисного слоя. Однако измеренные значения высоты выступа (12—15 нм) существенно превышают значения толщины окисного слоя (примерно 1—2 нм), рассчитанные в соответствии с моделью лазерного окисления [12]. По-видимому, это обусловлено, во-первых, тем, что ионы хрома вступают в реакцию окисления не только с кислородом, адсорбируемым на поверхности, но и с кислородом, находящимся в объеме пленки, что проявляется на этапе травления как изменение химических свойств по всей ее глубине. Во-вторых, на высоту выступа может влиять образование не одного типа окисла, как предполагает расчет, а появление различных модификаций окислов. Согласно данным, полученным ранее в работе [7], при импульсном лазерном облучении хрома на фоне основного окисла  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  формируется нестабильный в обычных условиях окисел  $\text{CrO}_3$ . Образование окисла, как правило, приводит к увеличению объема, а коэффициент увеличения объема окисла  $\text{CrO}_3$  значительно превышает коэффициент увеличения объема  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [13], что способствует увеличению высоты выступа облученной зоны. Кроме того, оба окисла имеют различные температуры плавления: если  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  плавится при температуре 2275 °С, то  $\text{CrO}_3$  — при 193 °С. Учитывая, что чем выше содержание кислорода, тем ближе к поверхности располагается окисел, можно предположить, что в процессе облучения окисел  $\text{CrO}_3$  плавится и растекается по границам зерен других фаз, способствуя тем самым снижению шероховатости облученной пленки.

Увеличение шероховатости после операции травления объясняется как неоднородным составом пленки, так и осаждением продуктов химического взаимодействия между хромом и селективным травителем.

Высота тестового штриха относительно стеклянной подложки составила примерно 40—50 нм при исходной толщине хромовой пленки 60 нм. С одной стороны, это обусловлено выбором времени экспозиции и концентрации травителя (HCl- и Al-катализатор), а с другой — подтверждает тот факт, что физико-химические изменения происходят не только на поверхности, но и в объеме пленки. Известно, что скорость травления снижают как процессы окисления, так и процессы рекристаллизации. В то же время процессы окисления затормаживают процессы рекристаллизации. Представленные в настоящей статье эксперименты по изменению шероховатости и объема пленки в облученных зонах свидетельствуют в пользу определяющей роли процессов поверхностного и объемного окисления при образовании скрытого изображения.

**Разрешающая способность термохимического метода.** Разрешение при термохимической обработке выше, чем в режиме испарения благодаря экспоненциальной зависимости скорости роста окисла от температуры.

Для экспериментального определения разрешающей способности метода обычно в зоне обработки формируются тестовые оптические элементы малых размеров. Если разрешающая

способность составляет порядка 1000 линий/мм и более, то к оптической системе на этапе тестирования предъявляются жесткие требования по формированию субмикронных элементов.

Для оценки разрешающей способности термохимического метода предлагается применить метод фокального испарения хромовой пленки с последующим химическим травлением, а именно, использовать микроструктуры, полученные в результате селективного травления в области воздействия боковых ветвей гауссова распределения интенсивности излучения. При этом интенсивность лазерного излучения выбирается такой, что хром в центральной части зоны облучения испаряется.

На рис. 3, а представлено типичное фотоизображение микроструктур, полученных методом фокального испарения с последующим химическим травлением (микроскоп МБИ-6). На подложке остаются только участки пленки, сформированные скрытым изображением на боковых ветвях гауссова распределения интенсивности. При размере пятна 32 мкм ширина кольца составляет 3,5 мкм.

Оптическое изображение подобных микроструктур при размере пятна 10 мкм, полученное на микроскопе "Carl Zeiss Axio Imager A1m", представлено на рис. 3, б. При этом ширина кольца после травления (на боковой гауссовой ветви) составляет примерно 0,5—1 мкм, что соответствует разрешающей способности 2000—1000 мм<sup>-1</sup>. Размеры микроструктур на рис. 3, а, б на порядок меньше размера нагреваемой зоны: 3,5 мкм / 32 мкм и (0,5—1) мкм / 10 мкм.

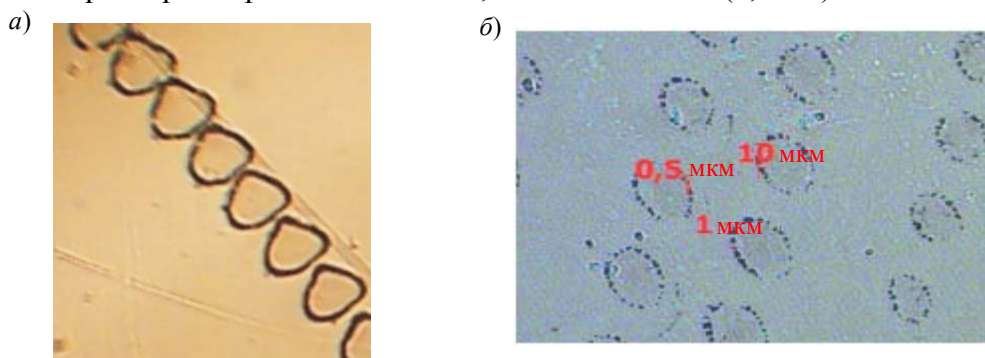


Рис. 3

Таким образом, используя для образования термохимического изображения боковые ветви гауссова распределения и разделяя их областью, где материал пленки испарен, получаем возможность формирования микронных и субмикронных элементов без дорогостоящей модификации оптической системы.

Предлагаемый метод обладает преимуществами при получении изображения оптических элементов с малой структурной плотностью.

**Заключение.** Проведенные исследования морфологии поверхности пленки показали, что механизм лазерной записи скрытого изображения на пленках хрома определяется, в первую очередь, процессом окисления, развивающимся как на поверхности, так и в объеме пленки. Ввиду того, что лазерное окисление способствует образованию окислов, неустойчивых в условиях обычного окисления, специфические свойства каждого конкретного окисла оказывают влияние на формирование скрытого изображения.

Для выявления роли процессов рекристаллизации при лазерной записи скрытого изображения на пленках хрома необходимы дополнительные исследования.

Метод фокального испарения с последующим химическим травлением позволяет формировать микронные и субмикронные оптические элементы и может быть выгоден при получении оптических элементов с малой структурной плотностью.

Авторы выражают признательность проф. Е. Б. Яковлеву за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 08-02-01210, и государственного контракта № П1134.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Метев С. М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд-во БАН, 1991. 363 с.
2. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике // Автометрия. 1998. № 6. С. 5—26.
3. 3D-лазерные информационные технологии / Отв. ред. П. Е. Твердохлеб. Новосибирск: Ин-т автоматки и электрометрии РАН, 2003. 550 с.
4. Полещук А. Г. Погрешности термохимического метода записи микроизображений в пленках хрома // Автометрия. 1998. № 6. С. 5—45.
5. Никитин В. Г. Исследование кинетики процессов круговой лазерной записи в пленках хрома при изготовлении дифракционных оптических элементов и контроль их эффективности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007.
6. Вейко В. П., Котов Г. А., Либенсон М. Н., Никитин М. И. Термохимическое действие лазерного излучения // Докл. АН СССР. 1973. Т. 208, № 3. С. 587—590.
7. Metev S. M., Savchenko S. K., Stamenov K. V. et al. Thermochemical action of radiation on thin metal films // IEEE J. of Quantum Electronics. 1981. Vol. QE-17, N 10. P. 2004—2007.
8. Вейко В. П., Котов Г. А., Смирнов В. Н. и др. Температурные напряжения в структуре „пленка—подложка“ при лазерном импульсном нагревании // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 10. С. 2196—2200.
9. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И. Селективное травление экспонированных лазером тонких пленок хрома // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11, № 3. С. 144—148.
10. Никитин В. Г. К вопросу о механизме записи изображений в пленках хрома // Автометрия. 2004. Т. 40, № 2. С. 59—68.
11. Либенсон М. Н., Лысенко А. В., Чуйко В. А., Шандыбина Г. Д. Проявление эффектов самоорганизации при воздействии на материалы сканируемого лазерного излучения // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61, № 8. С. 1491—1496.
12. Либенсон М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб: Наука, 2007. 424 с.
13. Окисление металлов / Под. ред. Ж. Бенара. М.: Металлургия, 1968. 499 с.

*Сведения об авторах*

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, зав. кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru, vadim.veiko@mail.ru
- Татьяна Васильевна Беженар** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: bezhenar\_tv@mail.ru
- Владимир Анатольевич Чуйко** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, ст. преподаватель
- Галина Дмитриевна Шандыбина** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: shandyb@lastech.ifmo.ru
- Михаил Васильевич Ярчук** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения, мл. науч. сотрудник; E-mail: chukforyou@list.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерных технологий и  
экологического приборостроения

Поступила в редакцию  
01.10.10 г.



---

---

# ИНФОРМАЦИЯ

---

---

## БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ СОКОЛОВ

### К 60-летию со дня рождения

18 января 2010 г. Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору, члену редколлегии журнала „Известия вузов. Приборостроение“ Борису Владимировичу Соколову исполнилось 60 лет.

Профессор Б. В. Соколов является известным и авторитетным ученым в области фундаментальных и прикладных исследований проблем комплексного моделирования, теории оптимального управления, разработки математических моделей и методов поддержки принятия решений в сложных организационно-технических системах в условиях неопределенности и многокритериальности; кроме того он автор нового научного направления — теории структурной динамики сложных технических систем.

Значительную часть своей жизни Борис Владимирович посвятил Вооруженным силам и космическим войскам. Его военная служба началась в Суворовском военном училище в 15-летнем возрасте. Он прошел путь до полковника, начальника одной из ведущих кафедр Военной инженерно-космической академии им. А. Ф. Можайского. Именно здесь, в Академии, Борис Владимирович сформировался как ученый и педагог; защитил кандидатскую и докторскую диссертации, стал профессором кафедры автоматизированных систем управления космическими аппаратами, сформировал научную школу по вопросам комплексного планирования операций управления структурами в АСУ космическими аппаратами, подготовил 2 докторов наук и 8 кандидатов наук.

После окончания службы в Вооруженных силах основное место работы Б. В. Соколова — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии наук (СПИИРАН), где в настоящее время он является заместителем директора по научной работе. Высочайшая работоспособность и стремление к постоянному творческому развитию позволили ему создать и возглавить лабораторию информационных технологий в системном анализе и моделировании, получить ряд новых научных результатов в области управления катастрофоустойчивыми информационными системами, управления динамическими цепями поставок, создания интегрированных систем мониторинга и управления организационно-техническими системами. Под его руководством и при непосредственном участии был выполнен ряд проектов РАН, Российского фонда фундаментальных исследований, Секции прикладных проблем при Президиуме РАН и Международных организаций (EOARD, фонда CRDF). Эти проекты направлены на совершенствование и автоматизацию процессов управления сложными объектами в критических приложениях (космонавтике, атомной промышленности, защите информации).



Труды Б. В. Соколова приобрели международное признание, его монографии и статьи публикуются в авторитетных издательствах в нашей стране и за рубежом. Профессор Б. В. Соколов является лауреатом премии Правительства Санкт-Петербурга.

Одновременно Борис Владимирович продолжает вести активную педагогическую деятельность, являясь профессором Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. И здесь, как педагог, Борис Владимирович отличается той же энергией, обязательностью и доступностью в общении со студентами, магистрантами, аспирантами.

Мы высоко ценим редкое сочетание принципиальности, профессионализма и доброго отношения к коллегам, надеемся на дальнейшее общение и плодотворное сотрудничество.

Горячо поздравляем Бориса Владимировича с юбилеем и желаем доброго здоровья, долгих лет активной творческой жизни, счастья и успехов во всех начинаниях!

*Сотрудники журнала, члены редколлегии, коллеги, ученики*



## **О ПРИСУЖДЕНИИ ПРЕМИИ ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

В декабре 2010 г. ряду сотрудников Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики были присуждены премии Правительства Российской Федерации 2010 г. в области образования с присвоением звания „Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования“.

За научно-практическую и методическую разработку „Создание инновационной научно-образовательной системы подготовки кадров высшей квалификации в области лазерной технологии обработки материалов“ награждены:

— Вейко Вадим Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения;

— Яковлев Евгений Борисович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения.

За разработку концепции развития образовательных центров науки и технологий для школьников и создание в Санкт-Петербурге интерактивной композиции „Музей оптики“ награждены:

— Стафеев Сергей Константинович, доктор технических наук, профессор, декан естественно-научного факультета;

— Анисимова Наталья Геннадьевна, руководитель центра карьерного роста;

— Иванова Ираида Николаевна, научный сотрудник;

— Музыченко Яна Борисовна, ассистент кафедры физики;

— Петров Николай Владимирович, аспирант;

— Томилин Максим Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры физики;

— Юдовина Татьяна Сергеевна, заведующая сектором,

— Слободянюк Сергей Васильевич, студент, ст. лаборант информационно-технологического центра.

## SUMMARY

P. 5—12.

### ARCHITECTURE OF KNOWLEDGE MANAGEMENT SYSTEM BASED ON WIKI-TECHNOLOGY AND INTEGRATED ONTOLOGICAL MODELS

Key concepts of corporate knowledge management system based on ontological modeling and Wiki-technology are discussed, and the system architecture is described. A prototype of “OntolingeWiki” system is presented as an example of practical implementation of the approach.

**Keywords:** knowledge management, ontology, knowledge engineering, Wiki-technology.

#### *Data on authors*

- Dmitry I. Muromtsev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design;  
E-mail: mouromtsev@mail.ifmo.ru
- Vladimir A. Gorovoy* — St. Petersburg State University, Graduate School of Management, Department of Information Technologies in Management, Assistant Lecturer;  
E-mail: a.malinin@gmail.com
- Alexey N. Zlobin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design;  
E-mail: alexey.zlobin@gmail.com
- Yury V. Katkov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design;  
E-mail: ganqturgon@gmail.com
- Irina N. Pochinok* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design;  
E-mail: i.pochinok@gmail.com

P. 12—16.

### A 3D-METHOD OF COMPUTER TOMOGRAPHY DATA COMPRESSION

An algorithm is proposed for compression of tomography data for tomography data banks and telemedicine application. A diagram of compressor/decompressor construction is presented. Results of experimental assessment of the algorithm efficiency are demonstrated.

**Keywords:** data compression, codec, computed tomography, 3D-data.

#### *Data on author*

- Sergey V. Kuleshov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Research Automation; Senior Scientist; E-mail: kuleshov@iias.spb.su

P. 16—22.

### PHASE FUNCTION EFFECTS ON AIRBORNE HYDROGRAPHIC LIDAR PERFORMANCE

Characteristics of spatial resolution of airborne hydrographic lidar system and decay of lidar return with depth are studied analytically for arbitrary volume scattering function (VSF) of the seawater in the frames of the small-angle scattering approximation for radiation transfer equation. Numerical analysis is performed for three types of the water with the use of measured Petzold VSF. Results are compared with calculations based on Dolin model phase function and diffusion small-angle approximation. Applicability of the models in various environmental conditions is discussed.

**Keywords:** airborne oceanographic lidar, spatial resolution, system attenuation coefficient, phase scattering function, small-angle scattering coefficient.

#### *Data on authors*

- Mikhail E. Kononenko* — Student.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonics and Optical Information Technology; E-mail: mihaikon@yandex.ru
- Yury I. Kopilevich* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: yurikopilevich@gmail.com
- Ekaterina I. Zadorozhnaya* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics, Department of Photonics and Optical Information Technology; E-mail: cattie@yandex.ru

P. 23—31.

### GAUSSIAN MARKOV SEQUENCES

The accuracy matrix for Gaussian Markov sequence of  $k$ -th order is shown to be  $(2k+1)$ -diagonal. Non-Markov processes are approximated by Markov sequences with retained principle diagonals of accuracy matrix.

**Keywords:** Gaussian Markov sequence,  $(2k+1)$ -diagonal matrix, accuracy matrix,  $k$ -th order sequence.

#### *Data on authors*

- Stanislav N. Vorobiev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Network Technologies
- Natalia V. Girina* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Network Technologies; E-mail: natalia.girina@gmail.com
- Leonid A. Osipov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Network Technologies

P. 32—37.

### THERMAL DRIFT OF FIBER OPTIC GYROSCOPE

A mathematical model has been developed to simulate apparent angular velocity induced by unstable thermal state of the gyroscope sensor. The model is based on numerical solution of related differential boundary value problem of thermal photoelasticity. Results of numerical simulation for non-stationary thermal drift are presented and compared with full-scale experiment data.

**Keywords:** fiber optic giro, thermal instability, phase shift, thermoelasticity, piezooptics.

#### *Data on authors*

- Eugeny I. Vahrameev* — Cand. Techn. Sci.; Perm State Technical University, Department of Heat Engineering; E-mail: abins@pstu.ru
- Konstantin S. Galyagin* — Cand. Techn. Sci.; Perm State Technical University, Department of Heat Engineering, Head of the Chair; E-mail: abins@pstu.ru

- Alexander S. Ivonin* — Public Corporation “Perm Scientific Production Instrumentation Co. ”; Engineer-Researcher; E-mail: alex\_sambist@mail.ru
- Mikhail A. Oshivalov* — Cand. Techn. Sci.; Perm State Technical University, Department of Heat Engineering; E-mail: abins@pstu.ru
- Tatiana A. Ulrikh* — Cand. Techn. Sci.; Perm State Technical University, Department of Heat Engineering; E-mail: uta@pstu.ru

**P. 38—45.**

### **DIRECT AND INVERSE PROBLEMS IN SIGNAL AND IMAGE PATTERNIZATION**

A novel method of signal and image processing based on changing from 1D to 2D and 3D representation is proposed. The inverse problem of changing of 3D to 1D representation is also considered. The results may be used in object-oriented programming of tactile robot vision.

**Keywords:** signal and image processing, patterns.

#### *Data on authors*

- Pavel P. Kovalenko* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; Assistant Lecturer; E-mail: kovalenko\_p.p@mail.ru
- Viktor M. Musalimov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: musVM@yandex.ru

**P. 45—49.**

### **FATIGUE FRACTURE OF MINIATURE PIEZOELECTRIC GRABS**

The fracture of piezoelectric grab is considered on the base of solution for the problem of linear slit in the plane boundary of half-space filled with piezoelectric material. A combined criterion of grab fracture is proposed. Application of aggregate D-module is shown to be appropriate for the limit curves construction.

**Keywords:** piezoelectric grab, energy criterion, piezomodule.

#### *Data on authors*

- Anna V. Amvrosieva* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography; E-mail: destyni@mail.ru
- Viktor M. Musalimov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: musVM@yandex.ru

**P. 50—55.**

### **METHODS OF ANALYSIS AND SYNTHESIS OF POWER SUBSYSTEMS OF INSTRUMENT ELECTRIC DRIVES**

Methods of structural parametrical analysis and synthesis of power subsystems of instrument electric drives are considered. The proposed models allow for search of alternative design of power subsystem through working the optimization problem.

**Keywords:** direct current branch, instrument electric drive, pulse-width converter, power subsystem, recuperation inverter.

#### *Data on authors*

- Pavel A. Borisov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrical Engineering and Precision Electro-Mechanical Systems; E-mail: borisov@ets.ifmo.ru
- Dmitry V. Lukichev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrical Engineering and Precision Electro-Mechanical Systems; E-mail: ludimit@yandex.ru

P. 55—58.

### APPLICATION OF INVARIANT COLOR BRIGHTNESS PRINCIPLE FOR VIDEO INFORMATION TRANSMISSION

The principle of invariant color brightness for digital television systems is considered. Effectiveness of TV systems which employ the principle is demonstrated and compared with that of systems based on invariant brightness principle.

**Keywords:** digital TV, color transformations, invariant brightness, invariant color brightness principle.

#### *Data on authors*

- Timofey M. Sukhov* — Post-Graduate Student; Ustinov Baltic State Technical University, Department of Radio-electronic Control Systems, St. Petersburg; E-mail: tsuhov@mail.ru
- Eugeny A. Belyaev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Information Technologies for System Analysis and Modeling; E-mail: e\_beliaev@mail.ru

P. 59—65.

### DETERMINATION OF DRAUGHT POWER OF LOW-FREQUENCY ELECTRODYNAMIC VIBRATOR

An analytical relation is derived to estimate draught power of low-frequency electrodynamic vibrator used for verification and calibration of acceleration sensors. Results of experimental study are presented.

**Keywords:** vibroexciter, acceleration sensor, acceleration gage, magnetic suspension system, reciprocal inductance.

#### *Data on authors*

- Yury N. Zhuravlyov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Pskov State Polytechnical Institute, Department of Building Mechanics
- Dmitry S. Fyodorov* — Pskov State Polytechnical Institute, Department of Electric Drive and Automation Systems; Assistant Lecturer; E-mail: kreator353@pochta.ru

P. 66—73.

### APPLICATION OF COMPUTER ISOPHOTOMETRY FOR CHECKING OF OBJECTIVE FOR NANOLITHOGRAPHY

Quality control of optical surface finishing for modern Schwarzschild reflecting objectives operating in the EUV spectral range is shown to call for direct photometry of image structure. The method of isophotometry of point test object image allows to overcome restrictions caused by insufficient sensitivity of diffraction interferometry.

**Keywords:** nanolithography, reflecting objective, interferometry, computer isophotometry.

#### *Data on authors*

- Vladimir K. Kirillovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: vkkir@yandex.ru
- Egor V. Gavrilov* — Institute of Laser Physics, S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg; E-mail: egor.gavrilov@itcitmo.ru
- Alexander P. Zhevlakov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute of Laser Physics, S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg

P. 74—78.

### ALGORITHMIC CORRECTION OF PORTABLE SPECTROPHOTOMETER ERRORS

A method of algorithmic error correction is developed for portable instruments. The method description is given for the spectrophotometer incorporated in Kedr instrument used for identification of wood species. The proposed method is shown to increase identification reliability to 90%.

**Keywords:** spectrum, spectrophotometer, standard, algorithmic correction, temperature correction, measurement error.

#### *Data on authors*

- Andrey A. Voronin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: v-electronics@mail.ru
- Elena V. Smirnova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: smirnova-elen@yandex.ru
- Ildar N. Faizov** — Student; St. Petersburg State University, Department of Higher Algebra and Number Theory; E-mail: ildar\_faizov@mail.ru

P. 78—83.

### UPGRADING THE ELECTROSTATIC PHOTOELECTRONIC SPECTROMETERS ES-2401 AND ES-3201

New technological modules of ES-2401 and ES-3201 spectrometers are developed for widening the scope of the instruments application in experiments in science of materials and nanotechnologies. Description of the modules is presented.

**Key words:** spectrometer, upgrading, sluice chamber, removal of surface layer.

#### *Data on authors*

- Vladimir I. Kozhevnikov** — Physical-Technical Institute, Ural Branch of RAS, Izhevsk; Department of Physics and Chemistry of Nanomaterials; Leading Development Engineer; E-mail: olam@nm.ru
- Pieter G. Merzlyakov** — “Chistyeh Tehnologiy” Public Corporation, Izhevsk; Leading Designer
- Gennady R. Valeev** — “Chistyeh Tehnologiy” Public Corporation, Izhevsk; Designer

P. 84—88.

### VAPORIZATION KINETICS OF DROPS IN COOLING SYSTEM OF INSTRUMENT COMPONENT UNDER HIGH DENSITY OF HEAT FLOW

Conditions of heat exchange between water drops and airflow are analyzed. Relations are obtained which allow for estimation of evaporation duration and drop cooling in the flow. The cooling time is shown to be two orders of magnitude shorter than the full evaporation time, the fact allowing the use of obtained relations for optimization of operation mode of air-evaporation cooling device.

**Keywords:** instrument cooling, drop evaporation kinetics, heat exchange under evaporation.

#### *Data on authors*

- Anatoly L. Emeljanov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Refrigeration & Food Engineering, Department of Air Conditioning; E-mail: info@petroclime.ru
- Eugeny S. Platonov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Refrigeration & Food Engineering, Department of Physics

P. 89—94.

### LASER THERMOCHEMICAL TECHNOLOGY OF CHROME FILMS MICROSTRUCTURING

Results of experimental study of chromium film morphology at various stages of laser recording are presented. The main mechanisms of “hidden” image recording are analyzed. An approach to assessment of resolution of thermochemical recording is proposed.

**Keywords:** laser recording, laser oxidation, thermochemical reactions.

#### *Data on authors*

- Vadim P. Veiko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology, Head of the Chair; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru, vadim.veiko@mail.ru
- Tatiana V. Begenar** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: bezhenar\_tv@mail.ru
- Vladimir A. Chuiko** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Senior Lecturer
- Galina D. Shandybina** — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: shandyb@lastech.ifmo.ru
- Mikhail V. Yarchuk** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Applied Ecology; Junior Scientist; E-mail: chukforyou@list.ru