

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Котенко И. В., Степашкин М. В., Котенко Д. И., Дойникова Е. В. Оценивание защищенности информационных систем на основе построения деревьев социоинженерных атак..... 5
- Араканцев К. Г., Жуков Д. В., Коняхин И. А. Методы обработки измерительной информации и оценки погрешностей в стереоскопической системе контроля пространственного положения объектов..... 10
- Гуров И. П., Окунев В. В., Потапов А. С. Исследование эффективности фрактальных методов компрессии биомедицинских изображений с помощью принципа минимальной длины описания..... 17

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Ремизова О. А., Рудакова И. В., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Робастное управление линейным объектом с запаздыванием с применением квадратичных методов синтеза системы..... 22
- Кабанов С. А., Никулин Е. Н., Якушев Б. Э., Якушева Д. Б. Управление перемещением груза мостовым краном по методу обратных задач динамики..... 30

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Семенов К. К. Автоматическое дифференцирование функций, выраженных программным кодом..... 34
- Коротков К. Г., Орлов Д. В., Величко Е. Н. Применение метода газоразрядной визуализации для анализа различных жидкостей..... 40

### ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

- Вайсензее К., Польте Г. А., Линс Г. Автоматизированное определение погрешности геометрических измерений..... 47

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нейро-нечеткий регулятор напряжения объекта управления..... 51
- Ефанов В. Н., Еникеев Т. У. Управление взаимодействием ветроэнергетических установок в составе локальной энергетической системы..... 57

## **ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

- Ворзобова Н. Д., Бурункова Ю. Э., Булгакова В. Г., Денисюк И. Ю., Калинина Н. М.** Получение полимерных периодических структур в УФ-отверждаемых композиционных материалах методом лазерной интерференционной литографии ..... 62
- Балошин Ю. А., Сорокин А. А., Волченко А. Н.** Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов ..... 68

## **ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

- Пилипенко Н. В., Гладских Д. А.** Нестационарная теплотметрия зданий и сооружений ..... 74

## **КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

- Коробейников А. Г., Гатчин Ю. А., Ткалич В. Л., Дукельский К. В.** Исследования фторидных нанокерамик..... 78
- Волынкин В. М., Ермолаев В. С., Ковалев Д. С., Папченко Б. П.** Нанесение защитного просветляющего покрытия на полупроводниковую гетероструктуру УФ-диапазона..... 79
- Мараев А. А., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н.** Исследование метода спектральной селективности в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф ..... 80

## **ИНФОРМАЦИЯ** ..... 82

SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)..... 83

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2011 г. .... 90

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Kotenko I. V., Stepashkin M. V., Kotenko D. I., Doynikova E. V.** Assessment of Information System Protectability on the Base of Development of Tree of Social Engineering Attack ..... 5
- Arakantsev K. G., Zhukov D. V., Konyakhin I. A.** Methods of Measuring Information Processing and Estimation of Measuring Accuracy in Stereoscopic System for Control over Object Spatial Displacements ..... 10
- Gurov I. P., Okunev V. V., Potapov A. S.** Analysis of Efficiency of Fractal Methods of Compression of Biomedical Images on the Base of the Minimal Description Length Principle ..... 17

### DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Remizova O. A., Rudakova I. V., Syrokvashin V. V., Fokin A. L.** Robust Control over a Linear Object of Pure Delay with the Use of Quadratic Methods of System Synthesis ... 22
- Kabanov S. A., Nikulin E. N., Yakushev B. E., Yakusheva D. B.** Control over Load Movement by Bridge Crane Using the Method of Inverse Problem of Dynamics ..... 30

### COMPUTING TECHNIQUE

- Semenov K. K.** Automatic Differentiation of Function Determined by Its Program Code ..... 34
- Korotkov K. G., Orlov D. V., Velichko E. N.** Application of Stimulated Electro-Photon Emission to Analysis of Liquids ..... 40

### FINE MECHANICS DEVICES

- Weissensee K., Polte G. A., Linss G.** Approach to the Automated Uncertainty Estimation of Dimensional Measurements ..... 47

### ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Khizhnyakov Yu. N., Yuzhakov A. A.** Neuro-Fuzzy Voltage Controller for the Object of Management ..... 51
- Efanov V. N., Yenykeyev T. U.** Coordination of Interaction of Wind Generators in a Local Energy System ..... 57

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Vorzobova N. D., Burunkova Yu. E., Bulgakova V. G., Denisyuk I. Yu., Kalinina N. M.** Investigation of Polymeric Periodical Structures Formation Process at UV-Curing Composition Materials by Laser Interference Lithography Method ..... 62
- Baloshin Yu. A., Sorokin A. A., Volchenko A. N.** Electrodynamic Model of the Near-field High Frequency Method of Physical Objects Probing ..... 68

## HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

<b>Pilipenko N. V., Gladskikh D. A.</b> Nonstationary Thermal Measurements of Building Envelope .....	74
<b>BRIEF NOTES</b>	
<b>Korobeynikov A. G., Gatchin Yu. A., Tkalich V. L., Dukel'sky K. V.</b> Studies of Fluoride Nanoceramics .....	78
<b>Volynkin V. M., Ermolaev V. S., Kovalev D. S., Papchenko B. P.</b> Application of Protective Antireflection Coating on Semiconductor Heterostructure in the UVA-Range .....	79
<b>Maraev A. A., Pantyushin A. V., Timofeev A. N., Yaryshev S. N.</b> Study of Possibilities of the Multispectral Selection Method in Optical-Electronic System for Anthropogenic Catastrophes Prevention.....	80
<b>INFORMATION</b> .....	82
SUMMARY .....	83
THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2011 .....	90

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

И. В. КОТЕНКО, М. В. СТЕПАШКИН, Д. И. КОТЕНКО, Е. В. ДОЙНИКОВА

## ОЦЕНИВАНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ СОЦИОИНЖЕНЕРНЫХ АТАК

Представлен подход к оценке защищенности информационных систем на основе построения деревьев атак, являющийся развитием подхода, предложенного авторами ранее (введены понятия, модели и конструкции, связанные с возможностью учета социоинженерных атак).

*Ключевые слова:* защита информации, анализ защищенности, информационная система, социоинженерные атаки, показатель защищенности.

**Введение.** Одной из актуальных задач защиты информации является анализ защищенности информационных систем (ИС). В большинстве предлагаемых для решения этой задачи методик рассматриваются только программно-технические (ПТ) атаки, использующие известные уязвимости в программном и аппаратном обеспечении, однако не учитывается, что успешная реализация социоинженерных (СИ) атак обеспечивает злоумышленнику плацдарм для проведения программно-технических атак и приносит зачастую значительно больший ущерб.

Представленный в настоящей работе подход к анализу защищенности ИС, предназначенный для использования в перспективных системах анализа защищенности (САЗ), является развитием предложенного авторами ранее [1, 2] подхода к анализу защищенности, в нем введены понятия, модели и конструкции, позволяющие учитывать СИ-атаки.

**Релевантные работы.** Анализу защищенности систем посвящено большое количество работ, одной из его важнейших задач является классификация нарушителей и построение модели нарушителя [3].

Использованию графов и деревьев атак при анализе защищенности также посвящено множество работ: в [4] для анализа уязвимостей используется проверка на модели; в [5] предлагается подход к созданию графов атак; в [6] разрабатываются методика и инструментарий для анализа уязвимостей; в [7] описан подход к оценке уровня риска критических сетевых ресурсов на основе поведенческих графов атак и байесовского метода; в [8] предлагаются общая схема и алгоритмы ранжирования графов атак.

В работе [9] определены две основные категории методов реализации социоинженерных атак, нацеленных на „машину“ или „человека“ (computer-based и human-based); в [10] предложена классификация атак, основанных на методах социотехники.

Предлагаемый в настоящей работе подход к оценке защищенности базируется на концепциях, моделях и методиках, представленных в указанных выше работах. Основным его отличием является возможность получения результатов анализа защищенности (множества показателей защищенности) путем построения и анализа дерева атак, в котором наряду с

программно-техническими атаками, направленными на технические средства ИС, представлены социоинженерные атаки, объектами которых являются санкционированные пользователи.

**Функциональная архитектура перспективной САЗ** представлена на рис. 1. Приведем основные функциональные узлы данной архитектуры.

1) *Администратор ИС* — должностное лицо, ответственное за формирование модели (спецификации) ИС, обновление баз данных ПТ-атак, планирование внедрения новых средств защиты информации (СЗИ).

2) *Администратор безопасности ИС* — должностное лицо, ответственное за разработку модели нарушителя, политики безопасности информации, расширение модели ИС в части вопросов защиты информации от несанкционированного доступа, а также формирование требований к показателям защищенности (ПЗ) ИС.

3) *Проектировщик ИС* — должностное лицо, выполняющее функции технического администратора и администратора безопасности проектируемой ИС.

4) *Система анализа защищенности* позволяет строить и анализировать дерево атак на основе имитации атакующих действий нарушителя, направленных как на технические средства ИС, так и на ее санкционированных пользователей.

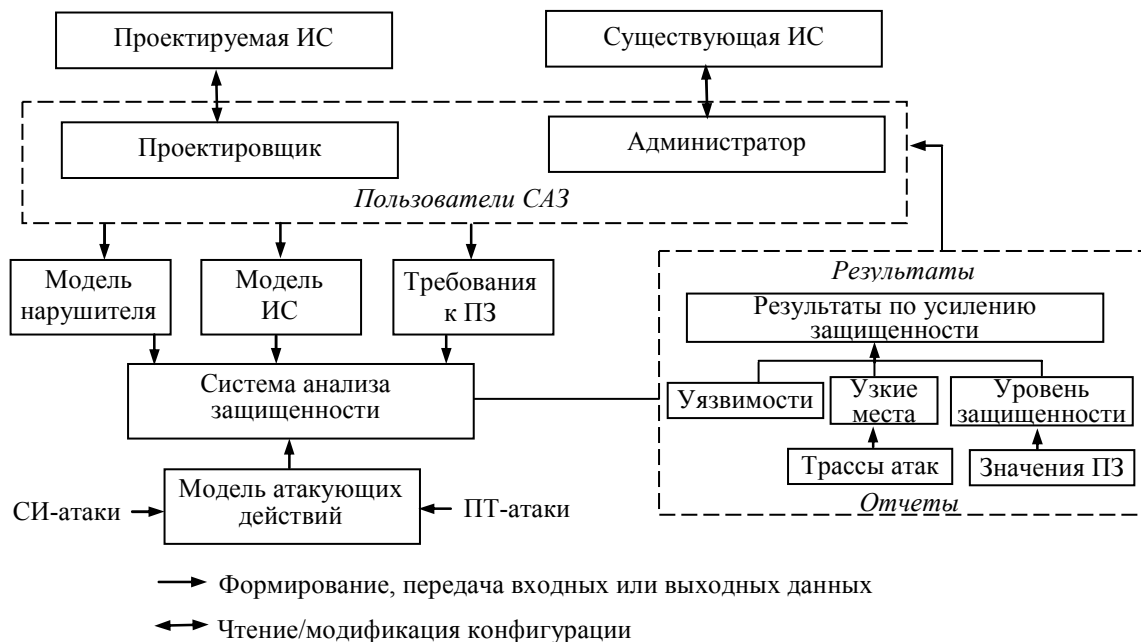


Рис. 1

Процесс анализа защищенности состоит из следующих этапов:

1) подготовительный (выполняется администраторами или проектировщиком ИС) — включает определение и документирование ресурсов ИС, их атрибутов (например, уровень критичности), используемых СЗИ, предъявляемых требований к уровню защищенности ИС, реализуемой политики безопасности, включающей описание модели нарушителя и т.д.;

2) инициализация (выполняется САЗ на основе полученных от пользователей данных) — включает формирование внутренних представлений моделей ИС и нарушителя, обновление внутренней базы данных уязвимостей;

3) построение дерева атак и его анализ (реализуется САЗ по команде пользователя);

4) анализ полученных результатов и выполнение пользователями САЗ рекомендаций по усилению защищенности.

**Модели анализа защищенности ИС.** Для формирования модели ИС предлагается расширить существующие модели компьютерных сетей [12, 13] путем добавления следующих классов объектов:

1) *контролируемая зона* — пространство, в котором регламентировано пребывание сотрудников и посетителей организации, а также различных технических средств;

2) *санкционированный пользователь* — должностное лицо, имеющее доступ в определенные контролируемые зоны, к заданным вычислительным платформам и информационным объектам, идентифицируемое при выполнении доступа по уникальному идентификатору. При успешной атаке нарушитель может получить доступную санкционированному пользователю информацию об ИС;

3) *группа санкционированных пользователей* — класс, используемый с целью упрощения таблиц дискреционного управления доступом;

4) *информационный объект* — абстракция, позволяющая представить некоторую совокупность обрабатываемой в ИС информации, доступ к которой контролируется правилами дискреционной политики управления доступом (файл в файловой системе вычислительной платформы и т.п.).

В качестве базы для расширения моделей атакующих действий и нарушителя была взята модель, представленная в работе [2].

**Модель атакующих действий** предлагается расширить за счет добавления следующих классов атак: а) социоинженерные атаки и б) атаки, учитывающие физический доступ нарушителя к техническим средствам.

Множество потенциальных СИ-атак формируется экспертами, множество ПТ-атак строится на основе баз данных. Для описания атак используются предусловия и постусловия. Предусловия определяются с использованием основных понятий и положений теорий человеческих потребностей. На основе пирамиды (иерархии) потребностей А. Маслоу [11] может быть определен способ воздействия на санкционированного пользователя. В качестве постусловий выступают: получение нарушителем сведений, доступных санкционированному пользователю; согласие пользователя выполнять указания нарушителя.

Основное отличие ПТ- от СИ-атак заключается в том, что при успешной реализации ПТ-атаки нарушитель получает сведения только об атакуемой вычислительной платформе, а при успешной реализации СИ-атаки нарушитель может получить все сведения об ИС, известные пользователю.

Модель нарушителя состоит из следующих компонентов: первичные знания нарушителя об ИС (используемые ОС и приложения, топология и т.д.); технические знания и умения нарушителя, определяющие его возможности по реализации ПТ-атак (в первую очередь, по компилированию и использованию программного кода, реализующего атаки); первоначальное положение относительно системы (внутренние и внешние нарушители).

Расширение модели нарушителя обеспечивает возможности задания:

— объектов новых классов (контролируемые зоны, информационные объекты и т.д.) в качестве первичных знаний нарушителя;

— множества „замаскированных“ под санкционированных пользователей ИС нарушителей;

— ресурсов (в том числе финансовых), которые обеспечивают нарушителю возможность реализации СИ-атак, направленных на санкционированных пользователей ИС.

**Модель определения уровня защищенности ИС** базируется на использовании оценки критичности атакующего действия. Критичность ПТ-атак рассчитывается на основе интегрального базового индекса CVSS [14] атакующего действия и методики анализа рисков FRAP [15]. Критичность СИ-атаки определяется экспертным путем.

Получение качественной экспресс-оценки защищенности ИС (расчет общего уровня защищенности) осуществляется следующим образом:

1) вычисление показателей защищенности (критичность системы, сложность доступа и др.) различных объектов дерева атак (отдельных атакующих действий, трасс атак и угроз);

- 2) получение качественных оценок уровня риска для всех угроз;
- 3) расчет общего уровня защищенности анализируемой ИС на основе полученных оценок уровней риска всех угроз.

Отличие данной модели определения уровня защищенности ИС от модели, предложенной авторами ранее, заключается в том, что при выполнении расчетов в качестве атакуемого объекта может выступать как вычислительная платформа, так и санкционированный пользователь ИС.

**Системная архитектура перспективной САЗ.** С учетом предложенных моделей анализа защищенности и функциональной архитектуры перспективной САЗ была разработана ее системная архитектура, включающая:

- 1) программное средство „Конструктор спецификаций анализируемых ИС“, позволяющее пользователям САЗ формировать спецификации ИС с применением графического интерфейса;
- 2) программное средство „Система анализа защищенности ИС“, состоящее из клиентской (выполняет анализ защищенности ИС, заданной в виде подготовленной заранее спецификации, рис. 2) и серверной (обеспечивает обработку сведений об уязвимостях программного и аппаратного обеспечения) частей;
- 3) программный компонент „Обновление базы данных уязвимостей“, обеспечивающий загрузку (актуализацию) сведений о ПТ-атаках из открытой базы данных уязвимостей National Vulnerability Database (NVD) [16].

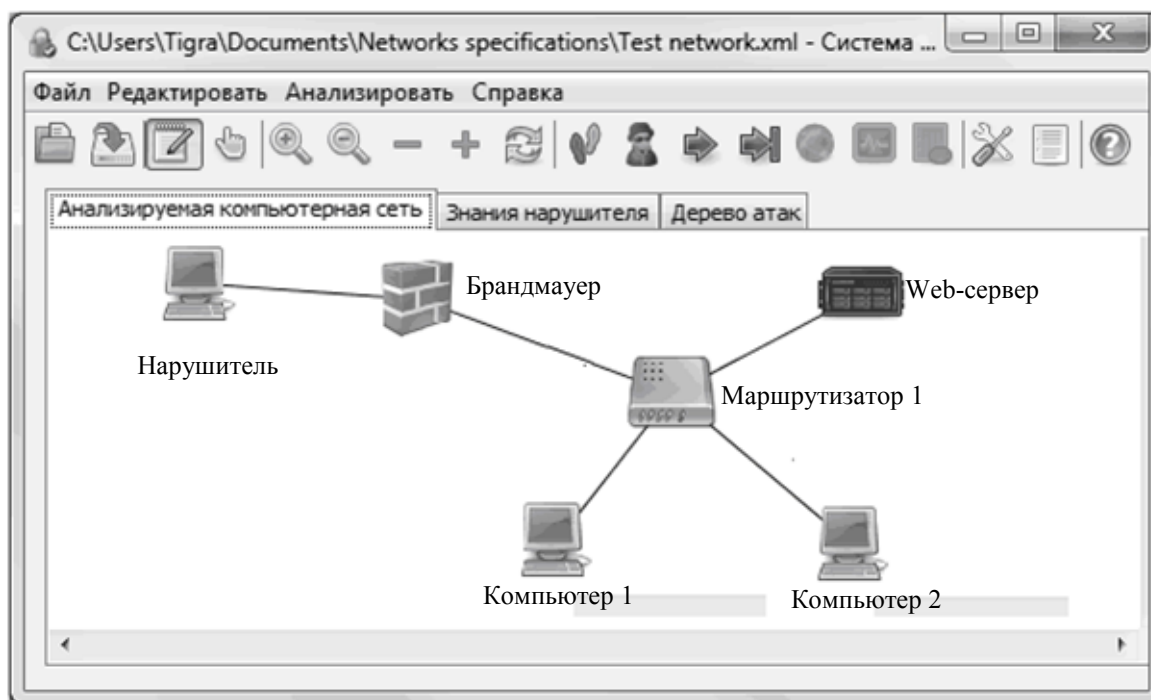


Рис. 2

**Заключение.** В работе представлен подход к анализу защищенности ИС с учетом СИ-атак, являющийся развитием предложенного авторами ранее подхода к анализу уязвимостей и оценке защищенности компьютерных сетей. Описаны расширения моделей информационной системы, атакующих действий, нарушителя и определения уровня защищенности (расчета множества показателей защищенности).

На основе предложенного подхода разработан прототип перспективной САЗ ИС, предназначенной для выполнения анализа защищенности на различных этапах жизненного цикла исследуемых информационных систем.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котенко И. В., Степашкин М. В., Богданов В. С. Анализ защищенности компьютерных сетей на различных этапах их жизненного цикла // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 5. С. 3—8.
2. Котенко И. В., Степашкин М. В. Оценка защищенности компьютерных сетей на основе анализа графов атак // Проблемы управления рисками и безопасностью. Тр. Института системного анализа РАН. М., 2007. Т. 31. С. 126—207.
3. *Phyo A. H., Furnell S. M.* A Detection-oriented classification of insider IT misuse // Proc. of the Third Security Conf. Las Vegas, NV, 2004.
4. *Ritchey R. W., Ammann P.* Using model checking to analyze network vulnerabilities // Proc. of the 2000 IEEE Symp. on Security and Privacy. Washington, DC, 2000. P. 156—165.
5. *Swiler L. P., Phillips C., Ellis D., Chakerian S.* Computer-attack graph generation tool // DISCEX '01. Proc. Anaheim, CA, 2001. Vol. 2. P. 307—321.
6. *Rieke R.* Tool based formal modelling, analysis and visualisation of enterprise network vulnerabilities utilising attack graph exploration // EICAR 2004. Conf. CD-rom: Best Paper Proc. 2004. P. 31—46.
7. *Dantu R., Loper K., Kolan P.* Risk management using behavior based attack graphs // Proc. of the Intern. Conf. on Information Technology: Coding and Computing. Washington, DC, 2004. Vol. 2. P. 444—449.
8. *Mehta V., Bartzis C. et al.* Ranking attack graphs // Lecture Notes in Computer Sci. Berlin: Springer-Verlag, 2006. Vol. 4219. P. 127—144.
9. A Proactive Defence to social engineering. SANS Institute InfoSec Reading Room [Электронный ресурс]: <[http://www.sans.org/reading\\_room/whitepapers/engineering/proactive-defence-social-engineering\\_511](http://www.sans.org/reading_room/whitepapers/engineering/proactive-defence-social-engineering_511)>.
10. How to protect insiders from social engineering threats. Midsize business security guidance [Электронный ресурс]: <<http://download.microsoft.com/download/4/7/>>.
11. *Maslow A. H.* A Theory of human motivation // Psychological Rev. 1943. Vol. 50. P. 370—396.
12. *Morin B., Me L., Debar H., Ducasse M.* M2d2: A formal data model for ids alert correlation // LNCS. Berlin: Springer-Verlag, 2002. Vol. 1516. P. 115—137.
13. *Vigna G.* A topological characterization of tcp/ip security: Techn. Report TR-96.156. Politecnico di Milano, 1996.
14. CVSS. Common Vulnerability Scoring System [Электронный ресурс]: <<http://www.first.org/cvss>>.
15. FRAP. Facilitated Risk Analysis Process [Электронный ресурс]: <<http://www.peltierassociates.com>>.
16. NVD. National Vulnerability Database [Электронный ресурс]: <<http://nvd.nist.gov>>.

**Сведения об авторах**

- Игорь Витальевич Котенко** — д-р техн. наук, профессор; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности, Санкт-Петербург; заведующий лабораторией; E-mail: [ivkote@comsec.spb.ru](mailto:ivkote@comsec.spb.ru)
- Михаил Викторович Степашкин** — канд. техн. наук; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности, Санкт-Петербург; научный сотрудник; E-mail: [stepashkin@comsec.spb.ru](mailto:stepashkin@comsec.spb.ru)
- Дмитрий Игоревич Котенко** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: [dmitrykotenko1986@gmail.com](mailto:dmitrykotenko1986@gmail.com)
- Елена Владимировна Дойникова** — аспирант; СПИИРАН, лаборатория проблем компьютерной безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: [doynikova@comsec.spb.ru](mailto:doynikova@comsec.spb.ru)

Рекомендована лабораторией  
проблем компьютерной  
безопасности

Поступила в редакцию  
12.05.11 г.

К. Г. АРАКАНЦЕВ, Д. В. ЖУКОВ, И. А. КОНЯХИН

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ И ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ В СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены методы обработки измерительной информации в стереоскопической системе контроля пространственного положения объектов. Обоснована возможность применения теории возмущений для оценки систематических и случайных погрешностей измерений.

**Ключевые слова:** перспективное преобразование, стереоскопическая система, сингулярное разложение, теория возмущений, погрешность измерения.

**Введение.** Для дистанционного контроля пространственного положения объектов широко используются стереоскопические системы технического зрения. В частности, оптико-электронная система стереоскопического типа может быть использована для контроля смещений железнодорожного полотна относительно проектного положения [1]. В этом случае задача измерительной системы сводится к определению расстояния до рельсов в профиле и плане относительно реперных меток, расположенных вдоль пути на столбах геодезической сети. Диапазон смещений реперной метки относительно начала приборной системы координат должен составлять 2000—10 000 мм в плане и  $\pm 150$  мм — в профиле, при условии, что среднеквадратическое отклонение (СКО) измерений по каждой координате не превысит 1 мм.

В настоящей работе описана модель стереоскопической системы, основанной на перспективной проекции, представлены два метода численного расчета положения точечного объекта относительно приборной системы координат, также показана возможность использования теории возмущений для анализа систематических и случайных погрешностей в стереоскопических оптико-электронных системах.

**Модель стереоскопической системы.** Стереоскопическая измерительная система, построенная на основе двух видео- или фотокамер с матричными приемниками изображения и перекрывающимися полями зрения объективов, позволяет получить четыре координаты изображений объекта, которые совместно с центрами проекции камер определяют в пространстве положение двух прямых, на пересечении которых находится точечный объект.

Координаты изображений точки  $P$  в плоскостях анализа стереоскопической системы, полученные в результате прямого перспективного преобразования [2], описываются переопределенной системой нелинейных уравнений, где в качестве неизвестных выступают координаты объекта  $x_G, y_G$  и  $z_G$ :

$$\left. \begin{aligned} x_{F_I} &= a'_I \frac{A_1 x_G + A_2 y_G + A_3 z_G - t_{X_I}}{A_4 x_G + A_5 y_G + A_6 z_G - t_{Z_I}}, \\ x_{F_{II}} &= a'_{II} \frac{A_7 x_G + A_8 y_G + A_9 z_G - t_{X_{II}}}{A_{10} x_G + A_{11} y_G + A_{12} z_G - t_{Z_{II}}}, \\ y_{F_I} &= a'_I \frac{A_{13} x_G + A_{14} y_G + A_{15} z_G - t_{Y_I}}{A_{16} x_G + A_{17} y_G + A_{18} z_G - t_{Z_I}}, \\ y_{F_{II}} &= a'_{II} \frac{A_{19} x_G + A_{20} y_G + A_{21} z_G - t_{Y_{II}}}{A_{22} x_G + A_{23} y_G + A_{24} z_G - t_{Z_{II}}}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь  $A_1 \dots A_{24}$  — коэффициенты, зависящие от внешних и внутренних параметров камер;  $a'_1, a'_{II}$  — задние отрезки объективов;  $x_{F_1}, x_{F_{II}}, y_{F_1}, y_{F_{II}}$  — координаты изображений объекта в плоскостях анализа камер  $F_1$  и  $F_{II}$ ;  $t_x, t_y, t_z$  — линейные координаты центра проекции камеры в глобальной ( $G$ ) системе координат. Для нахождения координат объекта, удовлетворяющих системе уравнений (1), предлагается использовать один из предложенных методов.

**Метод скрещивающихся прямых** основан на оценке вектора координат  $\tilde{\mathbf{P}}$  точки  $\tilde{P}$ , сумма квадратов расстояний от которой до прямых, задаваемых точками изображений и центрами проекции камер стереоскопической системы, минимальна. Точка  $\tilde{P}$  лежит на середине отрезка  $\tilde{P}_I \tilde{P}_{II}$ , который является общим перпендикуляром для двух указанных прямых [3].

Показанные на рис. 1 направляющие векторы  $\mathbf{r}_I$  и  $\mathbf{r}_{II}$  проецирующих лучей задаются выражениями

$$\mathbf{r}_I = \mathbf{P}_{F_1} - \mathbf{O}_{L_I}, \quad \mathbf{r}_{II} = \mathbf{P}_{F_{II}} - \mathbf{O}_{L_{II}},$$

где  $\mathbf{P}_{F_1}, \mathbf{P}_{F_{II}}$  — векторы, состоящие из координат изображений объекта в глобальной системе координат;  $\mathbf{O}_{L_I}, \mathbf{O}_{L_{II}}$  — векторы, определяющие положение начал отсчета локальных ( $L_I$  и  $L_{II}$ ) систем координат камер в глобальной системе координат.

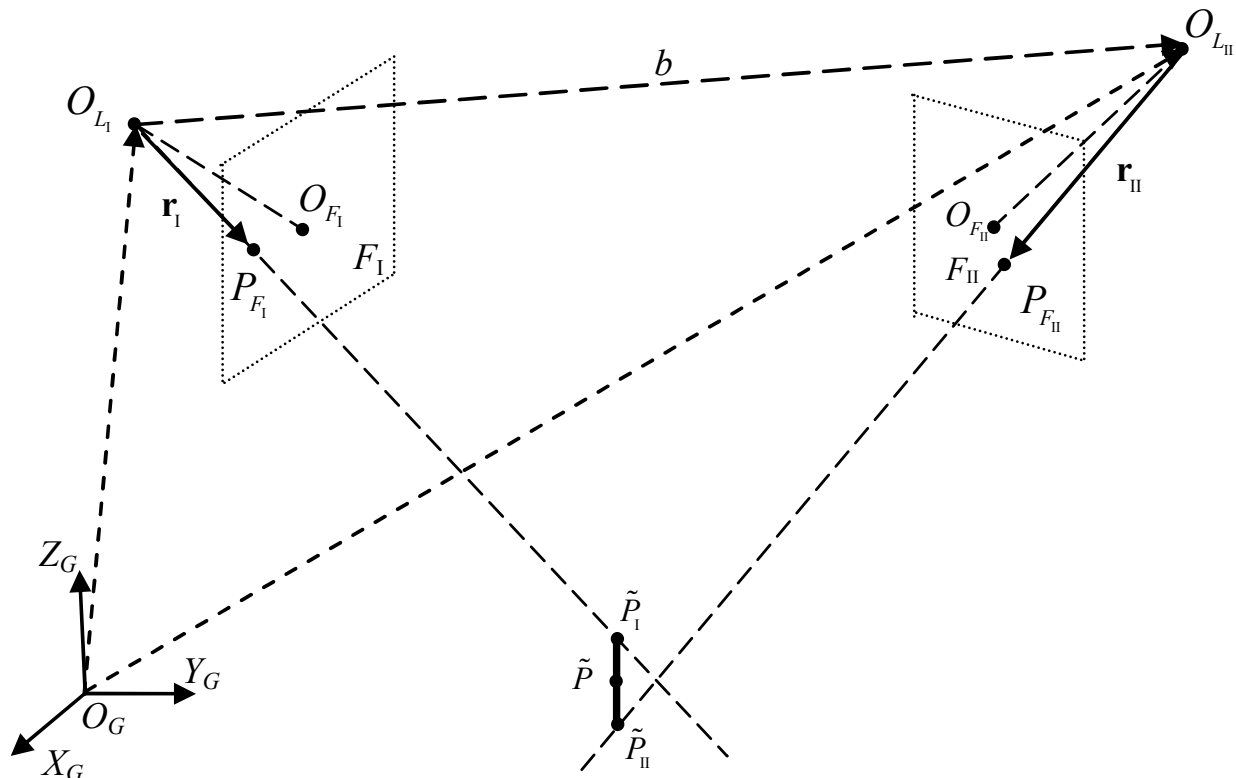


Рис. 1

Уравнения проецирующих лучей запишутся в виде

$$\mathbf{P}_{F_1} = \mathbf{O}_{L_I} - q_I \mathbf{r}_I, \quad \mathbf{P}_{F_{II}} = \mathbf{O}_{L_{II}} - q_{II} \mathbf{r}_{II}, \tag{2}$$

где  $q_I, q_{II}$  — свободные параметры.

Значения свободных параметров  $\tilde{q}_I$  и  $\tilde{q}_{II}$ , соответствующие минимальному расстоянию между скрещивающимися прямыми, находятся из выражений

$$\tilde{q}_I = \frac{(\mathbf{O}_{L_{II}} - \mathbf{O}_{L_I})^T \mathbf{r}_I - [(\mathbf{O}_{L_{II}} - \mathbf{O}_{L_I})^T \mathbf{r}_{II}] (\mathbf{r}_I^T \mathbf{r}_{II})}{1 - (\mathbf{r}_I^T \mathbf{r}_{II})^2},$$

$$\tilde{q}_{II} = \frac{\left[ (\mathbf{O}_{L_{II}} - \mathbf{O}_{L_I})^T \mathbf{r}_I \right] (\mathbf{r}_I^T \mathbf{r}_{II}) - (\mathbf{O}_{L_{II}} - \mathbf{O}_{L_I})^T \mathbf{r}_{II}}{1 - (\mathbf{r}_I^T \mathbf{r}_{II})^2}.$$

После подстановки найденных коэффициентов  $\tilde{q}_I$  и  $\tilde{q}_{II}$  в уравнения прямых (2) получим координаты концов искомого отрезка в глобальной системе координат

$$\tilde{\mathbf{P}}_{G_I} = \mathbf{O}_{L_I} - \tilde{q}_I \mathbf{r}_I, \quad \tilde{\mathbf{P}}_{G_{II}} = \mathbf{O}_{L_{II}} - \tilde{q}_{II} \mathbf{r}_{II},$$

полусумма которых даст оценку  $\tilde{\mathbf{P}}$  вектора координат точечного объекта  $P$

$$\tilde{\mathbf{P}}_G = \frac{\tilde{\mathbf{P}}_{G_I} + \tilde{\mathbf{P}}_{G_{II}}}{2}.$$

**Метод сингулярного разложения** основан на решении переопределенной системы линейных уравнений с помощью сингулярного разложения [4]. На рис. 2 приведена геометрическая схема метода, в котором для нахождения координат точечного объекта при статических измерениях для каждой из камер выбираются две плоскости ( $I'$  и  $I''$ ,  $II'$  и  $II''$ ), задающие своим пересечением две прямые, каждая из которых содержит точку изображения объекта и центр проекции камеры.

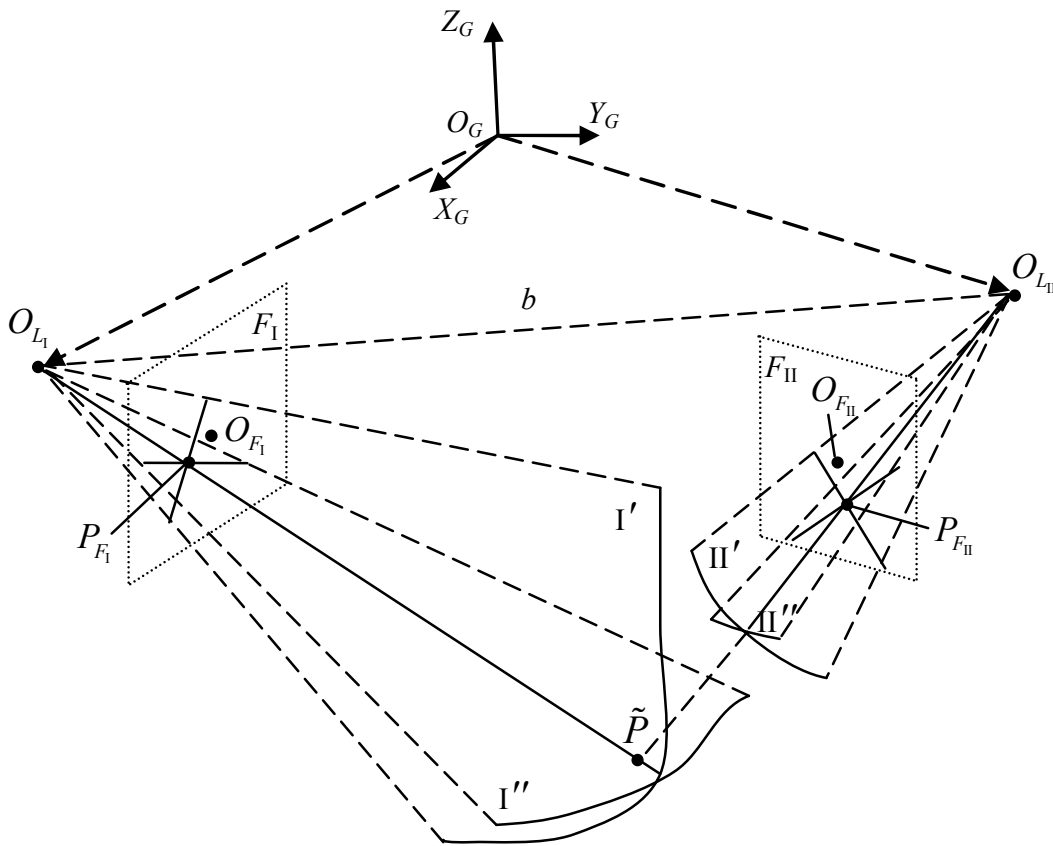


Рис. 2

Уравнения выбранных плоскостей образуют следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} A'_{G_I} P_{GX} + B'_{G_I} P_{GY} + C'_{G_I} P_{GZ} + D'_{G_I} &= 0, \\ A''_{G_I} P_{GX} + B''_{G_I} P_{GY} + C''_{G_I} P_{GZ} + D''_{G_I} &= 0, \\ A'_{G_{II}} P_{GX} + B'_{G_{II}} P_{GY} + C'_{G_{II}} P_{GZ} + D'_{G_{II}} &= 0, \\ A''_{G_{II}} P_{GX} + B''_{G_{II}} P_{GY} + C''_{G_{II}} P_{GZ} + D''_{G_{II}} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $A'_{G_1} — A'_{G_{II}}, A''_{G_1} — A''_{G_{II}}, B'_{G_1} — B'_{G_{II}}, B''_{G_1} — B''_{G_{II}}, C'_{G_1} — C'_{G_{II}}, C''_{G_1} — C''_{G_{II}}, D'_{G_1} — D'_{G_{II}}, D''_{G_1} — D''_{G_{II}}$  — коэффициенты, зависящие от внешних и внутренних параметров камер, а также измеренных координат изображений объекта.

Для каждой камеры в плоскости анализа задаются две прямые, пересекающиеся в точке изображения

$$\begin{aligned} \tilde{y}'_I &= k'_I \tilde{x}'_I + l'_I, & \tilde{y}'_{II} &= k'_{II} \tilde{x}'_{II} + l'_{II}, \\ \tilde{y}''_I &= k''_I \tilde{x}''_I + l''_I, & \tilde{y}''_{II} &= k''_{II} \tilde{x}''_{II} + l''_{II}, \end{aligned}$$

где  $k'_I, k''_I, k'_{II}, k''_{II}$  — коэффициенты наклона прямых в плоскостях анализа  $F_I$  и  $F_{II}$ ;  $l'_I, l''_I, l'_{II}, l''_{II}$  — коэффициенты линейного смещения прямых в плоскостях анализа  $F_I$  и  $F_{II}$ . Затем для камер выбираются четыре плоскости, каждая из которых содержит одну из заданных прямых и центр проекции камеры. Для каждой камеры получается по два линейных уравнения плоскостей, коэффициенты в которых равны

$$\begin{aligned} A'_{L_I} &= l'_I a'_I, & B'_{L_I} &= -a'_I, & C'_{L_I} &= l'_I, & D'_{L_I} &= 0; \\ A''_{L_I} &= l''_I a''_I, & B''_{L_I} &= -a''_I, & C''_{L_I} &= l''_I, & D''_{L_I} &= 0; \\ A'_{L_{II}} &= l'_{II} a'_{II}, & B'_{L_{II}} &= -a'_{II}, & C'_{L_{II}} &= l'_{II}, & D'_{L_{II}} &= 0; \\ A''_{L_{II}} &= l''_{II} a''_{II}, & B''_{L_{II}} &= -a''_{II}, & C''_{L_{II}} &= l''_{II}, & D''_{L_{II}} &= 0. \end{aligned}$$

В матричном виде уравнения плоскостей запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{H}'_{L_I} \mathbf{T}_G^{L_I} \mathbf{R}_G^{L_I} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \\ \mathbf{H}''_{L_I} \mathbf{T}_G^{L_I} \mathbf{R}_G^{L_I} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \\ \mathbf{H}'_{L_{II}} \mathbf{T}_G^{L_{II}} \mathbf{R}_G^{L_{II}} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \\ \mathbf{H}''_{L_{II}} \mathbf{T}_G^{L_{II}} \mathbf{R}_G^{L_{II}} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0 \end{aligned} \right\} \text{или} \left. \begin{aligned} \mathbf{H}'_{G_I} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \\ \mathbf{H}''_{G_I} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \\ \mathbf{H}'_{G_{II}} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \\ \mathbf{H}''_{G_{II}} \tilde{\mathbf{P}}_G &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где  $\mathbf{H}'_{L_I}, \mathbf{H}''_{L_I}, \mathbf{H}'_{L_{II}}, \mathbf{H}''_{L_{II}}$  — столбцы коэффициентов плоскостей для локальных систем координат камер;  $\mathbf{H}'_{G_I}, \mathbf{H}''_{G_I}, \mathbf{H}'_{G_{II}}, \mathbf{H}''_{G_{II}}$  — столбцы коэффициентов плоскостей для глобальной системы координат;  $\tilde{\mathbf{P}}_G = (\tilde{x}_G, \tilde{y}_G, \tilde{z}_G, 1)^T$  — искомый вектор оценок однородных координат объекта;  $\mathbf{R}_G^L, \mathbf{T}_G^L$  — матрицы поворота и переноса локальных систем координат камер относительно глобальной системы координат.

Окончательно система линейных уравнений запишется в виде

$$\mathbf{M} \tilde{\mathbf{P}}_G = \mathbf{N},$$

где

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}'_{G_I}{}^T \\ \mathbf{H}''_{G_I}{}^T \\ \mathbf{H}'_{G_{II}}{}^T \\ \mathbf{H}''_{G_{II}}{}^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A'_{G_I} & B'_{G_I} & C'_{G_I} \\ A''_{G_I} & B''_{G_I} & C''_{G_I} \\ A'_{G_{II}} & B'_{G_{II}} & C'_{G_{II}} \\ A''_{G_{II}} & B''_{G_{II}} & C''_{G_{II}} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{N} = - \begin{pmatrix} D'_{G_I} \\ D''_{G_I} \\ D'_{G_{II}} \\ D''_{G_{II}} \end{pmatrix}.$$

Система уравнений (3) является переопределенной. Для ее решения предлагается использовать алгоритм сингулярного разложения SVD [4], в соответствии с которым любая  $(W \times K)$ -матрица вещественных чисел  $\mathbf{M}$  может быть представлена в виде

$$\mathbf{M} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T,$$

где  $\mathbf{U}$  — ортогональная ( $W \times W$ )-матрица,  $\mathbf{V}$  — ортогональная ( $K \times K$ )-матрица,  $\mathbf{\Sigma}$  — ( $W \times W$ )-матрица, на главной диагонали которой находятся сингулярные числа матрицы  $\mathbf{M}$ , расположенные в порядке убывания, а все внедиагональные элементы равны нулю. Для нахождения подматриц  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{\Sigma}$ ,  $\mathbf{U}$  существуют итерационные алгоритмы, реализованные в системах MathCad и MatLab.

Сингулярное разложение матрицы  $\mathbf{M}$  позволяет найти псевдообратную ей матрицу  $\mathbf{M}^*$ , умножение которой слева на вектор  $\mathbf{N}$  дает вектор искомых координат объекта, соответствующий минимальному значению СКО:

$$\mathbf{M}^* = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{U}^T.$$

Тогда искомая оценка  $\tilde{\mathbf{P}}_G$  глобальных координат объекта может быть найдена в виде вектора

$$\tilde{\mathbf{P}}_G = \mathbf{M}^* \mathbf{N}.$$

**Анализ погрешностей.** Предложенные методы позволяют численно рассчитывать погрешности измерений в стереоскопической системе. Рассмотрим алгоритм скрещивающихся прямых для случая наиболее простой структуры стереоскопической системы, когда оптические оси камер параллельны горизонту, находятся в вертикальной плоскости, а глобальная система координат совмещена с системой координат нижней камеры.

На рис. 3 представлен результат стохастического моделирования измерений, когда номинальные значения координат объекта  $x_G=y_G=150$  мм, а расстояние  $z_G$  изменялось в диапазоне 2000—10 000 мм. На графике отражена зависимость СКО  $\sigma_{z_G}$  измерения координаты  $z_G$  объекта от дистанции при СКО измеренных координат изображения в плоскостях анализа камер  $\sigma_{x_F}=\sigma_{y_F}=0,1p$  [5], где  $p=2,775$  мкм — размер пиксела. При этом были приняты следующие значения параметров системы: база (см. рис. 1 и 2)  $b=300$  мм,  $a'_I=a'_{II}=35$  мм.

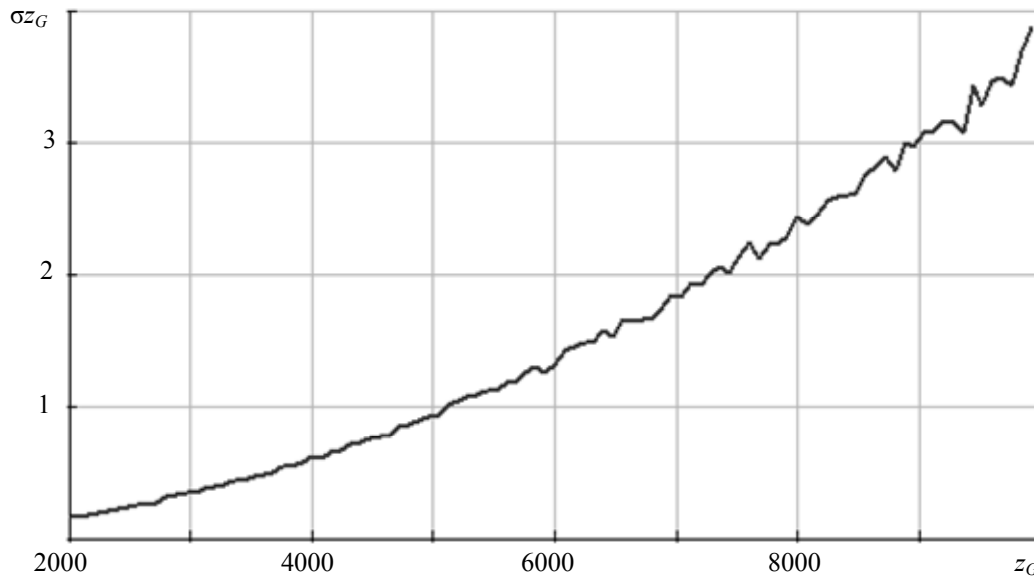


Рис. 3

Для стохастического моделирования погрешностей стереоскопической системы с использованием метода сингулярного разложения воспользуемся работами [6, 7], в которых доказывается возможность применения теории возмущений при анализе погрешности решения переопределенной системы линейных уравнений. В соответствии с этими работами погрешность оценки искомых координат объекта можно представить в виде

$$\Delta \mathbf{P}_G = \mathbf{E}_M \Delta \mathbf{M} + \mathbf{E}_N \Delta \mathbf{N},$$

где  $\Delta \mathbf{P}_G = \mathbf{P}_G - \tilde{\mathbf{P}}_G$ ,  $\Delta \mathbf{M}$  — вектор погрешностей коэффициентов матрицы  $\mathbf{M}$  системы линейных уравнений (3),  $\Delta \mathbf{N}$  — вектор погрешностей свободных членов той же системы уравнений.

Матрицы  $\mathbf{E}_M$  и  $\mathbf{E}_N$ , описывающие влияние ошибок коэффициентов системы уравнений (3) на решение в виде вектора координат объекта, можно найти из выражений

$$\mathbf{E}_M = \mathbf{V} \left( \Sigma^{-1} \|\mathbf{P}_G\| \right) \mathbf{W}^T, \quad \mathbf{E}_N = \mathbf{V} \Sigma^{-1} \mathbf{U}^T,$$

где  $\|\mathbf{P}_G\|$  — норма вектора  $\mathbf{P}_G$ .

Матрица  $\mathbf{W}$  состоит из столбцов, элементы которых рассчитываются по формуле

$$w_i = -u_i \frac{(\mathbf{P}_G)^T}{\|\mathbf{P}_G\|}, \quad i=1, \dots, \rho,$$

где  $\rho$  — ранг матрицы  $\mathbf{M}$ , а  $u_i$  — элементы столбцов матрицы  $\mathbf{U}$ .

Рассмотренный метод позволяет оценить погрешности первого порядка, т.е. погрешности измерения координат объекта, которые описываются первыми производными коэффициентов матрицы  $\mathbf{M}$  по исследуемым параметрам.

На рис. 4 показана зависимость СКО измерения расстояния до объекта в зависимости от СКО измерения координат изображений на матрицах. Стохастическое моделирование было проведено для двух методов обработки измерительной информации (кривая 1 — для алгоритма сингулярного разложения, 2 — для алгоритма скрещивающихся прямых). СКО измерения координат изображений  $\sigma_{x_F}$  и  $\sigma_{y_F}$  изменялись в диапазоне 0—100р, номинальное положение объекта было задано координатами  $x_G=y_G=150$  мм,  $z_G=10\,000$  мм. Из рис. 4 видно, что зависимость для алгоритма, основанного на теории возмущений (кривая 1), носит линейный характер. Разница между зависимостями 1 и 2 становится существенной при очень больших значениях  $\sigma_{x_F}$  и  $\sigma_{y_F}$ , которые никогда не имеют места на практике. На практике алгоритм поиска энергетического центра изображения обеспечивает СКО порядка 0,1 пиксела [5]. При этом разница СКО, вычисленных с использованием двух методов, не превышает  $2 \cdot 10^{-6}$  мм для  $x_G$ ,  $4 \cdot 10^{-6}$  — для  $y_G$  и  $2 \cdot 10^{-4}$  — для  $z_G$ , что для измерений в диапазоне 2000—10 000 мм несущественно.

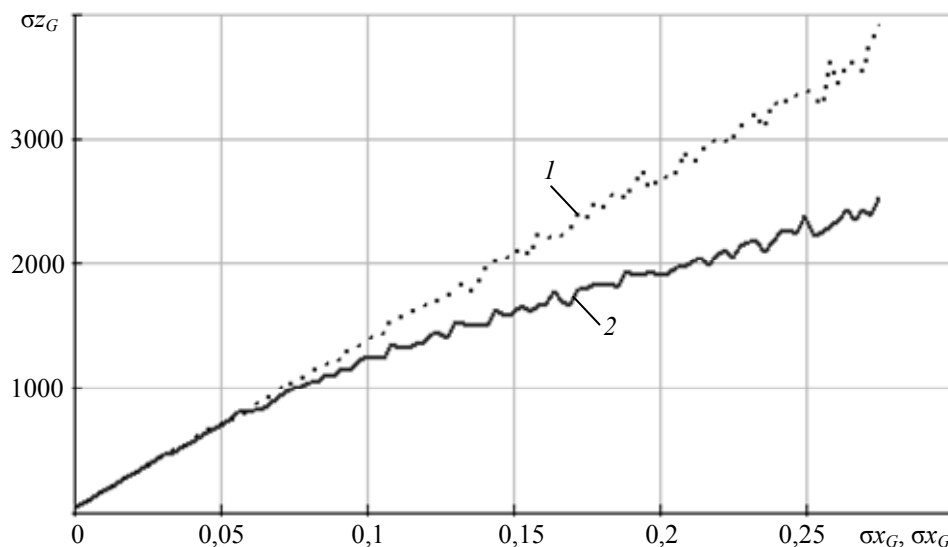


Рис. 4

**Результаты исследования.** Предложен метод сингулярного разложения матрицы коэффициентов переопределенной системы линейных уравнений для расчета координат объекта в стереоскопических и гиперстереоскопических оптико-электронных системах.

Обосновано применение теории возмущений для анализа систематических и случайных погрешностей измерений в стереоскопической системе. Такой подход удобен вследствие

использования матрицы влияния ошибок, которая зависит только от конфигурации стереоскопической системы и описывает, как ошибка оценивания того или иного параметра влияет на погрешность результата измерений. Данный алгоритм может найти применение для анализа влияния числа камер на погрешность измерения положения объекта в системе с  $n$  числом измерительных преобразователей. Метод исследования влияния случайной ошибки в стереоскопической системе [8] позволяет обойтись без стохастического моделирования при анализе случайных погрешностей измерений.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ и была проведена в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 гг.)“ и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arakantsev K. G., Konyakhin I. A., Timofeev A. N.* Precision system for motion path parameters measurement of wheel and rail transport // Intern. Symp. on Instrum. Sci. and Techn. Institute of Physics Publishing. J. of Phys. 2006. Vol. 48. P. 998—1002.
2. *Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 521 с.
3. *Форсайт Д., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
4. *Тыртышников Е. Е.* Матричный анализ и линейная алгебра. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 480 с.
5. *Якушенко Ю. Г.* Проектирование оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1981. 263 с.
6. *Wedin P., Wikstrom G.* First Order Error Analysis of a Linear System of Equations by use of Error Propagation Matrices connected to the Pseudo Inverse Solution // Proc. of the Householder Symp. XV. 2005. 31 p.
7. *Wedin P.* Perturbation Theory for Pseudoinverses // BIT. 1973. Vol. 13. P. 217—232.
8. *Haralick R. M.* Propagating Covariance in Computer Vision [Электронный ресурс]: <<http://www.citr.auckland.ac.nz/techreports/1998/CITR-TR-29.pdf>>.

#### Сведения об авторах

- Константин Геннадьевич Араканцев** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; младший научный сотрудник; E-mail: kostya3312@mail.ru, kostya3312@yandex.ru
- Дмитрий Валерьевич Жуков** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: dzhukov@gmail.com
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
26.04.10 г.



И. П. ГУРОВ, В. В. ОКУНЕВ, А. С. ПОТАПОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРАКТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ КОМПРЕССИИ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРИНЦИПА МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПИСАНИЯ

Исследована эффективность применения фрактальных методов компрессии изображений мазков крови, получаемых с помощью микроскопа. Оценка эффективности выполнена на основе принципа минимальной длины описания, позволившего объединить частные критерии степени сжатия и информационных потерь. Установлено, что фрактальные представления изображений данного типа менее эффективны по сравнению с другими способами представления.

**Ключевые слова:** фрактальное сжатие, компрессия изображений, телемедицина, репрезентационная минимальная длина описания.

**Введение.** В течение последних десятилетий технологии телемедицины активно используются при диагностике, лечении и профилактике заболеваний, а также при проведении научных исследований [1].

В связи с тем что по телемедицинским сетям передаются значительные объемы графической информации, актуальной является задача разработки эффективных методов сжатия изображений.

В настоящей работе рассматриваются методы сжатия информации, основанные на фрактальных представлениях изображений [2]. Известны также представления на основе эвристического подхода, статистических характеристик изображений, контурные и структурные представления и т.д. [3]. На сегодняшний день подходы к объективному оцениванию качества самих представлений, не относящихся к какой-либо конкретной решаемой задаче анализа изображений, не формализованы.

В настоящей работе предложен подход к сравнению эффективности представлений изображений, основанный на принципе репрезентационной минимальной длины описания (РМДО), обобщающем хорошо известный в теории индуктивного вывода принцип минимальной длины описания (МДО), используемый для выбора оптимальных моделей данных [4]. В рамках такого подхода оптимальной считается модель, для которой достигается минимум длины описания самой модели и длины описания данных посредством модели. Принцип РМДО здесь применяется для задания критерия оптимальности представления данных, обеспечивающего минимум суммарной длины описания заданного множества наборов данных.

Классическая теория кодирования позволяет получить оптимальный (минимальной длины) код на основе знания модели источника информации. Однако при компрессии изображений сама модель и ее класс, как правило, неизвестны. Таким образом, оптимальное представление по критерию РМДО выбирается в результате сравнения эффективности разных представлений изображений на основе характеристик соответствующих методов компрессии. В работе проведено сравнение фрактального представления с другим представлением изображений, используемым в методе сжатия JPEG.

**Метод фрактального сжатия изображений.** Основная идея метода заключается в том, чтобы описывать изображение не через значения яркостей его пикселей, а через коэффициенты преобразований, переводящих одни его области в другие [5]. Изображение разбивается на доменные и ранговые блоки.

Ранговыми блоками называют совокупность областей, покрывающих все изображение без взаимных пересечений, в простейшем случае это — прямоугольники равного размера.

В более сложном случае проводят разбиение в форме квадродерева [6], в котором каждый из ранговых блоков может быть разделен на четыре равные части.

Доменными блоками называют любые (возможно, перекрывающиеся) области изображения, которые сопоставляются с ранговыми блоками. Обычно выбираются доменные блоки, геометрически подобные ранговым, но вдвое большего размера.

Рассмотрим для простоты квадратные изображения размером  $N \times N$  пикселей, разделенные на ранговые блоки  $r \times r$  пикселей. Общее число ранговых блоков будет  $(N/r)^2$ . Каждому ранговому блоку ставится в соответствие некоторый доменный блок. При этом доменный блок уменьшается в два раза и может быть дополнительно повернут на 90, 180 или 270°, а также зеркально отражен. Доменных блоков размером  $2r \times 2r$  будет  $(N - 2r + 1)^2$ . Помимо геометрического преобразования блоков выполняется также линейное яркостное преобразование, в результате которого должны быть минимизированы отклонения яркости пикселей доменного и рангового блоков.

Результатом компрессии является сжатый файл, в котором для каждого рангового блока указываются номер поставленного ему в соответствие доменного блока, а также параметры геометрического и яркостного преобразований.

Несложно оценить размер сжатого файла. Если  $n_d$  — число доменных блоков, то для кодирования номера домена потребуется  $\lceil \log_2 n_d \rceil$  бит. Для указания вида геометрического преобразования требуется три бита. При кодировании каждого из коэффициентов  $c$  и  $b$  для каждого блока можно выделить по восемь бит, что обеспечит яркостное преобразование между доменным и ранговым блоками с точностью до одной градации яркости. При представлении разбиения в форме квадродерева необходимо для каждого блока указывать, разделен ли он на подблоки, для чего требуется один бит. Таким образом, полная длина фрактально сжатого изображения составит

$$L_{\text{img}} = n_r (\lceil \log_2 n_d \rceil + 20) \text{ бит}, \quad (1)$$

где  $n_r$  — число ранговых блоков.

**Оценка качества сжатия в соответствии с принципом РМДО.** Для оценки методов сжатия с потерями обычно используют два критерия эффективности: коэффициент сжатия и качество восстановленного изображения. Принцип РМДО позволяет объединить эти два критерия. Если полагать, что в сжатом файле содержится модель изображения, то размер сжатого файла равен длине модели. Длина описания отклонений восстановленного после декомпрессии изображения от исходного (в предположении о статистической независимости отклонений в разных пикселях) составляет

$$L_{\text{loss}} = N^2 H(f - f'), \quad (2)$$

где через  $f$  обозначено исходное изображение, через  $f'$  — восстановленное,  $H$  — энтропия отклонений:

$$H(x) = - \sum_{i=0}^n p_i \log_2 p_i, \quad p_i = \frac{h_i}{N^2},$$

$h_i$  — количество пикселей яркости  $i$ .

Суммарная длина описания

$$L = L_{\text{img}} + L_{\text{loss}} \quad (3)$$

является критерием эффективности представления изображения. Данный критерий может быть использован при выборе параметров сжатия в любом методе компрессии. Следует отметить, что величина  $L_{\text{img}}/V$ , где  $V$  — объем исходного (несжатого) файла, является коэффициентом сжатия изображения, тогда как  $L_{\text{loss}}/V$  можно назвать коэффициентом информационных потерь.

Рассчитав длину описания  $L$ , можно определить оптимальные параметры метода сжатия, позволяющие достичь наилучшего соотношения степени сжатия и информационных потерь. Для определения эффективности использованного в конкретном способе сжатия представления изображений необходимо вычислить суммарную длину описания по выборке изображений. При этом эффективность представления может изменяться в зависимости от предметной области [7].

Таким образом, алгоритм сравнения эффективности представлений изображений на основе методов сжатия по критерию РМДО следующий.

1. Составить выборки изображений, обладающие характерными сюжетными или структурными особенностями, которые могут или, наоборот, не могут быть отражены в рамках исследуемого представления.

2. Для каждого изображения выборки:

— осуществить компрессию с разной степенью сжатия;

— вычислить значение  $L_{img}$  для каждого из вариантов компрессии на основе размера

сжатого файла, из которого вычтена длина метаданных;

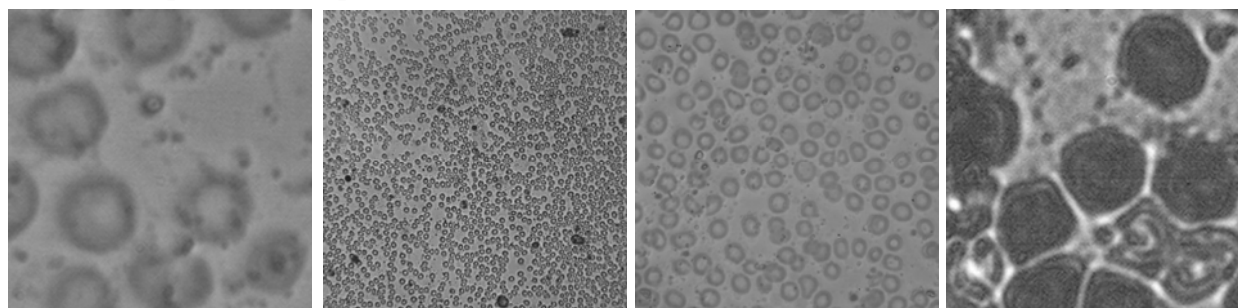
— вычислить значение  $L_{loss}$  (см. (2));

— найти установочные параметры, при которых достигается минимальное значение для каждого из представлений.

3. Вычислить суммарную длину описаний по каждой выборке для каждого из представлений.

**Экспериментальное исследование эффективности фрактальных представлений.**

Для экспериментальных исследований использовалась выборка из 16 изображений, получаемых с помощью микроскопа при исследовании проб мазков крови (представлены фрагменты, а также уменьшенные копии полноразмерных изображений). На рис. 1 приведены оригинальные изображения, на рис. 2 — восстановленные.



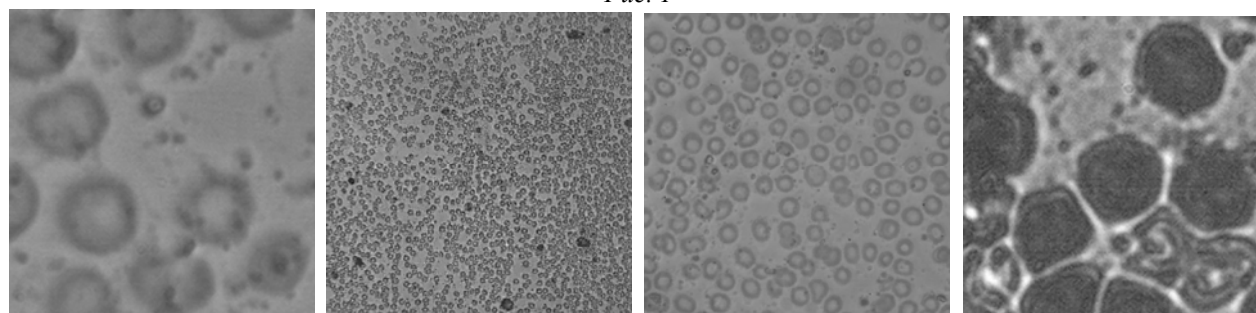
Изображение № 1

Изображение № 6

Изображение № 8

Изображение № 13

Рис. 1



Изображение № 1

Изображение № 6

Изображение № 8

Изображение № 13

Рис. 2

Каждое изображение было сжато с помощью фрактального алгоритма в двух режимах: с использованием одинаковых ранговых блоков и с разбиением в форме квадродерева. Для сравнения была проведена компрессия с помощью алгоритма JPEG с различными значениями

параметра качества сжатия. На рис. 3 приведены примеры разбиений изображений в форме квадродерева.

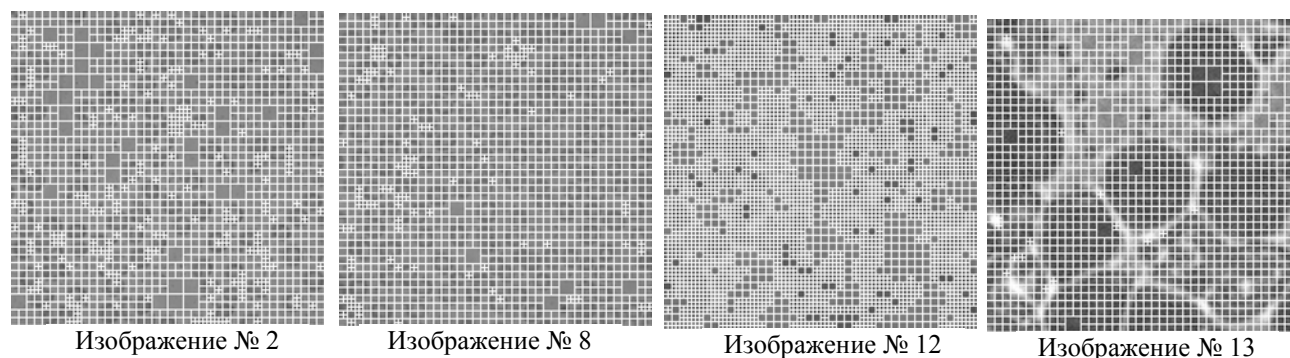


Рис. 3

Эксперимент с использованием фрактального алгоритма при постоянном размере блоков показал, что качество восстановленного изображения ухудшается при увеличении размера рангового блока. В то же время степень сжатия увеличивается. Критерий РМДО позволяет найти оптимальный размер рангового блока, при котором достигается компромисс информационных потерь и степени сжатия. Следует отметить, что для некоторых изображений не наблюдается экстремум критерия РМДО, что может служить указанием на неприменимость фрактального представления в данном случае.

Результаты тестирования алгоритма JPEG при разных значениях параметра качества сжатого изображения показали одновременное увеличение информационных потерь (при уменьшении указанного параметра) и повышение степени сжатия (т.е. уменьшение размера сжатого файла).

Были получены следующие средние по выборке значения длины описания изображений: 274 193 и 270 628 бит для фрактального сжатия (без использования квадродерева и с ним) и 266 618 бит для алгоритма JPEG. При этом фрактальное сжатие с применением квадродерева выигрывает у JPEG-сжатия примерно в 43 % случаев. Таким образом, фрактальное сжатие (в том числе и при использовании более эффективного разбиения в форме квадродерева) в случае данной выборки изображений несущественно проигрывает сжатию JPEG. В связи с этим необходимо отметить, что для других предметных областей (например, снимков макрообъектов, получаемых с помощью цифровых фотокамер) фрактальное представление более эффективно [8].

Неэффективность фрактального представления в случае данного типа изображений обусловлена, видимо, тем, что подобие фрагментов изображений здесь присутствует на одном масштабном уровне, тогда как при классическом фрактальном сжатии для каждого рангового блока производится поиск подобного ему доменного блока на другом масштабном уровне (как правило, масштабный коэффициент берется равным двум). Этот вывод подтверждается и анализом квадродеревьев, приведенных на рис. 3: наиболее крупные ранговые блоки располагаются в областях изображений, на которых не присутствует клеток крови, тогда как остальные ранговые блоки вовсе не соответствуют отдельным клеткам.

Наличие на изображениях данного типа сходных фрагментов, влекущее существенную информационную избыточность, не учитывается во фрактальном представлении (равно как и в алгоритме JPEG, в котором блоки изображения сжимаются независимым образом), в связи с чем требуется разработка предметно-зависимого представления, в рамках которого эффективность сжатия может быть существенно повышена.

**Заключение.** На основе результатов сжатия изображений проведено сравнение их эффективности по критерию РМДО. При этом информационные потери оцениваются по энтропии отклонений исходного и восстановленного изображений, тогда как длина описания

модели изображения, сохраненного в сжатом файле, вычисляется непосредственно по размеру файла (при исключении вспомогательной информации). Минимальная длина описания изображения в рамках выбранного представления оценивается при оптимизации управляющего параметра алгоритма компрессии.

Установлено, что эффективность фрактального представления изображений, полученных с помощью микроскопа, оказывается ниже (в отличие от изображений других типов). Данный результат объясняется тем, что фрагменты данных изображений взаимно подобны, масштабный фактор близок к единице, тогда как во фрактальном сжатии требуется подобие доменных и ранговых блоков изображения, различающихся по масштабу. Таким образом, как при фрактальных методах сжатия, так и при использовании алгоритма JPEG не устраняется информационная избыточность изображений данного типа, что приводит к необходимости разработки специализированных представлений изображений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страница регистрации к обследованию // Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]: <[http://www.who.int/entity/goe/data/global\\_e-health\\_survey\\_2009\\_ru.pdf](http://www.who.int/entity/goe/data/global_e-health_survey_2009_ru.pdf)>.
2. *Ali M., Clarkson T. G.* Survey of block based fractal image compression and its applications // Proc. 2nd Seminar on Information Technology and its Applications (ITA'92). 1992. P. 110—122.
3. *Потапов А. С., Гуров И. П., Васильев В. Н.* Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению „Информационно-телекоммуникационные системы“. 2008 [Электронный ресурс]: <<http://www.ict.edu.ru/ft/005648/62325e1-st12.pdf>>.
4. *Vitanyi P. M. B., Li M.* Minimum description length induction, Bayesianism, and Kolmogorov complexity // IEEE Trans. Inform. Theory. 2000. Vol. 46, N 2. P. 446—464.
5. *Jorgensen P. E. T., Song M. S.* Analysis of fractals, image compression, entropy encoding, Karhunen-Loeve transforms // Act. Appl. Math. 2009. Vol. 108, N 3. P. 489—508.
6. *Yigang Wang, Yiwen Jin, Qunsheng Peng.* Merged quadtree fractal image compression // Optical Engineering. 1998. Vol. 37, N 8. P. 2284—2289.
7. *Потапов А. С.* Сравнительный анализ структурных представлений изображений на основе принципа репрезентационной минимальной длины описания // Оптик. журн. 2008. Т. 75, № 11. С. 35—41.
8. *Окунев В. В., Потапов А. С.* Анализ фрактального представления изображений по критерию репрезентационной минимальной длины описания // Тр. науч.-исслед. центра фотоники и оптоинформатики / Под ред. И. П. Гурова и С. А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. Вып. 2. С. 315—325.

#### Сведения об авторах

**Игорь Петрович Гуров**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; заведующий кафедрой

**Вадим Вячеславович Окунев**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; младший научный сотрудник; E-mail: vadik-okunev@yandex.ru

**Алексей Сергеевич Потапов**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: pas.aicv@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
компьютерной фотоники и видеоинформатики

Поступила в редакцию  
01.08.11 г.

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 62-506

О. А. РЕМИЗОВА, И. В. РУДАКОВА, В. В. СЫРОКВАШИН, А. Л. ФОКИН

## РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАДРАТИЧНЫХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ

Синтез робастного регулятора для объекта с запаздыванием осуществляется по расширенной модели последнего, полученной вследствие искусственного разделения движений в нем, в рамках решения задачи  $H^2$ -оптимального управления и задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов для звена чистого запаздывания.

*Ключевые слова:* неопределенность, интегральный квадратичный функционал, случайные возмущения, линейная теория, расширенная модель, демпфирование.

**Введение.** Методы синтеза, основанные на решении оптимальных задач с минимизацией квадратичного функционала, широко используются при проектировании систем управления, так как они позволяют уменьшить непроизводительные затраты энергии, вызванные действием возмущений, при работе системы управления.

Основным недостатком такой системы является чувствительность регулируемых величин к неопределенности параметров модели объекта управления [1—3]. Это приводит к существенной потере качества управления, а во многих случаях к потере устойчивости реальной системы.

Наличие запаздывания в модели объекта усложняет задачу синтеза и ухудшает качественные показатели системы, в наибольшей степени — показатели грубости. Поэтому для систем с запаздыванием особенно актуальна задача снижения чувствительности к возможным вариациям параметров, в том числе и к величине запаздывания, которое может изменяться в процессе функционирования объекта.

Будем рассматривать модель „вход—выход объекта“ в виде передаточной функции в комплексной плоскости

$$y_0(p) = W_o(p)u(p) = k_o \frac{B_v(p) \exp(-\tau_o p)}{A_n(p)} u(p), \quad (1)$$

где  $B_v(p)$ ,  $A_n(p)$  — произвольные полиномы степени  $v, n$  соответственно ( $v \leq n$ ,  $B_v(0) = A_n(0) = 1$ ), коэффициенты полиномов  $B_v(p)$ ,  $A_n(p)$  могут изменяться в заданных интервалах:  $\underline{k}_o \leq k_o \leq \overline{k}_o$ ,  $\underline{\tau}_o \leq \tau_o \leq \overline{\tau}_o$ .

Традиционно при наличии запаздывания используется точное его прогнозирование: упредитель Смита, регулятор Ресвика, которые обеспечивают отсутствие запаздывания в харак-

теристическом уравнении замкнутой системы [4, 5]. К этой же группе можно отнести регуляторы, использующие прогнозирующую модель (предикторы) [6, 7].

Такая система работоспособна при известной величине запаздывания, так как звено запаздывания непосредственно входит в передаточную функцию регулятора.

В настоящей работе предлагается подход, в котором использована идея декомпозиции модели (1) на звено чистого запаздывания и инерционную часть и последовательно решена практически востребованная задача синтеза в рамках робастной квадратичной теории без привлечения методов точного прогнозирования движения системы на время запаздывания.

**Основной результат.** Вместе с реальной передаточной функцией объекта (1) рассмотрим номинальную

$$W_o(p) = k_o^0 \frac{B_v^0(p)}{A_n^0(p)} \exp(-\tau_o^0 p), \quad (2)$$

где  $k_o^0, \tau_o^0$  — номинальные значения коэффициента передачи и запаздывания,  $B_v^0(p), A_n^0(p)$  — номинальные полиномы числителя и знаменателя.

Здесь предполагается, что пары реальных и номинальных полиномов  $B_v(p), B_v^0(p)$  и  $A_n(p), A_n^0(p)$  являются одновременно устойчивыми или неустойчивыми, или находятся на границе устойчивости. В случае неустойчивости они имеют одинаковое число неустойчивых корней.

Задача синтеза решается при дополнительном условии уменьшения чувствительности системы к возможным вариациям параметров модели (1) и величины запаздывания относительно их номинальных значений. Это достигается за счет искусственного расширения исходной номинальной модели (2) и разделения движений в объекте на две составляющие. Управление решает две задачи квадратичной оптимизации: стабилизацию исходной модели объекта и обеспечение взаимной компенсации составляющих движения модели. Решение второй задачи, как показано в [8—11], обеспечивает робастность системы.

**Первый этап синтеза.** Здесь решается задача увеличения грубости по отношению к запаздыванию. Рассматривается часть передаточной функции (2), содержащая чистое запаздывание с аппроксимацией Паде

$$W_{o1}(p) = \exp(-\tau_o^0 p) \approx \frac{\beta(p)}{\alpha(p)} = \frac{1 - \tau_o^0 p/2}{1 + \tau_o^0 p/2}. \quad (3)$$

Аппроксимация Паде первого порядка вполне точно представляет динамику запаздывания в области низких и средних частот. Для увеличения точности можно рассмотреть аппроксимации второго, третьего и более высоких порядков, но в этом случае увеличивается сложность регулятора.

Для определенности условимся, что система является робастной по отношению к вариациям величины запаздывания  $\tau_o$ , если она не теряет устойчивости при неконтролируемом возрастании этой величины в 3—4 раза относительно номинального значения  $\tau_o^0$ . Этого вполне достаточно для практики. Тогда справедливо следующее утверждение.

**Утверждение.** Решение задачи оптимального управления с минимизацией интегрального квадратичного функционала для объекта чистого запаздывания, грубого по отношению к вариациям величины запаздывания, достигается в классе ПИ законов регулирования вида

$$W_{p1}(p) = \frac{k(p)}{l(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{p}. \quad (4)$$

где  $k(p), l(p)$  — полиномы,  $b_1, b_0$  — настраиваемые параметры регулятора.

**Доказательство.** Во временной области модель (4) будет

$$\dot{x}_1 = -\frac{2}{\tau_o^0} x_1 + \frac{4}{\tau_o^0} u_1, \quad (5)$$

$$y_1 = x_1 - u_1. \quad (6)$$

Для робастной стабилизации такого объекта лучше всего подходит задача аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) расширенной модели [8, 9], так как это позволяет получить регулятор минимальной размерности, равной единице. Кроме того, на этом этапе задача может быть рассмотрена без возмущений.

Искусственное разделение на две составляющие достигается за счет пропуска переменной состояния  $x_1$  через фильтр вида

$$\bar{x}_1(p) = \frac{1 - t_{\phi 1} p}{1 + t_{\phi 2} p} x_1(p), \quad (7)$$

где  $t_{\phi 1}, t_{\phi 2}$  — настраиваемые параметры фильтра.

Для синтеза оптимального регулятора состояния по расширенной модели вводится новая регулируемая переменная

$$z_1 = m_1 \Delta \bar{x}_1 + m_2 \bar{x}_1, \quad (8)$$

где  $m_1, m_2$  — настраиваемые коэффициенты ( $m_1, m_2 > 0$ ,  $m_1 \neq m_2$ ),  $\Delta \bar{x}_1 = x_1 - \bar{x}_1$ .

Расширенное уравнение состояния имеет вид

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\bar{x}}_1 \\ \dot{\bar{x}}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\beta_1/\tau_o^0 & -t_{\phi 2}^{-1} & -2\beta_1/\tau_o^0 \\ (1 + 2t_{\phi 1}/\tau_o^0)/t_{\phi 2} & 2t_{\phi 1}/t_{\phi 2}\tau_o^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x}_1 \\ \bar{x}_1 \end{bmatrix} + 4 \begin{bmatrix} \beta_1/\tau_o^0 \\ t_{\phi 1}/t_{\phi 2}\tau_o^0 \end{bmatrix} u_1, \quad (9)$$

где  $\beta_1 = 1 + t_{\phi 1}/t_{\phi 2}$ .

В качестве квадратичного функционала рассматривается выражение

$$J = \int_0^{\infty} [qz_1^2(t) + ru_1^2(t)] dt, \quad (10)$$

где  $q, r$  — настраиваемые параметры.

Задаваясь настраиваемыми параметрами  $t_{\phi 1}, t_{\phi 2}, m_1, m_2, q, r$ , решаем задачу АКОР (9), (10), как описано в [8], и получаем управление по состоянию

$$u_1 = k_1 \Delta \bar{x}_1 + k_2 \bar{x}_2. \quad (11)$$

После подстановки управления (11) в модель (9) получаем замкнутую систему с известным характеристическим уравнением

$$G^0(p) = p^2 + g_1^0 p + g_0^0 = 0, \quad (12)$$

где  $g_1^0, g_0^0$  — известные коэффициенты.

Регулятор выхода в данном случае может быть получен в виде ПИ закона (4). Для системы, состоящей из объекта (3) и регулятора (4), характеристическое уравнение имеет вид

$$G(p) = \alpha(p)l(p) + \beta(p)k(p) = p^2 + g_1 p + g_0 = 0, \quad (13)$$

где коэффициенты  $g_1, g_0$  линейно зависят от параметров  $b_1, b_0$ .

Приравняв полиномы (12) и (13), получим систему линейных уравнений для определения неизвестных коэффициентов  $b_1, b_0$  вида



$$\begin{bmatrix} (g_1^0 + 2/\tau_o^0) & -1 \\ g_0^0 & 2/\tau_o^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1^0 - 2/\tau_o^0 \\ g_0^0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Решив систему уравнений (14), получим значения параметров регулятора (4) для заданного значения запаздывания  $\tau_o^0$ .

**Второй этап синтеза.** Рассматривается исходная номинальная передаточная функция объекта (2) при условии, что для компенсации влияния звена запаздывания применяется ПИ регулятор (4). Поэтому при синтезе регулятора второго этапа теоретически нужно рассматривать передаточную функцию с запаздыванием вида

$$W_{o2}(p) = k_o^0 \frac{b_1 p + b_0}{p} \frac{B_v^0(p)}{A_n^0(p)} \exp(-\tau_o^0 p). \quad (15)$$

Но дальше процедура синтеза становится приближенной, так как передаточная функция (15) рассматривается без запаздывания. Отсутствие запаздывания легко скорректировать в дальнейшем. Поэтому при  $k_o^0 = 1$  будет

$$\hat{W}_{o2}(p) = \frac{b_1 p + b_0}{p} \frac{B_v^0(p)}{A_n^0(p)}. \quad (16)$$

Синтез регулятора выхода осуществляется при помощи решения задачи  $H^2$ -оптимального управления для расширенной модели, которая соответствует передаточной функции (16), при наличии возмущений типа белого или цветного шума. Пусть исходная модель объекта имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_0 + \mathbf{B}_{10} \mathbf{w}_0 + \mathbf{B}_{20} u, \quad \mathbf{x}_0(0) = \mathbf{x}_0^0, \quad (17)$$

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{C}_{10} \mathbf{x}_0, \quad (18)$$

$$\mathbf{y}_0 = \mathbf{C}_{20} \mathbf{x}_0 + n_y, \quad (19)$$

где  $\mathbf{x}_0 \in R^n$  — вектор состояния,  $u \in R^1$  — управление,  $\mathbf{w}_0 \in R^l$  — вектор возмущения в объекте,  $n_y \in R^1$  — помеха измерения,  $\mathbf{z}_0 \in R^y$  — вектор контролируемых переменных,  $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_{10}, \mathbf{B}_{20}$  — номинальные значения матриц.

При расширении модели вводится система фильтров для получения опорной траектории в пространстве состояний вида

$$\mathbf{x}_1(p) = \mathbf{W}_\phi(p) \mathbf{x}_0(p) = \frac{1 - T_{\phi 1} p}{1 + T_{\phi 2} p} \mathbf{x}_0(p), \quad (20)$$

где  $T_{\phi 1}, T_{\phi 2}$  — постоянные времени фильтра.

Относительно этой опорной траектории рассматривается сигнал рассогласования

$$\Delta x_1(t) = x_0(t) - x_1(t). \quad (21)$$

После этого вводится новая регулируемая переменная

$$z(t) = d_1 \Delta x_1(t) + d_2 x_1(t), \quad (22)$$

где  $d_1 \neq d_2, d_1, d_2 > 0$  — настраиваемые параметры.

В расширенном пространстве состояний  $\mathbf{x}^T = [\Delta x_1^T \quad x_1^T]^T$  модель (17)—(22) имеет вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \mathbf{w}_0 + \mathbf{B}_2 u, \quad \mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} (x_0^0)^T \\ 0 \end{bmatrix}^T, \quad (23)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{M}d\mathbf{x}, \quad (24)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_2\mathbf{x} + n_y, \quad (25)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \beta A_0 - T_{\phi 2}^{-1} \mathbf{I} & \beta A_0 \\ T_{\phi 2}^{-1} (I - T_{\phi 1} A_0) & -T_{\phi 2}^{-1} T_{\phi 1} A_0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \beta B_{10} \\ -T_{\phi 2}^{-1} T_{\phi 1} B_{10} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \beta B_{20} \\ -T_{\phi 2}^{-1} T_{\phi 1} B_{20} \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ x_1 \end{bmatrix}$$

— вектор состояния расширенной модели объекта,  $\beta = 1 + T_{\phi 2}^{-1} T_{\phi 1}$ ,  $\mathbf{d} = [d_1 \mathbf{I} \quad d_2 \mathbf{I}]$ ,  $\mathbf{M} = \text{diag} \{ \mu_i \}$ ,  $\mathbf{C}_2 = [\mathbf{C}_{20} \quad \mathbf{C}_{20}]$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Далее для расширенной модели решается задача  $H^2$ -оптимального управления. В работе [10] доказано, что решение существует и осуществлена частичная взаимная компенсация сигналов  $\Delta x_1(t)$  и  $x_1(t)$ , которая обеспечивает робастность синтезированной системы. Для достижения заданных качественных показателей системы используется настройка в пространстве параметров:  $T_{\phi 1}$ ,  $T_{\phi 2}$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $\mu_i$ . Решение находится в соответствии с методикой, представленной в [9—11]. В результате получаем регулятор с промежуточной передаточной функцией  $W_{p2}(p)$ .

Настройка параметров выполняется таким образом, чтобы соблюдались два условия:

$$\omega_{C_2} \leq \omega_{C_1}, \quad (26)$$

$$h_2 \geq h_1, \quad \varphi_2 \approx \varphi_1, \quad (27)$$

где  $\omega_{C_2}$  — частота среза системы без запаздывания с передаточной функцией регулятора  $W_{p2}(p)$ ;  $h_2$ ,  $\varphi_2$  — запасы по амплитуде и фазе для этой системы,  $\omega_{C_1}$ ,  $h_1$ ,  $\varphi_1$  — соответствующие показатели, полученные для звена чистого запаздывания.

При выполнении условия (26) процедуры синтеза первого и второго этапов дополняют друг друга, так как целью обоих этапов является повышение качества системы примерно в одной и той же области частот. Условие (27) позволяет получить систему, не уступающую по качеству системе, синтезированной на первом этапе. Оно, в отличие от (26), не является необходимым и обусловлено приближенным характером синтеза регулятора на втором этапе. Оно позволяет устранить последствия замены точной передаточной функции (15) ее приближенным аналогом (16) и вносит дополнительный элемент коррекции.

В результате двухэтапной процедуры синтеза получается регулятор с передаточной функцией вида

$$W_p(p) = \frac{b_1 p + b_0}{k_o^0 p} W_{p2}(p). \quad (28)$$

**Пример.** Рассмотрим объект с номинальной передаточной функцией

$$W_o(p) = \frac{k_o^0}{(T_o^0 p + 1)^3} \exp(-\tau_o^0 p), \quad (29)$$

где  $k_o^0 = 0,325$ ,  $T_o^0 = 6$  с,  $\tau_o^0 = 6$  с.

На первом этапе синтеза рассмотрим значения параметров:  $t_{\phi 1} = 50$  с,  $t_{\phi 2} = 8$  с,  $m_1 = 5$ ,  $m_2 = 4,9$ ,  $q = 1$ ,  $r = 10^3$ . Тогда для объекта чистого запаздывания получим систему со следующими характеристиками:  $H^\infty$ -норма функции чувствительности:  $\eta = 1,558$ , запас устойчивости по амплитуде:  $h_1 = 9,05$  дБ, запас устойчивости по фазе:  $\varphi_1 = 73,4^\circ$ , частота среза:

$\omega_{C_1} = 0,0947 \text{ с}^{-1}$ . Для регулятора (4) следующие параметры:  $b_1 = 0,2748$ ,  $b_0 = 0,09109$ . Интервал изменения относительной величины запаздывания, при котором система не теряет устойчивости, будет

$$0 < \tau_o^0 / \tau_o \leq \tau_m = 3,25. \quad (30)$$

Переходная характеристика первого этапа представлена на рис. 1. Передаточная функция (16) будет иметь вид

$$\hat{W}_2(p) = \frac{1}{(T_o^0 p + 1)^3} \frac{b_1 p + b_0}{p}. \quad (31)$$

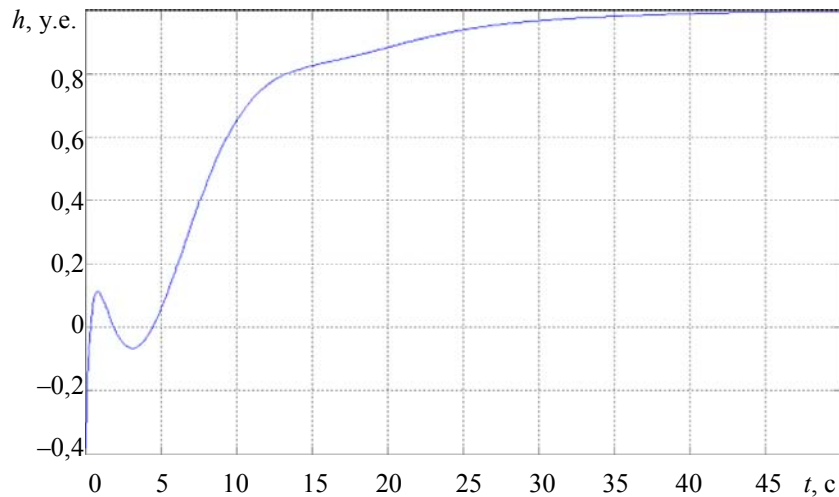


Рис. 1

Ей соответствует представление (17)—(19) с матрицами

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0,0046 & -0,083 & -0,5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{10} = \mathbf{B}_{20} = \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,0013 \\ -0,0002 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{10} = \mathbf{C}_{20} = \mathbf{C}_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Расширенная модель получается в соответствии с формулами (20)—(25). Далее по методике, изложенной в [9—11], решается задача  $H^2$ -оптимального управления при значениях настраиваемых параметров:  $T_{\phi 1} = 6,9 \cdot 10^5 \text{ с}$ ,  $T_{\phi 2} = 200 \text{ с}$ ,  $d_1 = 5$ ,  $d_2 = 4,65$ . В результате получается передаточная функция регулятора вида

$$W_p(p) = \frac{k(p)}{pl(p)}, \quad (32)$$

где

$$\begin{aligned} k(p) &= 21,65p^8 + 18,96p^7 + 6,16p^6 + 0,91p^5 + 0,057p^4 + 0,0007p^3 + \\ &\quad + 3,4 \cdot 10^{-6}p^2 + 5,54 \cdot 10^{-9}p + 1,116 \cdot 10^{-13}; \\ l(p) &= 0,325p^8 + 1,124p^7 + 1,534p^6 + 0,991p^5 + 0,2p^4 + 0,0039p^3 + \\ &\quad + 2,8 \cdot 10^{-5}p^2 + 9,2 \cdot 10^{-8}p + 1,13 \cdot 10^{-10}. \end{aligned}$$

Переходная характеристика приведена на рис. 2. Система имеет следующие характеристики:  $\eta = 1,719$ ,  $h_1 = 9,51$  дБ,  $\varphi_1 = 54,4^\circ$ ,  $\omega_{C_1} = 0,0701$  с<sup>-1</sup>,  $\tau_m = 3,25$ , последнее совпадает со значением на первом этапе синтеза (30).

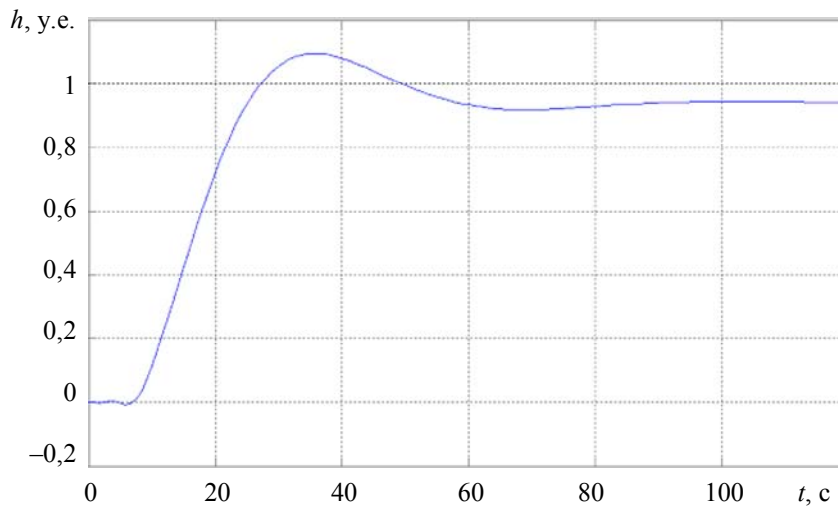


Рис. 2

Для сравнения приведем характеристики соответствующей системы без запаздывания. При настройках  $T_{\varphi 1} = 9 \cdot 10^5$  с,  $T_{\varphi 2} = 200$  с,  $d_1 = 5$ ,  $d_2 = 1$  получим характеристики системы:  $\eta = 1,379$ ,  $h_1 = 14,6$  дБ,  $\varphi_1 = 54,5^\circ$ ,  $\omega_{C_1} = 0,154$  с<sup>-1</sup>. Переходная характеристика представлена на рис. 3. Сравнение показывает, что система с запаздыванием имеет достаточно хорошие показатели качества переходного процесса.

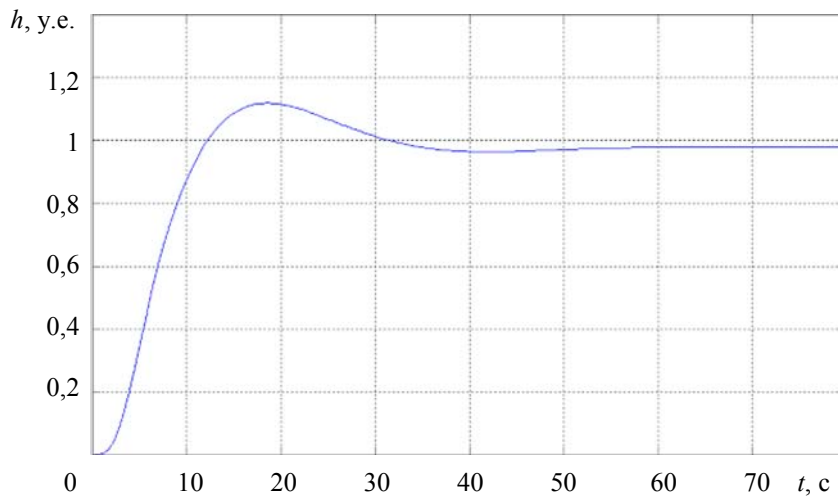


Рис. 3

**Заключение.** В работе предложена методика синтеза  $H^2$ -оптимальных систем с запаздыванием, позволяющая получить решение, которое обладает значительной грубостью к параметрической неопределенности модели объекта, в том числе и к величине запаздывания. В основе методики лежит идея декомпозиции задачи управления на подзадачи управления объектом чистого запаздывания и управления с учетом инерционности объекта. Обе задачи решаются в классе оптимальных по квадратичному критерию систем. Грубость системы достигается за счет искусственного разделения движений объекта так, что управление осуществляет их взаимную компенсацию, что позволяет сделать грубым полученное  $H^2$ -оптимальное решение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янушевский Р. Т. О грубости решения задачи аналитического конструирования регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1960. № 3. С. 18—25.
2. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению // Автоматика и телемеханика. 2005. № 5. С. 7—46.
3. Бахилина И. М., Степанов С. А. Синтез грубых линейных квадратичных гауссовских регуляторов // Там же. 1998. № 7. С. 96—106.
4. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
5. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. М.: Изд-во МЭИ, 2004. 400 с.
6. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. Springer-Verlag, 1999. 327 p.
7. Бобцов А. А., Колюбин С. А., Пыркин А. А. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11. С. 136—148.
8. Бороздин П. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л. Робастное управление линейным инерционным объектом // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 4. С. 41—49.
9. Ремизова О. А., Рудакова И. В., Фокин А. Л. Синтез робастной системы стабилизации на основе квадратичной теории // Изв. СПбГТИ(ТУ). 2009. № 6. С. 71—75.
10. Климов А. П., Ремизова О. А., Рудакова И. В., Фокин А. Л. Уменьшение чувствительности  $H^2$ -оптимальной системы к влиянию неопределенности модели объекта // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2010. № 3. С. 27—32.
11. Климов А. П., Ремизова О. А., Рудакова И. В., Фокин А. Л. Достижение робастности системы стабилизации, синтезированной на основе квадратичной теории // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 18—26.

**Сведения об авторах**

- Ольга Александровна Ремизова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра автоматизации процессов химической промышленности;  
E-mail: remizova-oa@yandex.ru
- Ирина Викторовна Рудакова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра автоматизации процессов химической промышленности;  
E-mail: rudakowa@ws01.sapr.pu.ru
- Владислав Викторович Сыроквашин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра автоматизации процессов химической промышленности
- Александр Леонидович Фокин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра автоматизации процессов химической промышленности;  
E-mail: fokin\_sa@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
автоматизации процессов  
химической промышленности

Поступила в редакцию  
15.02.11 г.

С. А. КАБАНОВ, Е. Н. НИКУЛИН, Б. Э. ЯКУШЕВ, Д. Б. ЯКУШЕВА

## УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ГРУЗА МОСТОВЫМ КРАНОМ ПО МЕТОДУ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

Рассматривается задача управления перемещением груза мостовым краном с использованием метода обратных задач динамики. Представлены результаты численного моделирования.

*Ключевые слова:* мостовой кран, метод обратных задач динамики.

Точное ручное позиционирование груза при перемещении мостовым краном затруднено вследствие его раскачивания как в процессе перемещения, так и при остановке. В связи с этим возникает проблема автоматизации управления тележкой мостового крана с целью перевода захвата с грузом в заданное положение. В работах [1, 2] исследована возможность реализации оптимальной динамики перемещения груза. Разработку алгоритмов оптимального управления осложняет требование обеспечения сходимости итерационных процедур решения соответствующих краевых задач.

При допущениях о постоянстве длины троса подвески груза во время движения, малости угловых отклонений подвеса от вертикали, неизменности массы груза уравнения Лагранжа 2-го рода для рассматриваемой системы приобретают вид [1]:

$$(M + m)\ddot{s} - ml\ddot{\theta} = F,$$

$$-\ddot{s} + l\ddot{\theta} = -g\theta,$$

где  $M, m$  — масса тележки и груза;  $s$  — горизонтальная координата крана;  $\theta$  — угловое отклонение подвеса;  $l = \text{const}$  — длина подвеса;  $F$  — сила, управляющая положением тележки крана.

Приняв в качестве переменных вектора состояния  $x_1$  (текущий угол отклонения подвеса груза от вертикали),  $x_2 = dx_1/dt$ ,  $x_3 = s/l$ ,  $x_4 = dx_3/dt$  при горизонтальных координатах, определяющих текущее и конечное положение груза соответственно  $s$  и  $s_f$ , получаем систему уравнений модели объекта в виде [2]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = [x_i]$ ,  $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_i]$ ,  $\mathbf{A} = [a_{ij}]$  — матрица (4×4). Элементы матрицы  $\mathbf{A}$ , кроме  $a_{12} = 1$ ,  $a_{21} = -a$ ,  $a_{34} = 1$ ,  $a_{41} = -c$ , равны нулю;  $\mathbf{B}^T = [0 \ b/u_{\max} \ 0 \ b/u_{\max}]$ ,  $a = bg/l$ ,  $b = (m + M)/M$ ,  $c = mg/(lM)$ ,  $g$  — ускорение свободного падения,  $u = u_{\max}F/[l(m + M)]$  — безразмерное управление,  $i = \overline{1, 4}$ ;  $j = \overline{1, 4}$ .

Требуется обеспечить перевод системы из начального состояния  $\mathbf{x}^T(t_0) = [0000]$  в конечное  $\mathbf{x}^T(t_f) = [00s_f 0]$  при ограничении на управление  $|u_{\max}| \leq 0,75$ .

В настоящей статье представлен вариант решения задачи управления мостовым краном с помощью алгоритма на основе обратных задач динамики [3].

В тех случаях, когда требуется обеспечить точный приход системы в заданную точку фазового пространства, один из вариантов решения проблемы — сформулировать ее как обратную задачу динамики. Тогда можно синтезировать алгоритм терминального управления в замкнутой форме методом прямого интегрирования дифференциальных уравнений движения [4].

В рамках такого подхода целесообразно рассмотреть соответствующую модели (1) систему из двух уравнений Лагранжа 2-го рода, первое из которых, записанное относительно угла отклонения подвеса груза от вертикали, является независимым и приводится к виду

$$\ddot{x}_1 + \alpha x_1 = u.$$

Можно предположить, что фазовая траектория  $x(t)$ , на которой целевой функционал принимает минимальное значение, является непрерывной функцией независимой переменной. Согласно теореме К. Вейерштрасса о приближении, любая непрерывная функция может быть аппроксимирована полиномом с любой заданной точностью. Тогда она может быть сколь угодно точно аппроксимирована полиномом

$$x_k = \sum_{i=0}^{k-1} C_i t^i$$

так, что норма разности  $x - x_k$  будет меньше любого заданного малого числа  $\varepsilon$  при всех  $t \in x[0, t_f]$ . При этом заданная точность аппроксимации  $\varepsilon$  однозначно определяет минимальное число членов  $k$  аппроксимирующего полинома. Если решается задача оптимизации, о точности приближения к экстремали можно, например, судить по скорости изменения функционала, которая вблизи экстремума стремится к нулю.

Минимальное время прихода в заданную фазовую точку  $x^T(t_f) = [0 \ 0 \ s_f \ 0]$  при поставленных условиях было получено при решении задачи максимального быстродействия [2]. Таким образом, возможно получить „оптимальное“ решение задачи уже за одно приближение, если воспользоваться значением времени  $t_f$  из решения задачи по принципу максимума. В этом случае начальное приближение  $x_0$  оптимальной фазовой траектории  $x$  разыскивается в виде полинома с минимально возможным числом членов, обеспечивающим лишь решение краевой задачи.

Согласно работам [3, 4], выходная функция задается в виде

$$x_1(t) = \sum_0^5 C_i (t - t_0)^i.$$

Использование начальных условий дает значения произвольных постоянных  $C_0 = 0, C_1 = 0$ .

Значение горизонтальной координаты тележки (и соответственно точки прихода груза)  $x_3$  определяется последовательным интегрированием соответствующих уравнений из (1) при переменном верхнем пределе

$$x_4(t) = \int_{t_0}^t (-cx_1 + u) d\tau \text{ и } x_3(t) = \int_{t_0}^t x_4 d\tau.$$

В результате получается (при  $\Delta t = t - t_0$ )

$$x_3 = C_1 \Delta t + C_2 \Delta t^2 + C_3 \Delta t^3 + C_4 \Delta t^4 + C_5 \Delta t^5 + (a - c) \left[ \frac{C_2 \Delta t^4}{12} + \frac{C_3 \Delta t^5}{20} + \frac{C_4 \Delta t^6}{30} + \frac{C_5 \Delta t^7}{42} \right].$$

Использование граничных условий на правом конце интервала (в точке прихода) позволяет вычислить коэффициенты  $C_i$  ( $i = \overline{1,5}$ ) по формулам

$$C_2 = \frac{420}{(\alpha - c) \overline{\Delta t}^4} s_f, \quad C_3 = -\frac{1680}{(\alpha - c) \overline{\Delta t}^5} s_f, \quad C_4 = \frac{2100}{(\alpha - c) \Delta t^6} s_f, \quad C_5 = -\frac{840}{(\alpha - c) \overline{\Delta t}^7} s_f,$$

где  $\overline{\Delta t} = t_f - t_0$ .

Значение управления вычисляется согласно соотношению [4]:

$$u = C_2 (2 + \alpha \Delta^2) + C_3 (6 \Delta t + \alpha \Delta t^3) + C_4 (12 \Delta t^2 + \alpha \Delta t^4) + C_5 (20 \Delta t^3 + \alpha \Delta t^5). \quad (2)$$

На рис. 1 приведен результат вычислений по приведенному выше алгоритму при интервале времени управления  $t_{\min} = 3,52$  с, равном интервалу оптимизации в задаче максимального быстродействия [2]. Можно отметить высокую точность выполнения краевых условий в точке прихода. Обращает на себя внимание сглаженно-ступенчатая форма полученной функции управления. При

этом качественный характер динамики вектора состояния согласуется с его оптимальной динамикой [2]. Однако при условии быстрогодействия системы управление, получаемое в рамках такого подхода, обладает существенным недостатком: оно не удовлетворяет ограничению  $|u_{\max}| \leq 0,75$ :  $u_{\max} = 2,732$ , а  $u_{\min} = -2,827$ . Это обстоятельство при ограничении затрат на управление объекта или по иным причинам может затруднить и даже исключить применение выработанного закона управления. С другой стороны, очевидно, что гладкие функции управления облегчают их практическую реализацию. Рассчитано, что при увеличении времени прихода в заданную точку фазового состояния наблюдается уменьшение предельных значений управляющего воздействия: приемлемая величина предельных отклонений управления достигается при  $t_f = 4,91$  с. В этом случае имеем  $u_{\max} = 0,731$  и  $u_{\min} = -0,749$ , т.е. выполняется условие  $|u_{\max}| \leq 0,75$ .

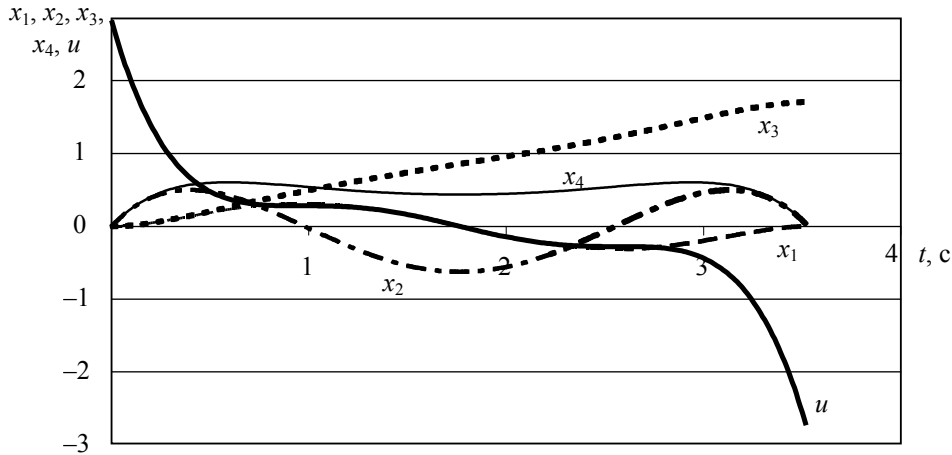


Рис. 1

На рис. 2 приведены графики изменения фазовых переменных и управления для случая  $t_f = 4,91$  с. Видно, что в процессе движения отклонения всех контролируемых параметров от значений, соответствующих равносному положению в исходной и конечной точках, уменьшились до 50 % от их значений, зафиксированных при движении в режиме максимального быстрогодействия [2]. Следовательно, постановка задачи об определении управления, исключая оптимизацию в режиме максимального быстрогодействия, как обратной задачи динамики позволяет обеспечить приход системы в заданное положение более плавно с минимальными перегрузками.

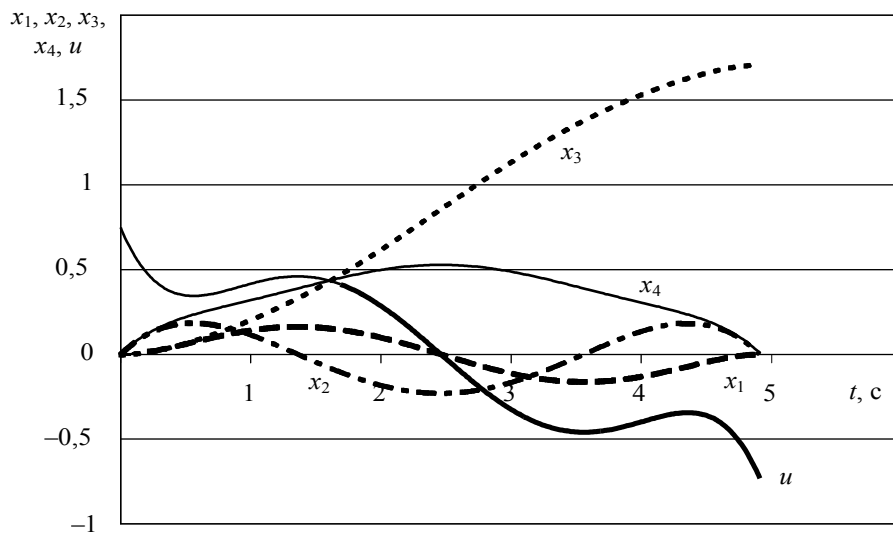


Рис. 2

Таким образом, в работе приведено решение задачи перемещения груза мостовым краном по методу обратных задач динамики. Показано, что разработанный алгоритм позволяет обеспечить приход системы в заданное положение с минимальными перегрузками.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Troch I. Parametrisierung – Ein Werkzeug zur Berechnung optimaler Steuerungen // Automatisierungstechnik. AT. 1990. Bd 38, N 6. S. 230—236.
2. Кабанов С. А., Никулин Е. Н., Якушев Б. Э., Якушева Д. Б. Оптимальное перемещение груза мостовым краном // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 5. С. 56—65.
3. Батенко А. П. Оптимизация терминальных управлений методом постепенного улучшения // Техническая кибернетика. 1980. № 5. С. 185—192.
4. Кабанов С. А., Якушев Б. Э. Использование неклассического критерия оптимальности в задаче управления работой подъемно-транспортного оборудования // Докл. 55-й конф. проф., преп., науч. раб., инж. и асп. СПбГАСУ. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 1998. Ч. I. С. 63—65.

**Сведения об авторах**

- Сергей Александрович Кабанов** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем обработки информации и управления, Санкт-Петербург; E-mail: kaba-sa@mail.ru
- Евгений Николаевич Никулин** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра средств поражения и боеприпасов, Санкт-Петербург; E-mail: enikulin@onixmail.ru
- Борис Эдуардович Якушев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра теоретической механики; E-mail: yakushev.spb@mail.ru
- Дарья Борисовна Якушева** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра информационных систем; E-mail: dariayakusheva@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
систем обработки информации и управления

Поступила в редакцию  
25.11.10 г.

К. К. СЕМЕНОВ

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ, ВЫРАЖЕННЫХ ПРОГРАММНЫМ КОДОМ

Алгебра дуальных чисел рассматривается как инструмент автоматического дифференцирования функций, выраженных программным кодом. Проанализированы специфические свойства дуальных чисел, необходимые для данного применения.

*Ключевые слова:* автоматическое дифференцирование, дуальные числа.

**Введение.** В практике программирования часто возникают задачи, когда необходимо помимо вычисления значений некоторой функции  $f(x)$  вычислять значения ее производной  $\frac{df(x)}{dx}$ . В частности, в современной метрологии существует задача автоматической оценки интервала значений погрешности результатов вычислений  $y = f(x)$  с помощью программ обработки, исходные данные  $x$  для которых являются результатами прямых измерений. Классическим способом учета трансформированной погрешности является оценка на основе производной  $f'(x)$ . Специфика задачи состоит в том, что функция  $f(x)$  реализуется в виде программы вычислений и соответственно задана своим исходным кодом.

Традиционные способы оценки производной  $f'(x)$  на практике сопряжены с трудностями и имеют существенные недостатки. Реализация вычислений  $f'(x)$  в виде отдельной программной процедуры является избыточным решением и требует предварительного анализа функции  $f(x)$ . Использование метода конечных разностей требует обоснованного выбора значения приращения аргумента  $x$ , поскольку задача численного дифференцирования является некорректной и ее необходимо решать методом регуляризации [1].

Известен способ автоматического вычисления вместе с функцией  $f(x_0)$  при некотором значении ее аргумента  $x = x_0$  значения производной этой функции  $f'(x_0)$  в той же точке [2]. Данный метод основан на алгебре дуальных чисел [3] и носит название „автоматическое дифференцирование“, подчеркивающее одновременность вычислений значений  $f(x_0)$  и  $f'(x_0)$  на основе только лишь исходного кода функции  $f(x)$ . К сожалению, ощущается нехватка отечественной литературы, посвященной данному методу. Настоящая статья призвана частично восполнить данный недостаток.

**Дуальные числа.** Рассмотрим множество чисел  $\mathbf{z}$ , таких, что  $\mathbf{z} = x + \varepsilon\Delta$ , где  $x \in R$ ,  $\Delta \in R$ , а  $\varepsilon \neq 0$  — такая инфинитезимальная единица, что для нее выполняется точное равен-

ство  $\varepsilon^2 = 0$ . Возможны математические операции сложения и умножения  $\varepsilon$  с вещественными числами. Числа  $\mathbf{z}$  называют дуальными. Их составляющую  $x$  принято называть действительной частью  $\mathbf{z}$  и обозначать  $\text{Re } \mathbf{z}$ , а  $\Delta$  — инфинитезимальной частью  $\mathbf{z}$  и обозначать  $\text{Inf } \mathbf{z}$ .

Рассмотрим разложение в ряд Тейлора гладкой функции  $f(x)$  одного действительного аргумента:

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n.$$

Выполним его аналитическое продолжение на множество дуальных чисел: заменим в выражении разложения  $f(x)$  в ряд действительный аргумент  $x$  на дуальный  $\mathbf{z} = x + \varepsilon\Delta$ . Тогда значение функции

$$f(x + \varepsilon\Delta) = f(x_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0 + \varepsilon\Delta)^n,$$

согласно биному Ньютона, равно

$$f(x_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} \sum_{m=0}^n C_n^m (x - x_0)^{n-m} \varepsilon^m \Delta^m,$$

что с учетом свойства  $\varepsilon^2 = 0$  есть

$$f(x_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} \left( (x - x_0)^n + n\varepsilon\Delta(x - x_0)^{n-1} \right) = \left( f(x_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n \right) + \varepsilon\Delta \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(m-1)!} \frac{d^m f(x_0)}{dx^m} (x - x_0)^{m-1} = f(x) + \varepsilon\Delta \frac{df(x)}{dx}.$$

Получаем, что результат вычислений является дуальным числом, одна составляющая которого есть точное значение функции  $f(x)$ , а другая — точное значение производной этой же функции при том же значении аргумента  $x$ .

Таким образом, возможно использовать дуальные числа для автоматического вычисления значения производной  $f'(x)$  **точно** вплоть до ошибки округления. Для того чтобы воспользоваться этим приемом, на практике необходимо создать новый тип данных. Поскольку дуальные числа  $\mathbf{z} = x + \varepsilon\Delta$  суть пары вещественных чисел  $\begin{pmatrix} x \\ \Delta \end{pmatrix}$ , то можно на языке C++ ввести их следующим образом.

тип данных, описывающий дуальное число.	
struct dual {	
double real;	// действительная часть.
double inf;	// инфинитезимальная часть.
}	

Для того чтобы реализовать автоматическое дифференцирование функции  $f(x)$ , представленной своим исходным кодом, необходимо перейти в программе от вычислений с действительными данными (double) к вычислениям с дуальными числами (dual).

Вычисления, производимые в любой программе математической обработки, являются собой вычисления значений сложных функций, например, для вычисления значения  $y = f(g_1(g_2(\dots g_n(x)\dots), x), x)$  необходимо начать с вычисления значения  $y_n = g_n(x)$ , продолжить вычислениями  $y_{n-1} = g_{n-1}(y_n, x)$ ,  $y_{n-2} = g_{n-2}(y_{n-1}, x)$  и т.д. Как известно,

производная сложной функции  $y = f(g_1(g_2(\dots g_n(x)\dots), x), x)$  по аргументу  $x$  вычисляется по цепному правилу, т.е.

$$\frac{dg_i(y_{i+1}, x)}{dx} = \frac{\partial g_i(y_{i+1}, x)}{\partial y_{i+1}} \cdot \frac{dg_{i+1}(y_{i+2}, x)}{dx} + \frac{\partial g_i(y_{i+1}, x)}{\partial x}$$

для  $i = 1, 2, \dots, n$ . Следовательно, можно вычислять значение производной  $\frac{df(x)}{dx}$  в последовательности вычисления значения функции  $y = f(g_1(g_2(\dots g_n(x)\dots), x), x)$ , т.е. начиная с  $\frac{dg_n(x)}{dx}$ , продолжая вычислением

$$\frac{dg_{n-1}(y_n, x)}{dx} = \frac{\partial g_{n-1}(y_n, x)}{\partial y_n} \cdot \frac{dg_n(x)}{dx} + \frac{\partial g_{n-1}(y_n, x)}{\partial x}$$

и т.д. вплоть до

$$\frac{df(x_1)}{dx_1} = \frac{\partial g_1(y_2, x)}{\partial y_2} \cdot \frac{dg_2(x)}{dx} + \frac{\partial g_1(y_2, x)}{\partial x}.$$

Таким образом, можно выполнить автоматическое дифференцирование одновременно с **вычислениями основной функции**.

На практике математические преобразования, реализуемые компьютерными программами, сводятся к тому, что все функции  $g_i$ , вообще говоря, являют собой последовательность элементарных арифметических действий из набора  $\{+, -, \times, / \}$  и элементарных функций — математических примитивов из стандартных библиотек. Можно констатировать, что приведенное рассуждение о вычислении производной сложной функции справедливо и для функции, реализованной программой. Таким образом, для работы с дуальными числами необходимо задать основные арифметические действия с ними и указать, как производить вычисления элементарных математических функций при дуальном аргументе.

С математической точки зрения эта задача равносильна определению алгебры дуальных чисел  $\Lambda = \langle R^2, +, \times \rangle$  как соответствующей структуры над множеством пар действительных чисел  $R^2$  с операциями сложения и умножения.

**Программно-ориентированное задание алгебры дуальных чисел.** Рассмотрим множество пар действительных чисел  $R^2$  и зададим для двух произвольных его элементов  $\mathbf{z}_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$  и  $\mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}$  арифметические операции следующим образом.

**Сложение** будем выполнять по правилу

$$\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 + x_2 \\ y_1 + y_2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Операция обладает свойствами коммутативности и ассоциативности. Действительно, выполнены соответствующие соотношения  $\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 = \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_1$  и  $(\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2) + \mathbf{z}_3 = \mathbf{z}_1 + (\mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_3)$ .

Существует нейтральный элемент операции сложения  $\emptyset = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ , справедливо равенство

$$\mathbf{z} + \emptyset = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathbf{z}.$$

**Вычитание** — обратная сложению операция. При выводе правил для компонентов ее результата требуется решить уравнение  $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix}$  относительно  $\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix}$ . Получаем

систему уравнений  $\begin{cases} x_1 = x_2 + x_3 \\ y_1 = y_2 + y_3 \end{cases}$ , ее решением является  $\begin{cases} x_3 = x_1 - x_2 \\ y_3 = y_1 - y_2 \end{cases}$ . Следовательно,

$$\mathbf{z}_1 - \mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

**Умножение:** введем операцию умножения как

$$\mathbf{z}_1 \times \mathbf{z}_2 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \cdot x_2 \\ y_1 \cdot x_2 + y_2 \cdot x_1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Операция умножения также коммутативна и ассоциативна, поскольку  $\mathbf{z}_1 \times \mathbf{z}_2 = \mathbf{z}_2 \times \mathbf{z}_1$  и  $(\mathbf{z}_1 \times \mathbf{z}_2) \times \mathbf{z}_3 = \mathbf{z}_1 \times (\mathbf{z}_2 \times \mathbf{z}_3)$ . Для нее существует нейтральный элемент  $\mathbf{1} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ . Действительно,

$$\mathbf{z} \times \mathbf{1} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \cdot 1 \\ y \cdot 1 + 0 \cdot x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \mathbf{z}.$$

**Деление** — обратная умножению операция. При выводе правил для компонентов ее результата требуется решить уравнение  $\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix}$  относительно  $\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix}$ . Получаем систему уравнений

$$\begin{cases} x_1 = x_2 x_3 \\ y_1 = y_2 x_3 + y_3 x_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_3 = \frac{x_1}{x_2} \\ y_3 x_2 = y_1 - y_2 \frac{x_1}{x_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_3 = \frac{x_1}{x_2} \\ y_3 = \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2^2} \end{cases}.$$

В качестве вывода получаем, что при  $x_2 \neq 0$

$$\frac{\mathbf{z}_1}{\mathbf{z}_2} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_1}{x_2} \\ \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2^2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Имеет место также **дистрибутивный закон**:  $\mathbf{z}_1 \times (\mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_3) = \mathbf{z}_1 \times \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_1 \times \mathbf{z}_3$ .

Для таким образом введенной алгебры  $\Lambda = \langle R^2, +, \times \rangle$  дуальных чисел справедливо следующее свойство:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ y_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

т.е. для квадрата чисто инфинитезимального числа  $\mathbf{z}$  всегда имеет место свойство  $\mathbf{z}^2 = 0$ . Таким образом, из свойств арифметических операций (1)–(4) для инфинитезимальной единицы  $\varepsilon$  вытекает ее свойство  $\varepsilon^2 = 0$ .

В силу того что справедливы соотношения

$$\operatorname{Re}(\mathbf{z}_1 \pm \mathbf{z}_2) = \operatorname{Re}(\mathbf{z}_1) \pm \operatorname{Re}(\mathbf{z}_2),$$

$$\operatorname{Re}(\mathbf{z}_1 \times \mathbf{z}_2) = \operatorname{Re}(\mathbf{z}_1)\operatorname{Re}(\mathbf{z}_2),$$

$$\operatorname{Re}(\mathbf{z}_1 / \mathbf{z}_2) = \operatorname{Re}(\mathbf{z}_1) / \operatorname{Re}(\mathbf{z}_2),$$

алгебра  $\Lambda$  описывает такое расширение множества действительных чисел на двумерную плоскость, которое включает в себя поле действительных чисел как составную часть. Действия с инфинитезимальными составляющими дуальных чисел не влияют на значения их действительных составляющих.

Результат вычисления элементарной функции  $g(\mathbf{z})$  от дуального аргумента  $\mathbf{z} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  равен

$$g(\mathbf{z}) = \begin{pmatrix} g(x) \\ yg'(x) \end{pmatrix},$$

что следует из рассмотренного выше аналитического продолжение ряда Тейлора для функции  $g(x)$ . Указанное свойство задает правило вычисления элементарных функций от дуального аргумента, которое необходимо использовать для перегрузки математических примитивов.

процедура для вычислений значения тригонометрического синуса	процедура для вычислений значения гиперболического синуса
<pre>dual sin (dual x) {   dual z;   z.real = sin(x.real);   z.inf = x.inf * cos(x.real);   return (z); }</pre>	<pre>dual sinh (dual x) {   dual z;   z.real = sinh(x.real);   z.inf = x.inf * cosh(x.real);   return (z); }</pre>

Рассмотрим пример. Пусть требуется вычислить значение функции  $f(x) = \sin(x)\exp(-x^2) + x$  в точке  $x_0$ . В соответствии с представленными выше правилами произведем последовательно вычисления, заменив действительный аргумент  $x = x_0$  дуальным  $\mathbf{z}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

$$\begin{aligned} f(\mathbf{z}_0) &= \sin \left[ \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \times \exp \left[ - \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(x_0) \\ 1 \cdot \cos(x_0) \end{pmatrix} \times \exp \left[ \begin{pmatrix} -x_0^2 \\ -2x_0 \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \sin(x_0) \\ \cos(x_0) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \exp(-x_0^2) \\ -2x_0 \exp(-x_0^2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(x_0) \exp(-x_0^2) \\ -2x_0 \sin(x_0) \exp(-x_0^2) + \cos(x_0) \exp(-x_0^2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \sin(x_0) \exp(-x_0^2) + x_0 \\ -2x_0 \sin(x_0) \exp(-x_0^2) + \cos(x_0) \exp(-x_0^2) + 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Действительно,  $f'(x) = -2x \exp(-x^2) \sin(x) + \cos(x) \exp(-x^2) + 1$ , что в точности совпадает с результатом вычислений при помощи дуальных чисел.

Если, например,  $x_0 = 0$ , то получим  $z_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  и

$$\sin z_0 = \sin \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sin 0 \\ 1 \cdot \cos 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$\exp(-z_0^2) = \exp \left[ -\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] = \exp \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \exp 0 \\ 0 \cdot \exp 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Следовательно,

$$f'(z_0) = \sin z_0 \times \exp(-z_0^2) + z_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \end{pmatrix},$$

откуда получаем, что  $f(0) = 0$  и  $f'(0) = 2$ .

Рассмотренный метод давно и с успехом применяется в самых различных приложениях. Представленное выше описание соответствует так называемому прямому ходу (*forward mode*) автоматического дифференцирования, когда значение производной вычисляется параллельно вычислению значения функции при движении от начала алгоритма к его концу. Метод легко обобщается на случай одновременного вычисления всех частных производных одновременно с вычислением значения функции.

Из всего сказанного следует, что метод автоматического дифференцирования характеризуется следующими свойствами:

— автоматическое дифференцирование функций, выраженных программным кодом, носит аналитический характер и позволяет получить точное (вплоть до ошибок округления) значение производной;

— использование подхода не влияет на сходимость задействованных в выполняемой программе итерационных методов и не искажает конечного результата вычислений;

— автоматическое дифференцирование позволяет выполнить программу вычислений лишь единожды в отличие от приближенных методик численного дифференцирования на основе конечных разностей;

— использование автоматического дифференцирования позволяет не изменять порядок вычислений в программах.

**Заключение.** Метод автоматического дифференцирования функций, выраженных программным кодом, обладает рядом полезных для метрологической практики свойств, что обуславливает возможность его применения в метрологических целях [4, 5]. В частности, с помощью метода можно автоматически получать оценки характеристик трансформированной погрешности результатов вычислений, выполняемых в измерительных системах с цифровой обработкой сигналов [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
2. Corliss G., Faure C., Griewank A., Hascoet L., Naumann U. Automatic Differentiation Bibliography // Automatic Differentiation of Algorithms: From Simulation to Optimization. Springer, 2002. P. 383—425.
3. Яглом И. М. Комплексные числа и их применение в геометрии. М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1963.
4. Hall B. D. Calculating measurements uncertainty using automatic differentiation // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13, N 4. P. 421—427.

5. *Luca Mari*. A computational system for uncertainty propagation of measurement results // *Measurement*. 2009. Vol. 42, is. 6. P. 844—855.
6. *Семенов К. К., Солопченко Г. Н.* Теоретические предпосылки реализации метрологического автосопровождения программ обработки результатов измерений // *Измерительная техника*. 2010. № 6. С. 9—14.

#### *Сведения об авторе*

**Константин Константинович Семенов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, кафедра измерительных информационных технологий; E-mail: [semenov.k.k@gmail.com](mailto:semenov.k.k@gmail.com)

Рекомендована кафедрой  
измерительных информационных  
технологий

Поступила в редакцию  
23.06.11 г.

УДК 004.045

К. Г. КОРОТКОВ, Д. В. ОРЛОВ, Е. Н. ВЕЛИЧКО

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Приведены результаты применения компьютерной программно-аппаратной системы для оценки свойств жидкостей, основанной на измерении и компьютерной обработке стимулированной электромагнитным полем электрофотонной эмиссии с поверхности жидкости, на базе хорошо известного метода газоразрядной визуализации.

**Ключевые слова:** структура воды, газоразрядная визуализация, анализ крови.

**Введение.** В последние годы большое внимание уделяется изучению структурных свойств воды и возможности надления воды информацией. Имеется достаточно много противоречивой информации о „памяти воды“ [1]. Согласно одной из квантово-механических моделей, наблюдаемые экспериментально явления обусловлены процессами формирования кластеров и клатратов преимущественно на атомах примесей [2]. Для введения этих понятий в контекст современного научного мышления прежде всего необходим набор доказательных и воспроизводимых экспериментальных фактов. Вода — сложный объект исследований, ее свойства зависят от большого числа факторов, поэтому необходимо параллельно использовать несколько независимых методик, а также требуется разрабатывать новые информативные методы исследования свойств воды.

Экспериментальные данные, полученные группой ученых под руководством А. Нильсона, ведущего специалиста Стенфордского центра синхротронного излучения (Stanford Synchrotron Radiation Lightsource), позволили сделать важный шаг в направлении разгадки 66 уникальных свойств воды благодаря новейшим методам изучения строения жидкостей с использованием мощного рентгеновского излучения, получаемого с помощью больших ускорителей элементарных частиц — синхротронов.

Ученые выяснили, что молекулы воды одновременно формируют не один, а два типа структур, сосуществующих вне зависимости от температуры. Один тип представляет собой формирования примерно по 100 молекул и напоминает структуру льда. Структура второго типа жидкости гораздо менее упорядочена. Увеличение температуры вплоть до точки кипения воды приводит к некоторому искажению структуры молекулярных формирований, уменьшению их количества и доминированию разупорядоченной структуры [3].



Разработанная на кафедре ПКС СПбГУ ИТМО для исследования психофизиологического состояния человека компьютерная система газоразрядной визуализации (ГРВ) используется также и для исследования жидкостей. Информативность метода ГРВ для исследования жидкофазных объектов была продемонстрирована при изучении свечения микробиологических культур [4], сравнительном исследовании крови здоровых людей и онкологических больных [5], изучении реакции крови на аллергены [6], гомеопатических препаратов 30С потенции [7], сверхмалых концентраций различных солей [8, 9]. Представляют интерес работы по выявлению различий в свечении натуральных и синтетических эфирных масел, имеющих одинаковый химический состав [10].

**Технология.** Исследования ГРВ-параметров жидкостей проводятся с использованием прибора „ГРВ Камера“, серийно выпускаемого фирмой КТИ, Санкт-Петербург (<www.ktispb.ru>). Данный прибор достаточно широко применяется в различных областях: для экспресс-анализа состояния здоровья человека [11], при исследованиях уровня соревновательной готовности спортсменов [12], измененных состояний сознания [13, 14], влияния музыки на состояние человека [15], а также при исследовании геоактивных зон [16] и минералов [17].

Исследуемая по методу ГРВ жидкость помещается в модифицированный инсулиновый шприц, и мениск жидкости (1) (объем —  $\approx 5 \cdot 10^{-3}$  мл) располагается на расстоянии 2—3 мм от электрода 2 (рис. 1). Температура поддерживается в диапазоне 22,5—23,5 °С, а относительная влажность — 42—44 %. На прозрачное токопроводящее покрытие, нанесенное на обратную сторону кварцевого электрода, генератором 3 подаются импульсы напряжения длительностью 10 мкс, амплитудой 3 кВ с частотой  $10^3$  Гц. При высокой напряженности поля с поверхности жидкости происходит эмиссия электронов и фотонов (в видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра), что приводит к развитию лавинного и/или скользящего газового разряда, параметры которого определяются свойствами жидкости и газовой среды. Свечение разряда с помощью оптической системы 4 и ПЗС-матрицы преобразуется в видеосигналы, которые после обработки записываются в виде одиночных кадров (BMP-файлов) или в виде динамических изображений (AVI-файлов).

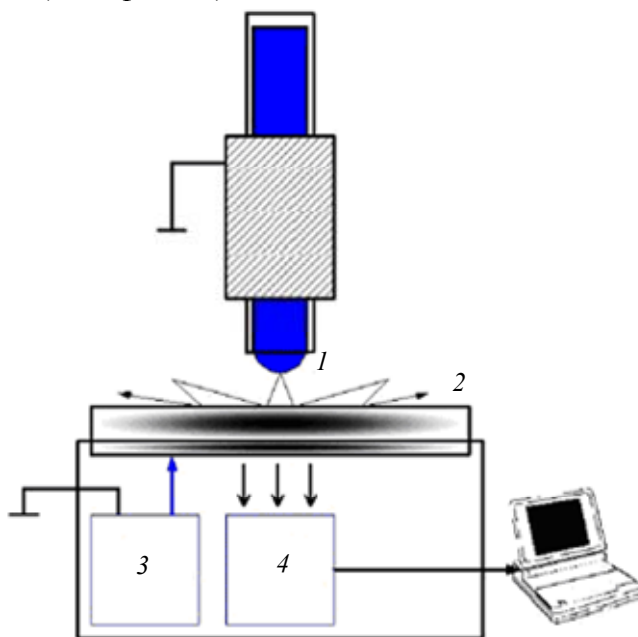


Рис. 1

При компьютерной обработке AVI-файл разбивается на серию BMP-файлов, которые затем обрабатываются с помощью специализированного программного обеспечения, и рассчитываются параметры ГРВ-изображений: площадь (число пикселей), средняя интенсивность

(измеряется в относительных единицах от нуля — для абсолютно черного и до 255 — для абсолютно белого), коэффициент формы,  $L^2/S$ , где  $L$  — длина наружного контура,  $S$  — площадь ГРВ-изображения. Примеры свечения различных жидкостей приведены на рис. 2 (1 — дистиллированная; 2 — водопроводная; 3 — структурированная вода).

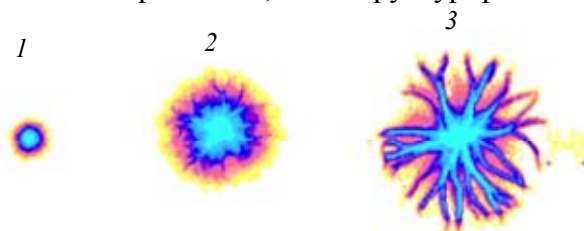


Рис. 2

Данный метод очень чувствителен к состоянию воды и жидкостей. Вследствие разряда происходит постепенное испарение жидкости и диспергирование микрокапель по поверхности прозрачного электрода, что приводит к изменению объема капли, поэтому максимальное время непрерывной съемки одной капли — 32 с. При частоте записи 5 кадров в секунду, за 32 с можно получить 160 BMP-файлов, этого достаточно для проведения статистической обработки полученных данных.

**Результаты.** Исследования воды необходимо проводить в строго контролируемых условиях, так как вода изменяет свои свойства в процессе взаимодействия с воздухом и светом [18]. В качестве примера приведем динамику изменения площади свечения капли двух образцов воды сразу после открытия герметично закрытой бутылки и 4 ч спустя. Бутылки с питьевой водой были открыты одновременно и находились при одинаковых условиях (23 °С, 46 % относительной влажности).

Как видно из рис. 3, сразу после разгерметизации бутылки свечение воды отличается большой вариабельностью, и происходит существенный рост параметра с двумя выраженными фазами: первые 30—40 секунд и далее — до двух минут; через две минуты результаты стабилизируются (1, 2). Для образцов воды, простоявших 4 часа, наблюдается подъем в первые 40 с, однако далее параметры стабильны (3, 4). Такое же поведение характерно для дистиллированной воды с раствором соли (5), однако амплитуда свечения в этом случае существенно меньше.

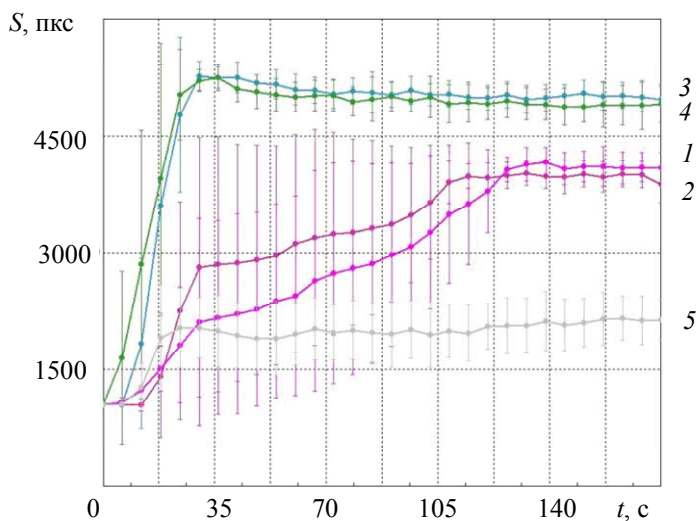


Рис. 3

Монотонное увеличение площади в первые секунды происходит благодаря накоплению на поверхности прозрачного электрода положительного электрического заряда в месте прохождения газового разряда. Как было показано посредством компьютерного моделирования [19], электрическое поле, формируемое положительными ионами, приводит к снижению при-

кладываемого электромагнитного поля, что приводит к уменьшению длины стримеров газового разряда при каждом последующем импульсе. Спустя некоторое время, когда устанавливается динамическое равновесие между скоростью образования положительных зарядов, их нейтрализации и растекания по поверхности, длина стримеров становится квазипостоянной.

Чувствительность метода ГРВ позволяет изучать реакцию воды на различные воздействия. Например, можно зафиксировать статистически значимые различия в площади свечения при сравнении исходной воды и воды, подвергшейся воздействию переменного магнитного поля или акустических волн. В качестве примера можно привести исследование влияния на воду эффектов формы, в частности, религиозных сооружений. Во время экспедиций на Русский Север, в Мексику, Перу, Венесуэлу авторы провели серию экспериментов, в ходе которых образцы воды помещались на территории исследуемого объекта на несколько часов, после чего во многих случаях было обнаружено статистически значимое различие параметров ГРВ-изображений исследуемых образцов по сравнению с контрольными.

Во время подобных экспериментов было установлено, что результат сильно зависит от времени нахождения воды в зоне воздействия объекта. В 2009 г. был проведен длительный эксперимент. Два литра фильтрованной водопроводной воды отстаивались в стеклянном сосуде в течение нескольких часов, после чего воду перелили в два стерильных стеклянных сосуда таким образом, чтобы в них не оставалось воздуха, оба сосуда были герметично закупорены. Один был помещен под непрозрачную пирамиду, сориентированную по сторонам света, второй — поставлен на расстоянии 0,5 м от пирамиды и накрыт светонепроницаемой тканью. По прошествии трех месяцев сосуды были откупорены. Каждая серия, состоявшая из восьми образцов, снималась в динамическом режиме на протяжении 25 с с частотой записи 5 кадров в секунду. Пример обработки результатов приведен в таблице, здесь  $T$  — параметр Манна—Уитни, представляющий собой сумму рангов [18].

**Результаты обработки данных статистическим методом Манна—Уитни**

Образец			
помещенный в пирамиду		контрольный	
$S$ , пкс	Ранг	$S$ , пкс	Ранг
1460	8	1533	10,5
1157	3	1533	10,5
1259	4	1545	12
1404	7	1518	9
1141	2	1578	14
1119	1	1546	13
1309	5	1641	16
1340	6	1639	15
$T = 36$		$T = 100$	

Из приведенных расчетов видно, что в соответствии с методом Манна—Уитни с вероятностью 99 % исследуемые выборки имеют статистически значимые различия. Также с вероятностью 99 % имеют значимые различия выборки СКО площади ГРВ-грамм, а выборки средней интенсивности имеют различия с вероятностью 95 %. Естественно, полученные данные являются предварительными и требуют дальнейших исследований.

Разработанные технологии применялись и при исследовании крови, в нескольких независимых экспериментах были получены интересные результаты.

В работе [5] исследовались образцы плазмы крови, взятые у онкологических больных, условно здоровых людей и испытуемых с доброкачественными опухолями. На пластиковые пластинки помещалось 200 мкл раствора плазмы крови в дистиллированной воде (milli-Q Reagent Water System). Образцы были исследованы как непосредственно после забора

материала, так и после заморозки и разморозки. Двукратное разведение было проведено 10 раз, что позволило получить серию образцов с концентрацией белков от 75 до 15 мг/мл. В ряде случаев разведения [6, 7] продолжались до достижения концентрации 0,15 мг/мл.

Было обнаружено, что параметры ГРВ-изображений плазмы крови здоровых людей значительно отличаются от параметров онкологических пациентов, для всех исследованных образцов параметры были существенно выше у онкологических больных. У людей с доброкачественными опухолями значения находились в середине интервала между показателями указанных групп. Разница в значениях параметров сохранялась при разведениях. Эти различия сохранились даже после последовательной заморозки и разморозки образцов. Полученные результаты статистически значимы и воспроизводимы. Примечательно, что разница между значениями увеличивалась после разведения и сукуссии по сравнению с исходной плазмой.

Как отмечают авторы, обнаруженные в газоразрядном свечении различия нормальной и патологической плазмы крови не могут быть объяснены изменениями биохимии крови (гиперкоагуляция и низкое значение рН) вследствие онкологических заболеваний. Различия между образцами оставались заметными до степени разведения 1/1024 исходной плазмы. Понять описанные эффекты практически невозможно без принятия во внимание надмолекулярных образований в водных средах организма, аналогичных кластерным системам, отмеченным выше.

Оригинальный подход к неинвазивной диагностике аллергии по образцам крови с применением метода ГРВ был разработан Свиридовым и др. [6]. Пример динамических кривых различных образцов крови (1 — исходный, 2 — с аллергеном) приведен на рис. 4. В итоге сравнительного исследования результатов, полученных с помощью ГРВ-графии и общепризнанных иммунологических методов, выявлена достаточно высокая частота совпадения результатов — в 81 % случаев. Представленные материалы позволяют заключить, что метод ГРВ дает возможность выявлять специфическую реакцию антител с комплементарным к ним антигеном — агглютинацию. В основе подхода лежит регистрация динамики показателей газоразрядного свечения во времени — от момента соединения (смешивания) специфических компонентов (антигена и антитела к нему) к моменту завершения их взаимодействия и образования так называемых иммунных комплексов. В результате такого взаимодействия происходит изменение восьми физико-химических характеристик исследованного материала и как следствие — ГРВ-грамм.

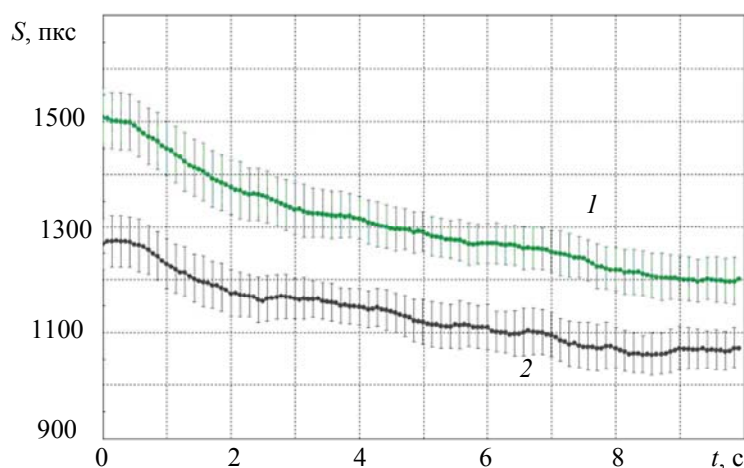


Рис. 4

**Заключение.** Полученные данные подтверждают, что компьютерная система анализа электрофотонной эмиссии методом ГРВ обладает высокой чувствительностью и селективностью при исследовании жидкофазных объектов, в частности, различных видов воды. Важным

результатом является обнаружение зависимости ГРВ-параметров от структурных характеристик жидкости. Параметры ГРВ-изображения определяются активностью эмиссии приповерхностного слоя жидкости, которая зависит от наличия поверхностно-активных валентностей. Это свойство определяется структурой приповерхностных кластеров, следовательно, ГРВ-метод является одним из информативных для исследования структурно-информационных свойств жидкостей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Johansson B.* Effects of Functional Water on Heart Rate, Heart Rate Variability, and Salivary Immunoglobulin A in Healthy Humans: A Pilot Study // *J. Altern. Complement. Med.* 2009. Vol. 15. P. 871—877.
2. *Del Giudice E., Vitiello G.* Role of the electromagnetic field in the formation of domains in the process of symmetry-breaking phase transition // *Phys. Rev. A.* 2006. Vol. 74. P. 1—9.
3. *Huanga C., Wikfeldtb K. T., Tokushimac T., Nilsson A.* The inhomogeneous structure of water at ambient conditions // *Proc. of the National Academy of Sci.* 2009. Vol. 106. P. 15 214—15 218.
4. *Гудакова Г. З., Галынкин В. А., Коротков К. Г.* Исследование фаз роста культур грибов рода CANDIDA методом газоразрядной визуализации (эффект Кирлиан) // *Микология и фитопатология.* 1990. Т. 24, № 2. С. 174—179.
5. *Коротков К. Г., Гурвиц Б. Я., Крылов Б. А.* Новый концептуальный подход к ранней диагностике рака // *Сознание и физ. реальность.* 1998. Т. 3, № 1. С. 51—58.
6. *Степанов А. В., Свиридов Л. П., Ахметели Г. Г.* и др. Метод этиологической диагностики аллергии путем анализа параметров стимулированного свечения крови // *Биотехносфера.* 2009. Т. 3, № 3. С. 44—47.
7. *Bell I., Lewis D. A., Brooks A. J.* et al. Gas Discharge Visualisation Evaluation of Ultramolecular Doses of Homeopathic Medicines Under Blinded, Controlled Conditions // *J. Altern. Complement. Med.* 2003. Vol. 9, N 1. P. 25—37.
8. *Korotkov K., Korotkin D.* Concentration dependence of gas discharge around drops of inorganic electrolytes // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89. P. 4732—4737.
9. *Коротков К. Г., Крыжановский Э. В., Короткина С. А.* и др. Исследование временных рядов характеристик газоразрядного свечения жидкофазных объектов // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2003. Т. 45, № 6. С. 18—24.
10. *Korotkov K., Krizhanovsky E., Borisova M.* et al. The Research of the Time Dynamics of the Gas Discharge Around Drops of Liquids // *J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 95, N 7. P. 3334—3338.
11. *Коротков К. Г.* Принципы анализа в ГРВ биоэлектрографии. СПб: Изд-во „Реноме“, 2007. 286 с.
12. *Коротков К. Г., Короткова А. К.* Инновационные технологии в спорте: исследование психофизиологического состояния спортсменов методом газоразрядной визуализации. М.: Изд-во „Сов. спорт“, 2008. 278 с.
13. *Bundzen P. V., Korotkov K. G., Unestahl L. E.* Altered States of Consciousness: Review of Experimental Data Obtained with a Multiple Techniques Approach // *J. Altern. Complement. Med.* 2002. Vol. 8. P. 153—167.
14. *Korotkov K., Bundzen P., Bronnikov V., Lognikova L.* Bioelectrographic Correlates of the Direct Vision Phenomenon // *J. Altern. Complement. Med.* 2005. Vol. 11. P. 885—893.
15. *Gibson S., Williams B.* The effect of music and focused meditation on the human energy field as measured by the gas discharge visualization (GDV) technique and profile of mood states // *Subtle Energies and Energy Medicine.* 2005. Vol. 16. P. 57—60.
16. *Hacker G. W., Pawlak E., Pauser G.* et al. Biomedical evidence of influence of geopathic zones on the human body: scientifically traceable effects and ways of harmonization // *Forsch Komplementärmed Klass Naturheilkd.* 2005. Bd 12. S. 315—327.
17. *Vainshelboim A. L., Hayes M. T., Momoh K. S.* Bioelectrographic Testing of Mineral Samples: A Comparison of Techniques // *J. Altern. Complement. Med.* 2005. Vol. 11. P. 299—304.
18. *Орлов Д. В.* Методика проведения измерений объектов природной среды на программно-аппаратном комплексе Газоразрядной Визуализации (ГРВ): Метод. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 47 с.

19. Баньковский Н. Г., Коротков К. Г., Петров Н. Н. Физические процессы формирования изображений при газоразрядной визуализации (эффект Кирлиан) // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, № 4. С. 625—642.

**Сведения об авторах**

- Константин Георгиевич Коротков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: [kk@korotkov.org](mailto:kk@korotkov.org)
- Дмитрий Владиславович Орлов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: [mityaorlov@gmail.com](mailto:mityaorlov@gmail.com)
- Елена Николаевна Величко** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем

Рекомендована кафедрой  
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию  
08.02.10 г.

К. ВАЙСЕНЗЕЕ, Г. А. ПОЛЬТЕ, Г. ЛИНС

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлен метод оценки погрешностей геометрических измерений с использованием цифровой обработки изображений, не требующий повторных измерений. Метод был апробирован при работе с промышленными объектами.

**Ключевые слова:** погрешности измерений, обработка изображений, функция распределения плотности вероятности, метод Монте-Карло.

**Введение.** Цифровое изображение объекта является основой всех измерений геометрических величин с использованием датчиков изображений. Для измерений геометрических размеров деталей в промышленности широко используются оптические системы обработки изображений. Такие системы характеризуются быстродействием, возможностью бесконтактного использования и быстрой перенастройки. Разработанный метод основывается на использовании информации о качестве изображения.

**Метод измерений с использованием цифровой обработки изображений.** Логическая последовательность действий [1] при измерениях длины с использованием систем обработки изображения на примере детали из кремния и хрома (падающий свет) продемонстрирована на рис. 1.

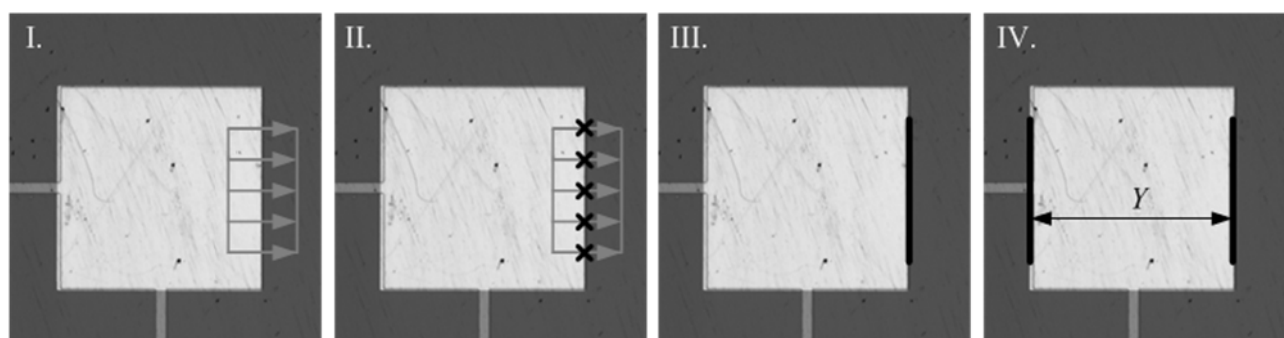


Рис. 1

I. Объект измерений с определенным числом линий поиска помещается в область обработки цифрового изображения.

II. В области изображения вдоль линий поиска определяется контур измеряемого объекта. Далее определяется точное положение границы объекта на переходе уровня яркости [2].

III. В выбранной системе координат на основе математических методов [3—5] рассчитываются геометрические параметры [6].

IV. Искомая величина, например расстояние между двумя прямыми линиями, рассчитывается с использованием геометрических методов.

Оптические камеры формируют двумерную область измерений [7], позволяя производить измерения между множеством точек без перемещения системы координат.

**Оценка погрешностей измерений.** Метод оценки погрешностей измерений с использованием стандарта GUM [1] на практике подходит не для всех случаев [8, 9]. В стандарте представлен метод расчета стандартной погрешности для модели, которая является линейной или может быть аппроксимирована с помощью ряда Тейлора первого порядка [10].

Альтернативой GUM [1] выступают методы, основанные на моделировании. В первом дополнении к стандарту GUM [11] представлен новый способ расчета на основе метода Монте-Карло, позволяющий использовать большое число различных распределений вероятностей для входных величин [12]. Алгоритм процесса виртуальных измерений является основой расчета погрешностей измерений [13]. Однако расчет производится не на базе экспериментальных данных, полученных при продолжительном производственном эксперименте, а с помощью многократно повторяющихся виртуальных экспериментов [14]. При этом используются псевдослучайные числа от нуля до единицы, чтобы генерировать возможные значения входных величин для различных функций распределения плотности вероятности. Последняя может быть согласована с моделью возмущения возможных значений входных величин, сгенерированной из уравнения Маркова [8].

Использование метода Монте-Карло помогает избежать комплексного анализа, который при сложной модели процесса измерений может быть трудоемким. Также одним из достоинств метода является достаточная простота реализации. Недостатком является большое количество вычислений во время моделирования [15].

Представленный в настоящей работе метод основан на анализе характеристики сигнала линии поиска. Для оценки характеристик положения границы определяются параметры изображения [16].

Возможным способом для вывода закономерностей соответствия является множественный регрессионный анализ. Такой анализ учитывает влияние множества величин на выходную величину.

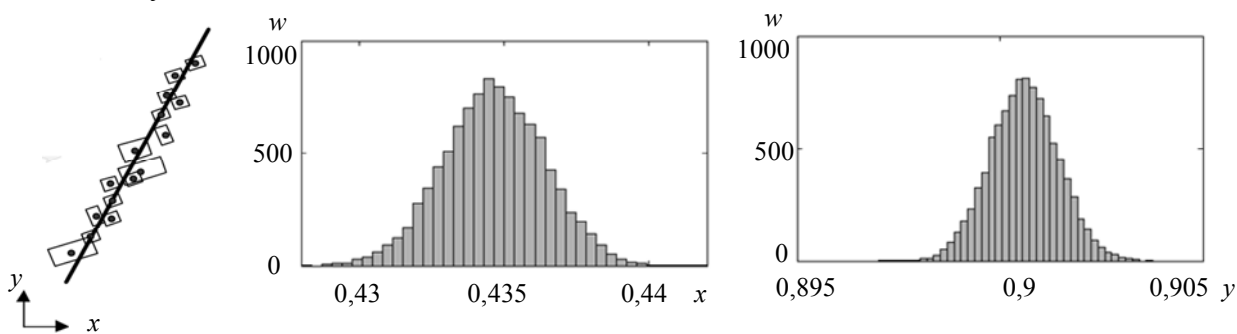


Рис. 2

**Оценка погрешностей измерений контролируемых величин.** Контролируемыми величинами являются геометрические размеры. Для расчета значения контролируемой величины необходимо определить множество различных точек. При этом погрешности измерений положений каждой точки определяются числом последовательных реализаций метода Монте-Карло. На рис. 2 приведен пример моделирования. Для параметров регрессионного уравнения представлены соответствующие функции плотности вероятности нормального распределения. Погрешности измерений  $x$ - и  $y$ -компонент измеряемых точек определяются экспериментально.

На рис. 3 приведен пример использования разработанного метода оценки погрешностей в микросистемной технике. Здесь в качестве подложки для микромеханических и электронных элементов используются прямоугольные и круглые пластины толщиной около 1 мм [17]. Измерения производились на основе критерия определения границы объекта „динамическое



пороговое значение“ с использованием падающего освещения (рис. 3, а). Радиус объекта  $R$  определялся путем расчета 20 точек, лежащих на окружности, с использованием метода Гаусса при решении соответствующей системы алгебраических уравнений. При экспериментальном определении погрешности измерений на основе  $n=10$  измерений погрешность  $\Delta$  составила 0,0461 пиксела (рис. 3, б). При использовании нового метода была рассчитана погрешность измерений 0,0482 пиксела (рис. 3, в). Для этого использовалась реализация Монте-Карло с  $w=10\,000$  повторными виртуальными экспериментами (рис. 3, в). Определялось рассеяние значений уровня яркости в соответствии с регрессионным моделированием. Отклонение между оценкой, полученной с использованием предложенного метода на основе знаний, и расчетом, сделанным на основе эксперимента, составляет 4,4 %.

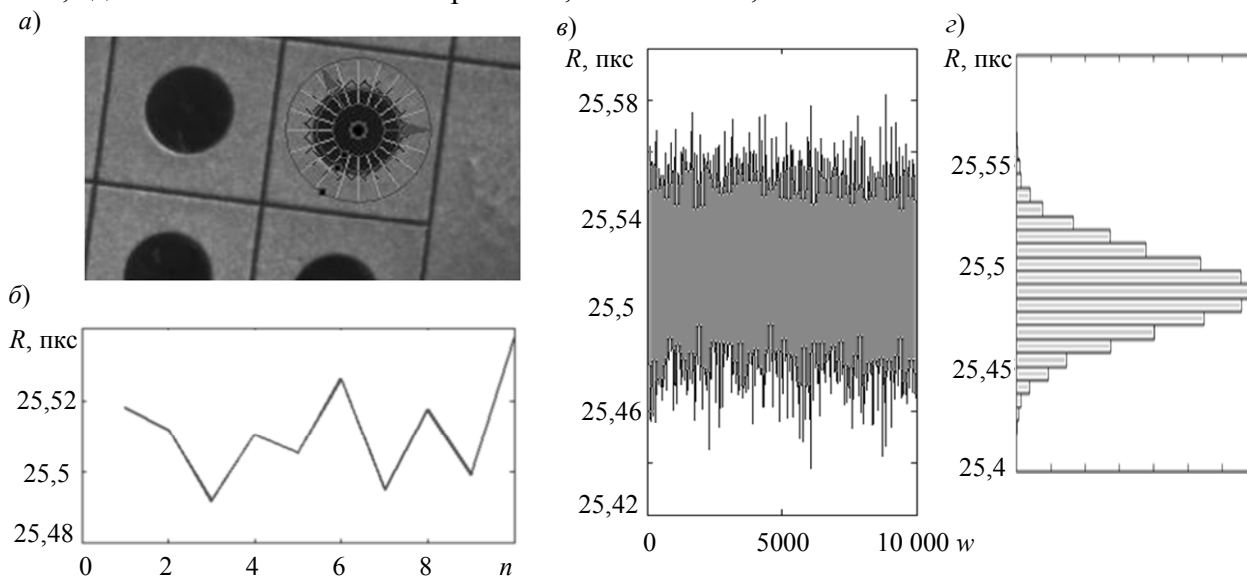


Рис. 3

**Заключение.** Представленный метод позволяет автоматически рассчитывать погрешности на основе регрессионных оценок и погрешности геометрических измерений на основе обработки изображений, что дает возможность избавиться от затратных повторных измерений. Новый метод оценки погрешностей измерений удобен для использования, при этом получаемые значения совпадают с полученными на основе эксперимента. На реализацию метода не влияют свойства поверхности измеряемого объекта.

Представленная работа является результатом междисциплинарного исследования в рамках Sonderforschungsbereich 622, которое проводится в Техническом университете г. Ильменау при содействии Deutschen Forschungsgesellschaft.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DIN V ENV 13005 — Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. DIN — Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin Beuth Verlag, 1999.
2. Kühn O. Ein Beitrag zur hochauflösenden zweidimensionalen Geometriemessung mit CCD-Zeilensensoren. Technische Universität Ilmenau, Diss., 1997.
3. Hultsch E. Ausgleichsrechnung mit Anwendungen in der Physik unter besonderer Berücksichtigung der Messtechnik. Akademische Verlagsgesellschaft GEEST und PORTIG K. G. Leipzig, 1971.
4. Papula L. Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 3. Wiesbaden: Vieweg, 1994.
5. Wolf H. Ausgleichsrechnung. Bonn: Dümmler, 1975.

6. VDI/VDE 2617 Blatt 6.1 — Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung, Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung - Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit optischen Sensoren für laterale Strukturen. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik. Berlin: Beuth Verlag, 2005.
7. *Christoph R., Neumann H. J.* Multisensor Koordinatenmesstechnik. Landsberg/Lech: Verlag moderne Industrie, 2003.
8. *Cox M. G., Siebert B. R. L.* The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty // Metrologia. 2006. P. 178—188.
9. *Peters J. C.* Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik. Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
10. *Kacker R., Toman B., Huang D.* Comparison of ISO-GUM, draft GUM Supplement 1 and Bayesian statistics using simple linear calibration // Metrologia. 2006. P. 167—177.
11. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. ISO — International Organization for Standardization. Genf: ISO, 2007.
12. *Wolf M., Müller M., Rösslein M.* Modellierung und Simulation komplexer Messvorgänge mittels der Monte-Carlo-Methode // Technisches Messen. 2007. Bd 74. S. 485—493.
13. DIN EN ISO 14253-1 Prüfen von Werkstücken und Messgeräten durch Messen, Teil 1: Entscheidungsregeln für die Feststellung von Übereinstimmung oder Nichtübereinstimmung mit Spezifikationen. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag, 1999.
14. *Wäldele F.* Die Messunsicherheit von Koordinatenmessungen in Normen // Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen VDI-Berichte. 2004. N 1867. S. 209—222.
15. *Bai A.* Der Einsatz von Simulationen zur Untersuchung von Fehlereinflüssen in der Interferometrie. Fraunhofer Institut Produktionstechnologie, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2004.
16. *Bibel W.* Wissenspräsentation und Inferenz. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1993.
17. *Weissensee K., Kühn O., Lins G., Töpfer S., Rosenberger M.* Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenpunkten bei der Geometriemessung. WO2009/141333 A1. 26.11.2009.

**Сведения об авторах**

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>Карина Вайсензее</b>            | — ТУ Ильменау; кафедра контроля качества;<br>E-mail: karina.weissensee@tu-ilmenau.de   |
| <b>Галина Александровна Польте</b> | — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: galinkan@rambler.ru |
| <b>Герхард Линс</b>                | — профессор; ТУ Ильменау; кафедра контроля качества  |

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
19.10.11 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 681.5:681.3

Ю. Н. ХИЖНЯКОВ, А. А. ЮЖАКОВ

## НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРЯЖЕНИЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрен нейро-нечеткий регулятор напряжения объекта управления (бесщеточного синхронного генератора с демпферной обмоткой), позволяющий сочетать положительные свойства нечеткого регулятора и нейронной сети на адаптивных нейронах. Представлено описание функций трехслойной нейронной сети нейро-нечеткого регулятора напряжения.

*Ключевые слова:* бесщеточный синхронный генератор с демпферной обмоткой, лингвистическая переменная, терм, степень принадлежности, фаззификация, адаптивный нейрон, активационная функция, смещение.

Постоянно возрастающие сложность и разнообразие задач, решение которых возлагается на автоматические системы, в последнее время определяют повышенную потребность в системах управления с более универсальными свойствами. Для решения большинства задач подходят системы, основанные на нечеткой логике и нейронных сетях (НС) [1—3]. НС выполняют решения, используя предшествующий опыт, что дает возможность приспособиться к изменениям в системе. Объединение нечеткой логики и НС позволит исключить их недостатки и проектировать нейро-нечеткие (адаптивные) регуляторы. По сравнению с традиционными методами анализа и вероятностным подходом нейро-нечеткое регулирование позволяет анализировать задачи и получать результаты с требуемой точностью, обеспечивать значительное повышение быстродействия процессов управления при использовании нейро-нечетких регуляторов и создавать системы управления для объектов, алгоритмы функционирования которых трудно формализуемы методами традиционной математики [2]. Возможности НС как методологии разрешения проблем позволяют успешно использовать ее в нечетких регуляторах напряжения бесщеточного синхронного генератора (БЩСГ) [4, 5]. Регулирование на основе нечеткой логики с применением НС просто и надежно в реализации и обеспечивает лучшие характеристики, чем ПИД-регулирование. На рис. 1 приведена система автоматического регулирования (САР) с нейро-нечетким регулятором напряжения ( $D_1$  — дифференциатор;  $\Phi$  — фаззификатор).

Проектирование нейро-нечеткого регулятора напряжения БЩСГ с демпферной обмоткой предполагает выбор лингвистических переменных, терм-множеств по каждой переменной, выбор функций принадлежности фаззификатора и структуры НС.

Вектор входных переменных нейро-нечеткого регулятора напряжения

$$\bar{X}_i = (\bar{x}_{1i}, \bar{x}_{2i}, \bar{x}_{3i})^T,$$

где  $\bar{x}_{1i}$  — мгновенное значение отклонения напряжения ( $\Delta U = U_{\text{зад}} - U$ );  $\bar{x}_{2i}$  — мгновенное значение производной отклонения напряжения ( $d\Delta U/dt$ );  $\bar{x}_{3i}$  — мгновенное значение

реактивного тока статора  $i_p$  БЩСГ. Зададимся описанием лингвистических переменных. Линейное терм-множество отклонений напряжения: отрицательное среднее (ОС), отрицательное малое (ОМ), норма (Н), положительное малое (ПМ), положительное среднее (ПС). Линейное терм-множество производной отклонения напряжения: ОС, ОМ, Н, ПМ, ПС. Линейное терм-множество реактивного тока статора: положительное очень малое (ПОМ), положительное малое (ПМ), положительное среднее (ПС), положительное большое (ПБ), положительное очень большое (ПОБ), ПМ, ПС.

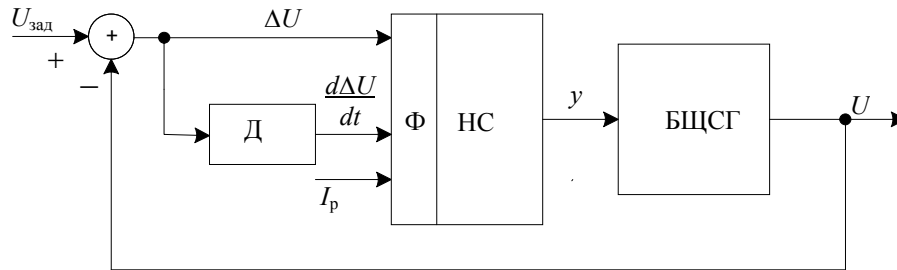


Рис. 1

На рис. 2 приведены линейные терм-множества по отклонению напряжения (а), производной отклонения напряжения (б) и реактивного тока статора (в), отвечающие требованиям непрерывности, непротиворечивости и полноты [6, 7]. Исходя из динамических свойств БЩСГ задаем диапазоны изменения ошибки  $\Delta U_{\min} \leq \Delta U \leq \Delta U_{\max}$ , изменения скорости изменения ошибки  $(d\Delta U/dt)_{\min} \leq d\Delta U/dt \leq (d\Delta U/dt)_{\max}$ , изменения реактивного тока статора  $(I_p)_{\min} \leq I_p \leq (I_p)_{\max}$ . Нечеткий адаптивный регулятор напряжения состоит из НС и фаззификатора, который формирует векторы степеней принадлежности термов трех лингвистических переменных регулятора: отклонение напряжения ( $\Delta U$ ), производной отклонения напряжения ( $d\Delta U/dt$ ) и реактивного тока статора ( $I_p$ ).

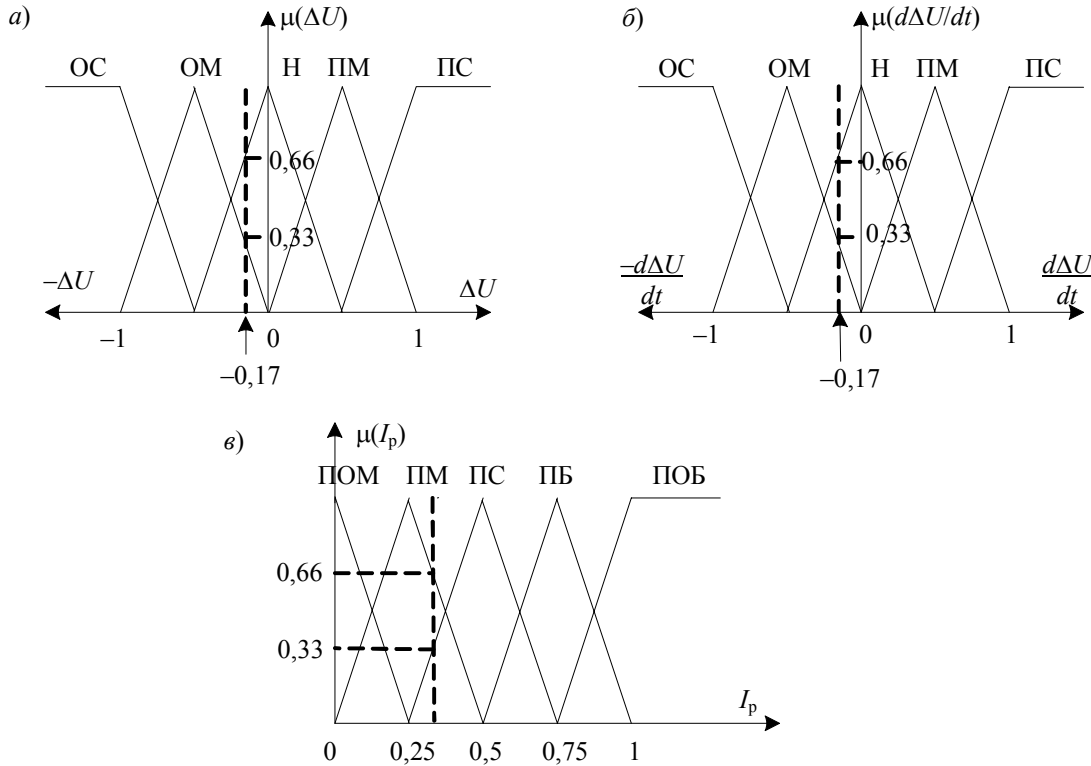


Рис. 2

НС, приведенная на рис. 3, состоит из входного, скрытого и выходного слоев (здесь  $F_1, F_2, F_3$  — активационные функции гиперболического тангенса адаптивных нейронов скрытого слоя;  $F_4$  — линейная активационная функция нейрона выходного слоя НС [10];

$x_{см}, v_{10}, v_{20}, v_{30}$  — „нейронные смещения“, где  $v_{10} = 0, v_{20} = 0, v_{30} = 0$ ). Входной (распределительный) слой НС представлен тремя векторами степеней принадлежности термов фаззификатора по отклонению напряжения, производной отклонения напряжения и реактивному току статора. Скрытый (промежуточный) слой НС состоит из трех нейронов. Каждый нейрон скрытого слоя дополнен обратной связью. Элемент сравнения в цепи обратной связи сопоставляет фактический сигнал с выхода сумматора нейрона с желаемым сигналом  $d$  (это может быть ошибка регулирования в САР или производная ошибки регулирования и т.д.). Алгоритм адаптации (алгоритм Уидроу—Хоффа) подстраивает коэффициенты входной матрицы так, чтобы свести к нулю ошибку  $\epsilon$ . Эта процедура заключается в сведении к минимуму квадрата ошибки с помощью итерационной процедуры с переменным шагом [8]. Сигнал с выхода сумматора нейрона через нелинейную активационную функцию типа гиперболического тангенса подается на вход нейрона выходного слоя [9].

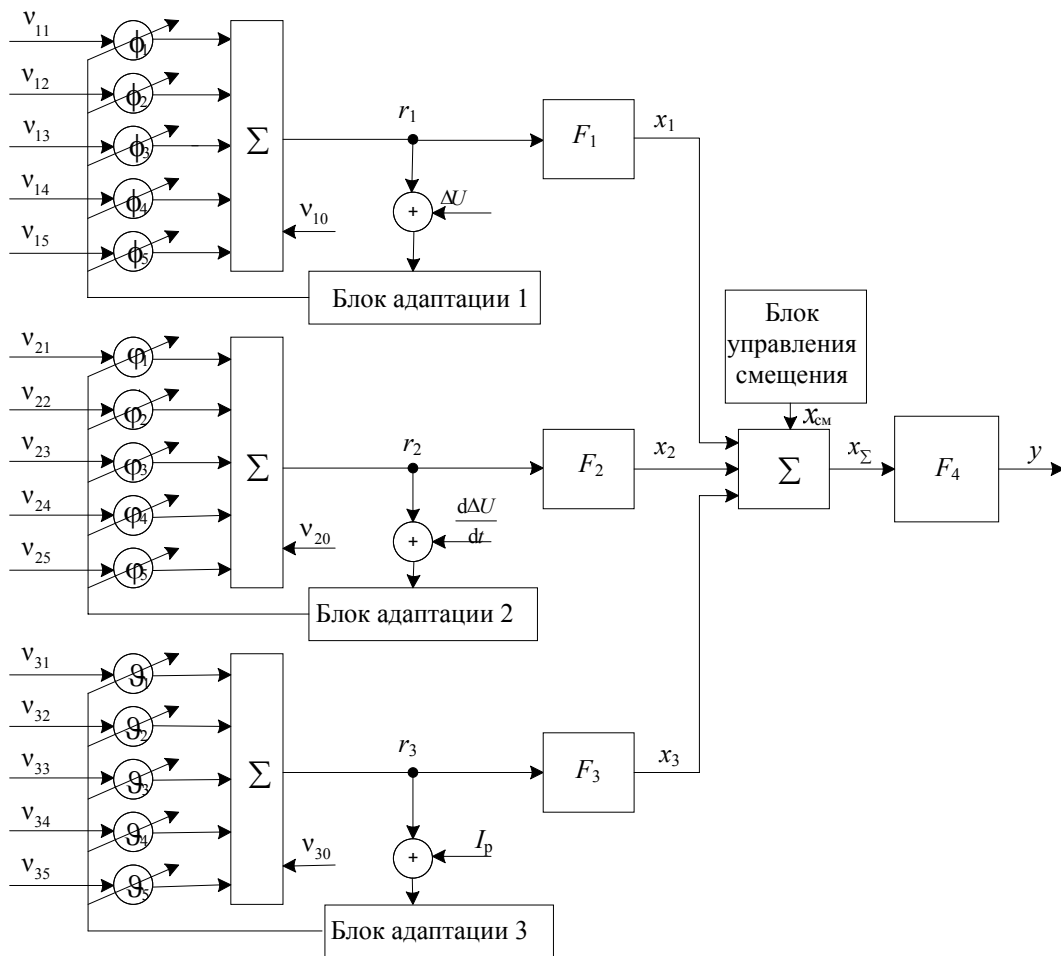


Рис. 3

Выходной слой НС с линейной активационной функцией формирует управляющее воздействие  $y$  на регулируемый объект (БЩСГ), которое ограничено по модулю  $|y| \leq y_{max}$ . НС описывается выражением

$$y = F_4 \left[ x_{см} + F_1 \left( \sum_{i=1}^n v_{1i} \phi_i + v_{10} \right) + F_2 \left( \sum_{i=1}^m v_{2i} \phi_i + v_{20} \right) + F_3 \left( \sum_{i=1}^{\gamma} v_{3i} \vartheta_i + v_{30} \right) \right], \quad (1)$$

где  $m, n, \gamma$  — размерность терм-множеств векторов входа НС;  $v_1, v_2, v_3$  — степень принадлежности соответственно терм-множеств фаззификатора по отклонению напряжения, производной отклонения напряжения и реактивному току статора;  $\phi, \phi, \vartheta$  — настраиваемые

коэффициенты нейронов скрытого слоя соответственно по отклонению напряжения, по производной отклонения напряжения и по реактивному току статора.

Введем обозначения терм-множеств по отклонению напряжения:  $v_{11} = \mu(\Delta U)_{OC}$ ;  $v_{12} = \mu(\Delta U)_{OM}$ ;  $v_{13} = \mu(\Delta U)_H$ ;  $v_{14} = \mu(\Delta U)_{ПМ}$ ;  $v_{15} = \mu(\Delta U)_{ПС}$ ; по производной отклонения напряжения:  $v_{21} = \mu(d\Delta U/dt)_{OC}$ ;  $v_{22} = \mu(d\Delta U/dt)_{OM}$ ;  $v_{23} = \mu(d\Delta U/dt)_H$ ;  $v_{24} = \mu(d\Delta U/dt)_{ПМ}$ ;  $v_{25} = \mu(d\Delta U/dt)_{ПС}$ ; по реактивному току статора:  $v_{31} = \mu(I_p)_{ПОМ}$ ;  $v_{32} = \mu(I_p)_{ПМ}$ ;  $v_{33} = \mu(I_p)_{ПС}$ ;  $v_{34} = \mu(I_p)_{ПБ}$ ;  $v_{35} = \mu(I_p)_{ПОБ}$ .

Пусть текущее значение отклонения напряжения  $\Delta U = -0,17$  (см. рис. 2) активирует терм Н степенью принадлежности  $\mu(\Delta U)_H = 0,66$  и терм ОМ степенью принадлежности  $\mu(\Delta U)_{OM} = 0,33$ , что соответствуют компонентам вектора степеней принадлежности отклонений напряжения при новых обозначениях:  $v_{11} = 0$ ,  $v_{12} = 0,33$ ,  $v_{13} = 0,66$ ,  $v_{14} = 0$ ,  $v_{15} = 0$ . При этом на входе его блока адаптации 1 формируется сигнал ошибки  $\varepsilon_1(k) = [\Delta U - (\varphi_2 v_{12} + \varphi_3 v_{13})_k]$ . Вычисления новых значений весовых коэффициентов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  адаптивного нейрона по отклонению напряжения выполняется по рекуррентной формуле [9]:

$$\varphi_i(k+1) = \varphi_i(k) + 2C_1 \varepsilon_1(k) x_{1i}(k), \quad (2)$$

где  $2C_1$  задает скорость настройки коэффициентов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  нейрона по отклонению напряжения, определяемой скоростью сходимости итерационного процесса оптимизации,  $C_1 = 0,01-0,1$ ;  $x_{1i}(k) = \left(\frac{d\varphi_i}{d\varphi_i}\right)_k$  — производная  $k$ -й итерации  $i$ -го коэффициента нейрона отклонения напряжения.

Пусть текущее значение производной отклонения напряжения  $d\Delta U/dt = -0,17$  (рис. 2) активирует терм Н по  $\mu(d\Delta U/dt)_H = 0,66$  и терм ОМ по  $\mu(d\Delta U/dt)_{OM} = 0,33$ , что соответствует компонентам вектора степеней принадлежности производной отклонений напряжения при новых обозначениях:  $v_{21} = 0$ ,  $v_{22} = 0,33$ ,  $v_{23} = 0,66$ ,  $v_{24} = 0$ ,  $v_{25} = 0$ . При этом на входе блока адаптации 2 нейрона формируется сигнал ошибки

$$\varepsilon_2(k) = \left[ \frac{d\Delta U}{dt} - (\varphi_2 v_{22} + \varphi_3 v_{23}) \right].$$

Аналогично вычисления новых значений весовых коэффициентов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  нейрона выполняются по рекуррентной формуле

$$\varphi_i(k+1) = \varphi_i(k) + 2C_2 \varepsilon_2(k) x_{2i}(k), \quad (3)$$

где  $2C_2$  — скорость настройки коэффициентов  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  нейрона по производной отклонения напряжения,  $C_2 = 0,01-0,1$ ;  $x_{2i}(k) = \left(\frac{dr_2}{d\varphi_i}\right)_k$  — производная  $k$ -й итерации  $i$ -го коэффициента нейрона производной отклонений напряжения.

Пусть, например, текущее значение тока ротора  $I_p = 0,3$  активирует терм Н  $\mu(I_p)_H = 0,66$  и терм ОМ  $\mu(I_p)_{OM} = 0,33$  (рис. 2), что соответствует компонентам вектора степеней принадлежности реактивного тока статора при новых обозначениях:  $v_{31} = 0$ ,  $v_{32} = 0,33$ ,  $v_{33} = 0,66$ ,

$v_{34} = 0, v_{35} = 0$ . При этом на входе блока адаптации 3 нейрона по реактивному току статора формируется сигнал ошибки  $\varepsilon_3(k) = [I_p - (\vartheta_2 v_{32} + \vartheta_3 v_{33})]$ . Вычисления новых значений весовых коэффициентов  $\vartheta_2$  и  $\vartheta_3$  нейрона по реактивному току статора выполняются по рекуррентной формуле

$$\vartheta_i(k+1) = \vartheta_i(k) + 2C_3 \varepsilon_3(k) x_{3i}(k), \quad (4)$$

где  $2C_3$  задает скорость настройки коэффициентов  $\vartheta_2$  и  $\vartheta_3$  нейрона по реактивному току статора,  $C_3 = 0,01 \text{—} 0,1$ ;  $x_{3i}(k) = \left( \frac{dr_2}{d\vartheta_i} \right)_k$  — производная  $k$ -й итерации  $i$ -го коэффициента нейрона по реактивному току статора.

Тогда выход нейро-нечеткого регулятора напряжения, согласно соотношению (1) с учетом (2)—(4), соответствует выражению

$$y = F_4(x_{\text{см}} + r_1 \text{th}(r_1) + r_2 \text{th}(r_2) + r_3 \text{th}(r_3)) = F_4(x_{\text{см}} + x_1 + x_2 + x_3),$$

где  $r_1, r_2, r_3$  — выходы сумматоров нейронов закрытого слоя;  $x_1, x_2, x_3$  — выходы нейронов закрытого слоя;  $x_{\text{см}}$  — задает ток в роторе БЩСГ в режиме холостого хода.

Для подтверждения теории нейро-нечеткого управления напряжением БЩСГ был разработан алгоритм и выполнено имитационное моделирование САР [10].

На рис. 4 показан интерфейс и приведена осциллограмма процесса возбуждения БЩСГ и пуска асинхронного двигателя от БЩСГ с помощью нейро-нечеткого регулятора напряжения (1 — изменение тока ротора БЩСГ; 2 — напряжение на шинах автономной системы; 3 — скорость разгона асинхронного двигателя (АД); 4 — ток статора АД).

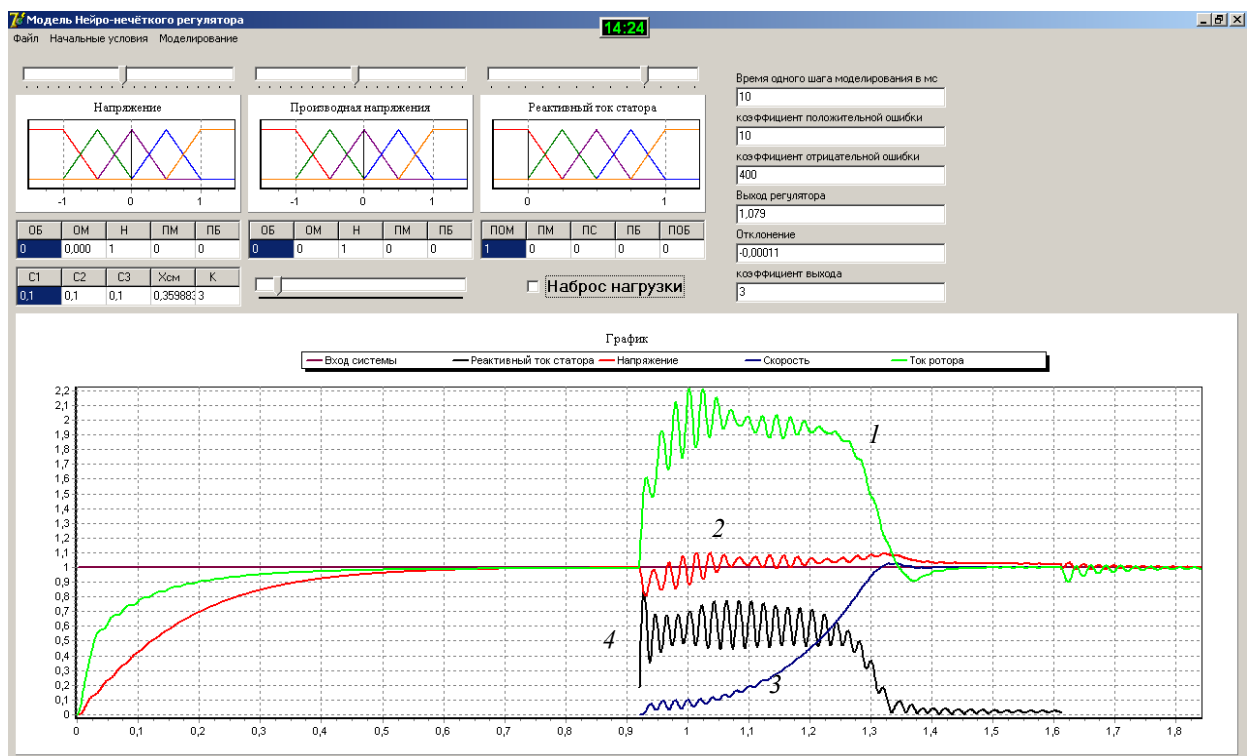


Рис. 4

Показатели качества переходного процесса следующие:

- время первого восстановления напряжения на шинах 0,1 с;
- время регулирования 0,4 с;
- время перерегулирования практически отсутствует;

— коэффициент форсировки тока ротора БЩСГ 2,2, что является допустимым значением.

Таким образом, в настоящей работе приведена методика нейро-нечеткого управления; представлено описание функций трехслойной НС нейро-нечеткого регулятора напряжения; разработаны алгоритм и программа нейро-нечеткого регулятора напряжения БЩСГ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егунова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И. Д. Рудницкого. М.: Горячая линия—Телеком, 2006.
3. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2001.
4. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нечеткий и нейронный адаптивные регуляторы возбуждения генератора средней мощности // Тр. 11-й Междунар. конф. „Проблемы управления и моделирования в сложных системах“. Самара, 2009. С. 309—313.
5. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нечеткая адаптивная система возбуждения БЩСГ переменного тока средней мощности // Всеросс. науч.-технич. интернет-конференция. Пермь: ПГТУ, 2007.
6. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия—Телеком, 2002.
7. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия—Телеком, 2007.
8. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
9. Халов Е. А. Одномерные многопараметрические функции принадлежности в задачах нечеткого моделирования и управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 2—10.
10. Хижняков Ю. Н. Формирование вектора напряжения на шинах автономной электростанции // Изв. ТПУ. 2009. Т. 315, № 4. С. 43—46.

#### *Сведения об авторах*

- Юрий Николаевич Хижняков** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет; кафедра автоматки и телемеханики;  
E-mail: luda@at.pstu.ac.ru
- Александр Анатольевич Южаков** — д-р техн. наук, профессор; Пермский государственный технический университет; кафедра автоматки и телемеханики;  
E-mail: uz@at.pstu.ac.ru

Рекомендована кафедрой  
автоматки и телемеханики

Поступила в редакцию  
25.03.11 г.



В. Н. ЕФАНОВ, Т. У. ЕНИКЕЕВ

## УПРАВЛЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваются теоретические основы синтеза координирующего управления локальной энергосистемой с использованием ветроэнергетических установок.

**Ключевые слова:** локальные энергосистемы, ветроэнергетические установки, модель, расчетный режим, координирующее управление.

Одним из приоритетов в развитии энергетики является использование различных возобновляемых энергоресурсов. Реализация такого направления возможна с применением ветроэнергетических установок (ВЭУ). Практика эксплуатации ВЭУ показывает, что для надежного энергоснабжения потребителей следует объединять значительное количество ветрогенераторов в единую локальную энергетическую систему (ЛЭС). Это объясняется следующими специфическими особенностями ВЭУ:

- относительно малой установленной мощностью каждого отдельного агрегата;
- непостоянством характеристик ветра как энергоносителя;
- невозможностью аккумулирования энергии ветра;
- нестабильным характером нагрузки в сетях малой мощности.

Указанные особенности обуславливают необходимость оперативного управления режимом работы подобных энергосистем, а также гибкого перераспределения активной и реактивной мощности в зависимости от конкретной складывающейся ситуации. Решение этих задач обеспечивает система автоматического управления (САУ) параметрами ЛЭС на двух уровнях [1]. На нижнем уровне выполняется автоматическое регулирование частоты и напряжения при помощи первичных регуляторов ВЭУ. На верхнем уровне происходит так называемое групповое регулирование активной и реактивной мощности с целью согласования режимов работы отдельных ВЭУ для обеспечения требуемого качества генерируемой энергии.

В настоящей работе предлагается метод синтеза верхнего уровня САУ локальной энергетической системы, основанный на принципе координации электроэнергетических процессов во всех элементах сети.

Математическая модель нижнего уровня управления может быть представлена в виде двух групп уравнений. Первая группа описывает процессы в узлах электрической сети, к каждому из которых подключаются определенная совокупность ветрогенераторов и нагрузка

$$\begin{aligned} \Delta \dot{z}_{hi} &= A_{hi} \Delta z_{hi} + B_{hi} \Delta w_i + D_{hi} \Delta \beta_i; \\ \Delta \rho_i &= C_{hi} \Delta z_{hi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta z_{hi} = [\Delta s_i \ \Delta i_{vi}]^T$  — вектор отклонений значений скольжения ротора генератора и тока обмотки возбуждения соответственно;  $\Delta w_i = [\Delta \theta_i \ \Delta U_{vi}]^T$  — вектор отклонений управляющих воздействий — угла установки лопастей ВЭУ и напряжения на обмотке возбуждения;  $\Delta \beta_i = [\Delta \delta_{ri} \ \Delta \delta_i]^T$  — вектор отклонения абсолютных углов, определяющих положение ротора генератора и вектора напряжения в узле относительно некоторой вращающейся с угловой

скоростью оси  $\omega_C$ ;  $\Delta\rho_i = [\Delta f_i \ \Delta U_i]^T$  — вектор отклонений соответственно частоты и величины индуцируемой в якорной обмотке ЭДС.

Систему (1) дополним уравнениями, описывающими системы первичного регулирования частоты и напряжения:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{z}_{pi} &= \Delta v_i; \\ \Delta w_i &= T_i \Delta z_{pi} + G_i \Delta v_i. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\Delta z_{pi}$  — вектор отклонений переменных состояния  $i$ -го регулятора;  $\Delta v_i = \Delta g_i - \Delta\rho_i$  — вектор отклонений входных переменных;  $\Delta w_i = [\Delta\Theta_i \ \Delta U_{vi}]^T$  — вектор отклонений управляющих воздействий.

Вторая группа уравнений позволяет установить взаимосвязь между параметрами отдельных узлов в соответствии с топологией линий электропередачи:

$$\begin{aligned} \Delta\beta_i &= \sum_{j=1}^n F_{ij} \Delta\rho_j; \\ \Delta y_C &= \sum_{i=1}^n L_i \Delta\rho_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Матрицы  $F_{ij}$ ,  $L_i$  описывают связи между узлами внутри электрической сети, отображая взаимное влияние узлов, а также влияние линий передачи.

Объединив (1) и (2), с учетом (3) получим систему уравнений для нижнего уровня управления ЛЭС

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_1 x(t) + B_1 g(t); \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\dot{x}(t) = [\Delta z_{n1}, \dots, \Delta z_{nn}, \Delta z_{p1}, \dots, \Delta z_{pn}]^T$  — обобщенный вектор переменных состояния;

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_n - B_n G C_n + D_n F C_n & B_n T \\ -C_n & 0 \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} B_n G \\ I \end{bmatrix}; \quad C = [L C_n; 0].$$

$A_n = \text{blockdiag}\{A_{ni}\}$ ;  $B_n = \text{blockdiag}\{B_{ni}\}$ ;  $C_n = \text{blockdiag}\{C_{ni}\}$ ;  $D_n = \text{blockdiag}\{D_{ni}\}$ ;  $T_n = \text{blockdiag}\{T_{ni}\}$ ;  $G_n = \text{blockdiag}\{G_{ni}\}$  — блочно-диагональные матрицы;  $F = [F_{ij}]_{n \times n}$ ,  $L = [L_i]_{1 \times n}$  — блочные матрицы;  $I$  — единичная матрица.

Уравнение наблюдения в системе (4) служит основой для построения координирующего управления. Матрица  $C$  содержит информацию о результате декомпозиции вектора обобщенных выходных координат  $y$  и определяет весовые коэффициенты векторов переменных состояния локальных подсистем в формировании вектора  $y$ . Информация о значениях элементов матрицы  $C$  используется верхним уровнем управления, который подает управляющие воздействия в соответствующие локальные подсистемы нижнего уровня при отклонении текущей величины обобщенного вектора от ее желаемого значения, приводя тем самым переменные величины локальных подсистем к значениям, необходимым для выполнения задачи верхнего уровня управления.

Решение в полном объеме задачи координирующего управления представляется возможным только в рамках цифровой системы, способной в реальном масштабе времени обрабатывать большие массивы информации. Для этого необходимо перейти от непрерывной модели нижнего уровня управления в форме (4) к его цифровой форме записи:

$$x(k+1) = A_2 x(k) + B_2 g(k);$$

$$y(k) = Cx(k), \quad (5)$$

где  $A_2$  и  $B_2$  — числовые матрицы цифровой модели, однозначно соответствующие, для выбранного времени дискретизации  $T_0$ , матрицам  $A_1$  и  $B_1$  непрерывной модели;  $C$  — числовая матрица наблюдения, одинаковая для обеих моделей [3].

На систему координирующего управления, которая выполняет функции группового регулирования активной и реактивной мощности, возлагается задача согласования электро-механических и аэродинамических процессов во всех частях энергосистемы исходя из требования обеспечения расчетного режима ее работы при одновременном поддержании в заданных пределах требуемых значений основных параметров. Предположим, что расчетный режим задается вектором переменных  $y^*(k)$ . Условия согласования отдельных подсистем ЛЭС предусматривают, что вектор переменных состояния энергосистемы принадлежит области, удовлетворяющей следующему соотношению:

$$Cx^*(k) = y^*(k). \quad (6)$$

Случай, когда  $x(k) \in x^*(k)$ , означает, что в системе протекают согласованные процессы, обеспечивающие требуемые значения обобщенных координат. Если  $x(k) \notin x^*(k)$ , то в силу (6) глобальная цель не достигается, и в системе протекают несогласованные процессы, требующие координации. Расстояние в дискретном пространстве между фактическими  $x(k)$  и желаемыми  $x^*(k)$  значениями переменных состояния определяется минимальной длиной вектора

$$\rho(k) = x^*(k) - x(k). \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что для вектора рассогласования  $\rho(k)$  справедлива система уравнений

$$C\rho(k) = Cx^*(k) - Cx(k),$$

т.е.

$$C\rho(k) = y^*(k) - Cx(k). \quad (8)$$

Так как матрица  $C$  является не квадратной, то для системы (4) может быть найдено нормальное псевдорешение

$$\rho(k) = C^T (CC^T)^{-1} (y^*(k) - Cx(k)), \quad (9)$$

имеющее наименьшую длину среди всех векторов  $\rho(k)$ , определяющих минимальное значение  $\|C\rho(k) - (y^*(k) - Cx(k))\|$ .

Координирующее управление  $g(k)$  будем искать исходя из условия минимизации ожидаемого расстояния между желаемыми и текущими состояниями энергосистемы, т.е.  $\rho(k+1) = x^*(k+1) - x(k+1) \rightarrow 0$ . Подставив выражение  $x(k+1)$  из (2) в формулу (5) для  $\rho(k+1)$ , получим

$$\rho(k+1) = C^T (CC^T)^{-1} (y^*(k+1) - CA_2x(k) - CB_2g(k)) = 0,$$

или

$$C^T (CC^T)^{-1} CB_2g(k) = C^T (CC^T)^{-1} (y^*(k+1) - CA_2x(k)),$$

отсюда находим

$$g(k) = -(CB_2)^T \left( CB_2 (CB_2)^T \right)^{-1} \left( CA_2 x(k) - y^*(k+1) \right). \quad (10)$$

В системе (5), замкнутой координирующим управлением (10), достигается полное согласование динамических процессов для всех генерирующих и потребляющих элементов ЛЭС. Это выражается в обеспечении движения вектора обобщенных выходных координат  $y(t)$  системы по желаемой траектории  $y^*(t)$ , формируемой временной последовательностью расчетных значений [4]. В самом деле, подставив (10) в систему (4), получим

$$\begin{aligned} y(k+1) &= Cx(k+1) = C[A_2x(k) + B_2g(k)] = \\ &= CA_2x(k) + CB_2 \left[ -(CB_2)^T \left( CB_2 (CB_2)^T \right)^{-1} \left( CA_2x(k) - y^*(k+1) \right) \right]. \end{aligned}$$

Поскольку  $CB_2 (CB_2)^T \left( CB_2 (CB_2)^T \right)^{-1} = I$ , то

$$y(k+1) = CA_2x(k) - CA_2x(k) + y^*(k+1).$$

Оценим эффективность полученных результатов на примере системы управления, состоящей из трех взаимосвязанных подсистем — трех секций ВЭУ  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$  и  $x_3(k)$ . Пусть уравнения состояния (5) для данной ЛЭС имеют вид

$$x_1(k+1) = 0,873x_1(k) - 0,115x_2(k) + 0,456x_3(k) + 0,157g_1(k) - 3,54g_2(k);$$

$$x_2(k+1) = -0,21x_1(k) + 0,75x_2(k) + 0,229x_3(k) - 0,089g_1(k) + 0,790g_2(k);$$

$$x_3(k+1) = 0,834x_1(k) + 0,008x_2(k) + 0,908x_3(k) + 4,60g_1(k) - 0,266g_2(k);$$

а выходная координата системы, оценивающая величину активной мощности, подчиняется соотношению

$$y(k) = 0,43x_1(k) + 0,82x_2(k) + 0,134x_3(k).$$

Координирующее управление, синтезированное для данной системы в соответствии с уравнением (10), имеет вид

$$g_1(k) = -0,160x_1(k) - 0,288x_2(k) - 0,257x_3(k) + 0,5085y^*(k+1);$$

$$g_2(k) = 0,2386x_1(k) + 0,429x_2(k) + 0,383x_3(k) - 0,757y^*(k+1),$$

В таблице приведены результаты моделирования системы при квадратичном законе изменения выходной координаты  $y^*(k) = 0,1k^2$ .

**Результаты моделирования системы  
при квадратичном законе изменения выходной координаты**

$k$	$y^*(k)$	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$y(k)$
1	0,100	0,276	-0,064	0,254	0,100
2	0,400	0,975	-0,190	1,022	0,400
3	0,900	1,847	-0,232	2,207	0,900
4	1,600	2,739	-0,078	3,629	1,600
5	2,500	3,633	0,296	5,190	2,500
6	3,600	4,578	0,863	6,892	3,600
7	4,900	5,617	1,596	8,774	4,900
8	6,400	6,763	2,483	10,863	6,400
9	8,100	8,001	3,527	13,165	8,100
10	10,000	9,342	4,735	15,673	10,000
11	12,100	10,758	6,111	18,379	12,100
12	14,400	12,259	7,654	21,283	14,400
13	16,900	13,846	9,364	24,383	16,900
14	19,600	15,522	11,239	27,682	19,600
15	22,500	17,285	13,279	31,179	22,500

Продолжение таблицы

$k$	$y^*(k)$	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$y(k)$
16	25,600	19,136	15,485	34,878	25,600
17	28,900	21,074	17,856	38,775	28,900
18	32,400	23,099	20,393	42,872	32,400
19	36,100	25,272	23,096	47,167	36,100
20	40,000	27,412	25,964	51,661	40,000
21	44,100	29,699	28,997	56,355	44,100
22	48,400	32,073	32,197	61,247	48,400
23	52,900	34,535	35,562	66,339	52,900
24	57,600	37,084	39,092	71,629	57,600
25	62,500	39,721	42,788	77,119	62,500
26	67,600	42,445	46,649	82,808	67,600
27	72,900	45,255	50,677	88,696	72,900
28	78,400	48,154	54,869	94,783	78,400
29	84,100	51,139	59,228	101,069	84,100
30	90,000	54,212	63,751	107,555	90,000
31	96,100	57,373	68,441	114,239	96,100
32	102,400	60,620	73,296	121,123	102,400
33	108,900	63,955	78,317	128,205	108,900
34	115,600	67,378	83,503	135,487	115,600
35	122,500	70,887	88,855	142,968	122,500

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вследствие согласованного управления переменными состояниями  $x_1(k)$ ,  $x_2(k)$  и  $x_3(k)$  трех секций ВЭУ обобщенная выходная координата системы точно воспроизводит заданный закон.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей (специальные вопросы). М.: Высш. школа, 1975. 280 с.
2. Беркович М. А., Комаров Н. А., Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1981. 432 с.
3. Бойчук Л. М. Синтез координирующих систем автоматического управления. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
4. Васильев В. И., Гусев Ю. М., Ефанов В. Н. Многоуровневое управление динамическими объектами. М.: Наука, 1987. 309 с.

## Сведения об авторах

**Владимир Николаевич Ефанов**

— д-р техн. наук, профессор; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения; заведующий кафедрой; E-mail: efanov@mail.rb.ru

**Тимербулат Узбекович Еникеев**

— аспирант; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения; E-mail: tibulus@list.ru

Рекомендована кафедрой  
авиационного приборостроения

Поступила в редакцию  
29.06.10 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.44

Н. Д. ВОРЗОВА, Ю. Э. БУРУНКОВА, В. Г. БУЛГАКОВА,  
И. Ю. ДЕНИСЮК, Н. М. КАЛИНИНА

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В УФ-ОТВЕРЖДАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ЛИТОГРАФИИ

Исследован процесс формирования периодических структур в УФ-отверждаемых мономерных композициях при фотополимеризации с эффектом самоорганизации в субмикронном объеме методом лазерной интерференционной литографии. Установлена зависимость дифракционных характеристик полимерных периодических структур от состава композиции, условий экспонирования и постэкспозиционной обработки. Рассмотрены возможные механизмы самоорганизации в различных материалах.

*Ключевые слова:* УФ-отверждаемый материал, наноккомпозит, самоорганизация, периодическая структура, лазерная интерференционная литография, объемная микроструктура, дифракционная эффективность.

**Введение.** Метод лазерной интерференционной литографии позволяет получать полимерные структуры с востребованной в настоящее время субмикронной периодической конфигурацией — фотонные кристаллы. Имеется множество публикаций, в которых рассматриваются процессы получения фотонных кристаллов при использовании различных типов фоторезистов и фотополимеризующихся материалов при толщине слоев от сотен нанометров до единиц микрометров [1—3].

В настоящее время большой интерес проявляется к объемным структурам, получение которых стало возможным с появлением нового типа фоторезистов — негативного фоторезиста SU-8, позволяющего наносить слои толщиной в сотни микрометров [4, 5]. Однако необходимость нанесения слоя из раствора требует высокотемпературной обработки для удаления растворителя, так как остаточный растворитель существенно ухудшает качество структур. Эта проблема исключается при использовании УФ-отверждаемых материалов на основе композиций акриловых мономеров, которые позволяют наносить слои большой толщины без использования растворителя [6—8]. Эти материалы от традиционных фоторезистов отличают эффекты, обусловленные существенным повышением показателя преломления  $n$  при фотополимеризации.

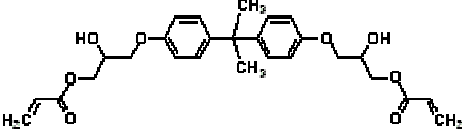
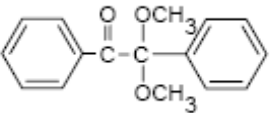
В предыдущих работах авторов рассмотрено применение таких материалов для получения микроструктур с высоким форматным отношением [9] методом глубокой литографии, получения микролинз методом полутонковой литографии [10], а также микроэлементов на торце оптоволокна [11]. Целью настоящей работы являлось исследование процессов структурообразования и роли эффектов самоорганизации при формировании полимерных периоди-

ческих структур в УФ-отверждаемых мономерных композициях и наномодифицированных акрилатах методом интерференционной литографии.

**Методика эксперимента.** Формирование полимерных периодических структур проводилось интерференционным методом с использованием схемы двулучевой интерференции. В качестве источника излучения использовался гелий-кадмиевый лазер с длиной волны 325 нм. Выбор такой длины волны определяется областью поглощения используемого инициатора фотополимеризации. В схеме обеспечены равенство оптических путей в плечах схемы, равенство значений интенсивности излучения в интерферирующих пучках, а также возможность изменения угла между интерферирующими пучками. При проведении экспериментов угол между пучками  $2\theta$  составлял  $10^\circ$ . В соответствии с условием Брэгга период структуры составляет 2 мкм. Такой период удобен для экспресс-оценки характеристик структур методом оптической микроскопии.

В качестве исследуемых материалов использовались УФ-отверждаемые композиции на основе акриловых мономеров, а также композиции, модифицированные введением неорганических наночастиц, разработанные авторами [6—8]. Компоненты композиций приведены в таблице.

Используемые компоненты мономерных композиций

Название	Производитель	$n$	Химическая формула	Сокращенное название
2-carboxyethyl acrylate	Aldrich	1,457	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OCH}_2\text{CH}_2-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{OH}$	2carb
Bisphenol A glycerolate	Aldrich	1,557		Bis A
RSX 51027	UCB	1,585	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_2(\text{Br})_2-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{C}_6\text{H}_2(\text{Br})_2-\text{O}-(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_2$	RDX
Наночастицы	„Красный химик“	1,9	ZnO	ZnO
Наночастицы	Aldrich	1,46	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
Диметоксифенил-ацетофенон	Aldrich			Фото-инициатор

Мономерная композиция наносилась на стеклянную подложку и для исключения ингибирования реакции фотополимеризации кислородом, содержащимся в воздухе, защищалась пленкой полиэстера (коэффициент пропускания 0,55 на длине волны 325 нм). Толщина слоя определялась толщиной спайсеров и составляла 20 мкм. В результате фотополимеризации на стеклянной подложке формировалась периодическая структура. Неполимеризованный материал вымывался при обработке в изопропиловом спирте.

Изменяемыми параметрами эксперимента являлись состав УФ-отверждаемой композиции, условия экспонирования и постэкспозиционной обработки в изопропанол.

Качество структур оценивалось с использованием микроскопа „Лабомед-3“ при увеличении до  $1000\times$  (апертура объектива 0,85). Определялись также дифракционные характеристики полученных периодических структур. Измерялись дифракционная эффективность на длине волны 633 нм, определяемая отношением интенсивности излучения в первом порядке дифракции к интенсивности падающего излучения, и величина светорассеяния, определяемая отношением интенсивности ореола рассеяния к интенсивности падающего излучения. На длине волны 633 нм отсутствует поглощение полимерных слоев, поэтому было выбрано это значение.

**Результаты.** Методом лазерной интерференционной литографии с использованием УФ-отверждаемых мономерных композиций и нанокомпозитов были получены периодические структуры. На рис. 1 приведены фрагмент поверхности структуры (а) и фотография среза (б), полученные с использованием оптического микроскопа „Лабомед-3“ при увеличении  $1000\times$  (состав композиции — BisA/2Carb 30/70, ZnO 10 %, длительность экспозиции 8 с, период — 2 мкм).

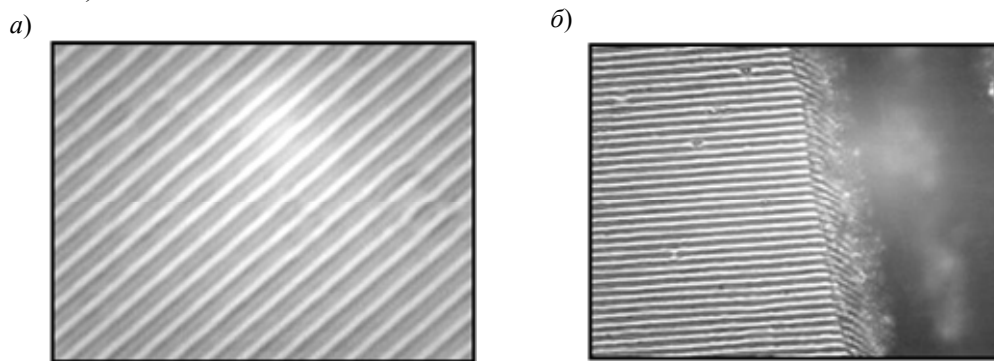


Рис. 1

Исследовалась возможность использования методов конфокальной микроскопии и оптической корреляционной томографии для оценки глубины структур. Однако вследствие использования объективов с большой апертурой не удалось определить глубину структур. Оценки, проведенные с использованием метода оптической микроскопии, установили наличие элементов структур при перефокусировке до 12 мкм.

На рис. 2 показаны экспозиционные характеристики для мономерных композиций (состав композиций: 1 — BisA/2Carb 30/70, 2 — RDX/2Carb 70/30, 3 — RDX/2Carb 90/10;

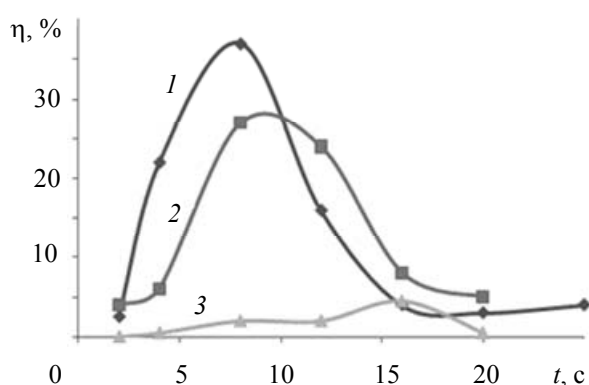


Рис. 2

$\eta$  — дифракционная эффективность,  $t$  — длительность экспозиции). Неожиданным оказалось получение хороших дифракционных характеристик для композиций RDX/2Carb 70/30 и BisA/2Carb 30/70 с высокой текучестью, так как ранее при получении микроструктур методом глубокой литографии в композициях на основе RDX/2Carb лучшие результаты обеспечивали составы с процентным соотношением компонент 90/10, которые при комнатной температуре находятся в твердом состоянии ( $T_{пл} = 38\text{ }^\circ\text{C}$ ), в результате пониженной

диффузии фоторадикалов. Полученные значения дифракционной эффективности могут определяться различными механизмами, в том числе, возможно, и механизмом самоорганизации в двухкомпонентных средах, определяемым фотостимулированным разделением и пе-



ремещением компонент фотополимеризующейся композиции [12]. Модуляция показателя преломления определяется разницей показателей преломления компонент композиции (см. таблицу).

Возможность разделения компонент подтверждается экспериментально при исследовании дифракционных характеристик структур после экспонирования и после обработки в изопропиловом спирте. На рис. 3 приведена зависимость дифракционной эффективности (*a*) и светорассеяния *i* (*б*) структур после экспонирования (1) и после обработки (2) от длительности экспозиции (состав композиции — RDX/2Carb 70/30). Идентичность кривых дифракционной эффективности до и после обработки свидетельствует о том, что процесс обработки практически не влияет на модуляцию показателя преломления (но несколько увеличивает светорассеяние). После обработки остается модуляция, полученная в результате экспонирования и определяемая предполагаемым разделением компонент.

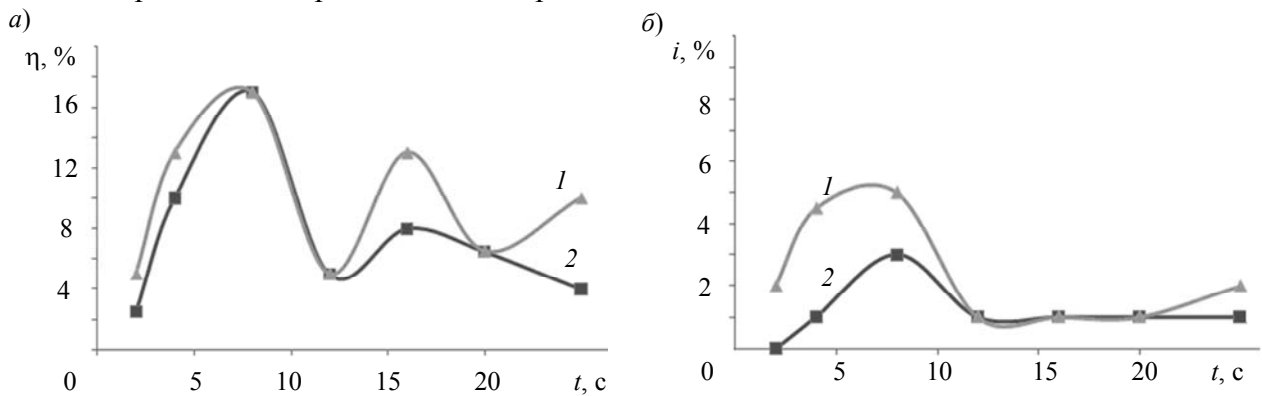


Рис. 3

Особый интерес представляло исследование наномодифицированных УФ-отверждаемых мономерных композиций, которые успешно использовались для получения микроструктур с высоким форматным отношением [13]. Исследовались наноконкомпозиты на основе BisA/2Carb с процентным соотношением компонент 30/70 и 50/50. В композицию вводились неорганические наночастицы ZnO в различных количествах, а также наночастицы SiO<sub>2</sub>. Результаты исследования дифракционных характеристик наноконкомпозитов приведены на рис. 4 (состав композиций: BisA/2Carb 30/70 (1, 2, 3) с концентрацией ZnO 6 % (1), 10 % (2) и 12 % (3); BisA/2Carb 30/70 с концентрацией SiO<sub>2</sub> 8 % (4), BisA/2Carb 50/50 ZnO 10 %).

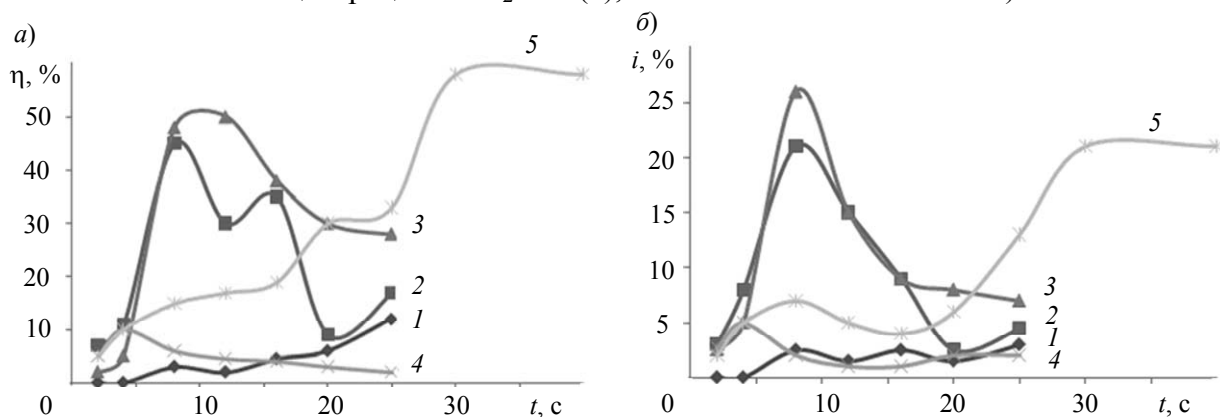


Рис. 4

Видно, что введение наночастиц ZnO в композицию приводит к значительному увеличению дифракционной эффективности (см. рис. 3). Наблюдается также увеличение дифракционной эффективности при увеличении концентрации наночастиц, однако возрастает и светорассеяние. Заметна тенденция уменьшения светорассеяния при увеличении экспозиции. Композиции с наночастицами SiO<sub>2</sub> обеспечивают наименьшее светорассеяние, но при меньших значениях дифракционной эффективности. Большой интерес представляет результат,

полученный для композиции BisA/2Carb с увеличенным до 50 % содержанием компоненты BisA, имеющей наибольшую вязкость. Для структур получены наибольшие значения дифракционной эффективности — 60 %.

Наблюдаемое повышение дифракционной эффективности структур при введении наночастиц и увеличении их концентрации можно связать с возможными эффектами самоорганизации при перемещении наночастиц. Например, в работе [14] рассмотрено фотоиндуцированное перемещение наночастиц при записи решетки в подобном нанокompозите. Перераспределение наночастиц обусловлено их дрейфом из области полимеризации в неполимеризованные области. Введенные наночастицы могут усиливать процессы разделения компонент, увеличивая массовую долю перемещаемого вещества.

Для материалов, рассмотренных в [14], наблюдалось повышение дифракционной эффективности при увеличении концентрации наночастиц. Для нанокompозитов, исследуемых в настоящей работе, также существует оптимальная концентрация наночастиц, определяющая, по-видимому, оптимальное значение модуляции показателя преломления. Возможно, с фотоиндуцированным разделением фаз в процессе фотополимеризации связаны вид кривых дифракционной эффективности, а также наибольшие значения дифракционной эффективности и наличие участка насыщения для композиции BisA/2Carb 50/50.

**Заключение.** Методом лазерной интерференционной литографии в УФ-отверждаемых акрилатах и нанокompозитах получены субмикронные периодические структуры. Определены дифракционные характеристики полученных структур и установлены возможные механизмы их формирования. Подтверждена возможность эффектов самоорганизации в наномодифицированных акрилатах, выявлена их связь с концентрацией наномодификатора.

Работа выполнена при проведении НИР по ГК П570 от 5 августа 2009 г. в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mao W. D., Liang G. Q., Pu Y. Y., Wang H. Z. Complicated three-dimensional photonic crystals fabricated by holographic lithography // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 91, N 261 911. P. 1—3.
2. Yang Y.-L., Hsu C.-C., Chang T.-L., Kuo L.-S., Chen P.-H. Study on wetting properties of periodical nanopatterns by a combinative technique of photolithography and laser interference lithography // Appl. Surf. Sci. 2010. Vol. 256, N 3683—3687. P. 1—3.
3. Ramanan V., Nelson E., Brzezinski A., Braun P. V., Wiltzius P. Three dimensional silicon-air photonic crystals with controlled defects using interference lithography // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92, N 173 304. P. 1—3.
4. Shen X. X., Yu X. Q., Yang X. L., Cai L. Z., Wang Y. R., Dong G. Y., Meng X. F., Xu X. F. Fabrication of periodic microstructures by holographic photopolymerization with a low-power continuous-wave laser of 532 nm // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2006. Vol. 8. P. 672—676.
5. Kondo T., Juodkazis S., Mizeikis V., Matsuo S., Mizawa H. Fabrication of three-dimensional periodic microstructures in photoresist SU-8 by phase-controlled holographic lithography // New J. of Physics. 2006. Vol. 8. P. 250.
6. Смирнова Т. В., Бурункова Ю. Э., Денисюк И. Ю. Измерение усадок УФ-отверждаемых композиций на основе акрилатов и диакрилатов // Оптич. журн. 2006. Т. 73, № 5. С. 57—61.
7. Бурункова Ю. Э., Семьина С. А., Капорский Л. Н., Левичев В. В. Наномодифицированные оптические акрилатные композиты // Оптич. журн. 2008. Т. 75, № 10. С. 54—57.
8. Todd R. W., Denisyuk I. Yu., Burunkova Ju. E. Filled polymers with high nanoparticles concentration – synthesis, optical and rheological proprieties // J. of Appl. Polym. Sci. 2010. Vol. 116. P. 1857—1866.
9. Denisyuk I. Yu., Fokina M. I., Vorzobova N. D., Burunkova Yu. E., Bulgakova V.G. Microelements with high aspect ratio prepared by self-focusing of the light at UV-curing // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. Vol. 497. P. 228—235.

10. Фокина М. И., Денисюк И. Ю. Формирование решеток микролинз методом дозированной фотополимеризации УФ-отверждаемых оптических композитов // Оптич. журн. 2006. № 11. С. 90—96.
11. Fokina M. I., Kaporskiy L. N., Denisyuk I. Yu. Nature of Microelements Self Writing in Fiber Tips in UV-Curable Composites // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. Vol. 497. P. 236—240.
12. Gleeson M. R., Sheridan J. T. A review of the modelling of free-radical photopolymerization in the formation of holographic gratings // J. Opt. A: Pure Appl. 2009. N 024 008. P. 1—12.
13. Денисюк И. Ю., Бурункова Ю. Э., Фокина М. И., Ворзобова Н. Д., Булгакова В. Г. Формирование микроструктур с высоким форматным отношением в результате самофокусировки света в фотополимерном нанокompозите // Оптич. журн. 2008. Т. 75, № 10. С. 59—65.
14. Yasuo Tomita and Naoaki Suzuki. Holographic manipulation of nanoparticle distribution morphology in nanoparticle-dispersed photopolymers // Opt. Lett. 2005. Vol. 30, N 8. P. 839—841.

**Сведения об авторах**

- Надежда Дмитриевна Ворзобова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; E-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru
- Юлия Эдуардовна Бурункова** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем
- Вера Геннадьевна Булгакова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; E-mail: vera-bulgakova@yandex.ru
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru
- Нина Михайловна Калинина** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем

Рекомендована кафедрой  
оптики квантово-размерных систем

Поступила в редакцию  
30.06.10 г.

Ю. А. БАЛОШИН, А. А. СОРОКИН, А. Н. ВОЛЧЕНКО

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЧ-БЛИЖНЕПОЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов (на примере органических и неорганических растворов веществ в дистиллированной воде). Показано, что с поверхности физического объекта можно получать информацию о самом объекте и процессах, происходящих в нем. Информационный сигнал определяется, прежде всего, диэлектрической проницаемостью физического объекта.

**Ключевые слова:** электродинамическая модель, ВЧ-ближнепольное зондирование, диэлектрическая проницаемость, информационный сигнал.

Диагностика внутреннего состояния различных физических объектов актуальна для микроэлектроники, материаловедения, дефектоскопии, прикладной химии. Одним из наиболее успешных и перспективных методов такой диагностики может стать ВЧ-ближнепольное зондирование.

Однако для более глубокого понимания метода и развития его возможностей в прикладных исследованиях необходимо построение относительно простой электродинамической модели, позволяющей качественно и количественно оценивать отклик ВЧ-ближнепольной измерительной системы при взаимодействии ее с исследуемым физическим объектом. По отклику можно судить о внутренней структуре этого объекта и ее изменениях под воздействием различных внешних факторов. Для этого обратимся к результатам экспериментальных исследований различных растворов веществ (органических и неорганических в дистиллированной воде), полученных нами с помощью измерительного комплекса и реализуемого в нем метода ВЧ-ближнепольного зондирования, которые подробно рассмотрены в работе [1].

**Эксперимент № 1.** Объект исследования — стеклянные ампулы, заполненные одинаковыми по объему различными растворами веществ в дистиллированной воде (табл. 1).

Таблица 1

Номер ампулы	Исследуемый объект
1	Пустая ампула
2	Дистиллированная вода
3	Раствор NaCl 5 %
4	Раствор NaCl 1 %
17	Гексан
18	Толуол
19	Ацетон
20	Изопропиловый спирт (ИПС)
21	NaCl
22	N <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
23	CuSO <sub>4</sub>
24	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
25	Дистиллированная вода
26	Этилацетат
27	Бутанол
28	Бензиловый спирт
29	Диоксан + H <sub>2</sub> O (0,8/0,2)
30	Диоксан + H <sub>2</sub> O (0,415/0,585)

Цель исследований — определение путем ВЧ-ближнепольного зондирования уровня информационного сигнала, получаемого от раствора в каждой ампуле, относительно выбранной нормы (опорная ампула № 25, заполненная дистиллированной водой). За уровень информационного сигнала примем относительную частоту ВЧ-генератора. Результаты исследований приведены на рис. 1, с его помощью можно сделать следующие выводы:

— уровни сигналов органических (область „n“) и неорганических (область „m“) растворов противоположны по отношению к уровню  $\omega_0$ , полученному от дистиллированной воды. Другими словами, возможно, используя ВЧ-ближнепольное зондирование, различать растворы различной природы;

— уровни сигналов определяются концентрацией растворенного вещества на единицу объема растворителя (см. рис. 1 — сигналы от ампул № 3 и 4, 29 и 30).

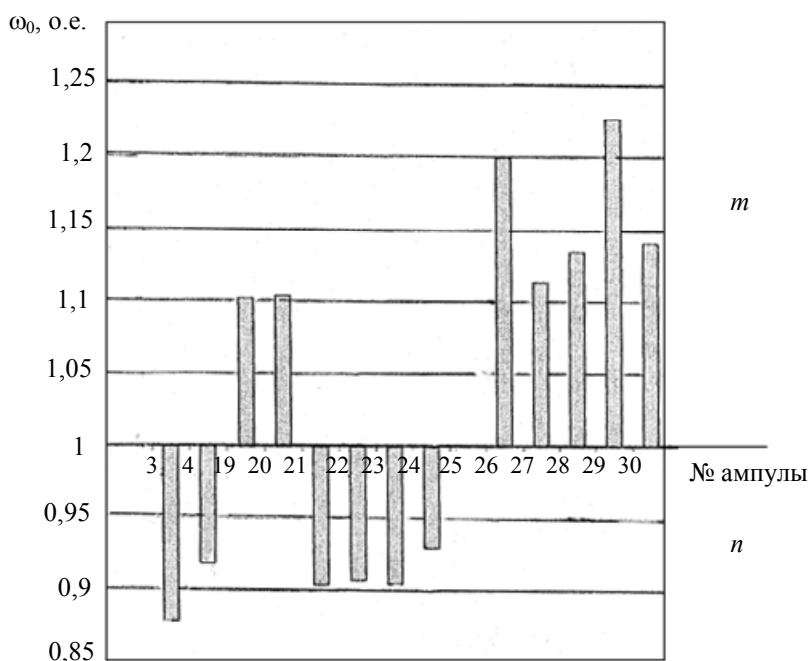


Рис. 1

**Эксперимент № 2** является своеобразным продолжением предыдущего исследования. Объект исследования — стеклянные ампулы с органическими жидкостями, представленные Государственным институтом прикладной химии (ГИПХ), причем, по согласованию с сотрудниками ГИПХ, содержание ампул было неизвестным.

Каждая ампула содержала органическое вещество в одинаковой концентрации на единицу объема растворителя (воды), были известны значения диэлектрической проницаемости вещества  $\epsilon_B$  (табл. 2).

Таблица 2

Номер ампулы	$\epsilon_B$ (по ГОСТ)
1	37,00—40,00 (использовалось значение 37,00)
2	54,95
3	53,33
4	51,02
5	56,17
6	58,16
7	58,88
8	58,68

Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 2. Цель исследования — установить связь уровня информационного сигнала (цифры со штрихом) со значениями  $\epsilon_B$

органических веществ (цифры) при ВЧ-ближнепольном зондировании их растворов. Как видно из рисунка, наблюдается корреляция значений  $\varepsilon$  и нормированных значений показаний прибора, а именно: с увеличением значения  $\varepsilon$  повышается уровень относительной частоты прибора.

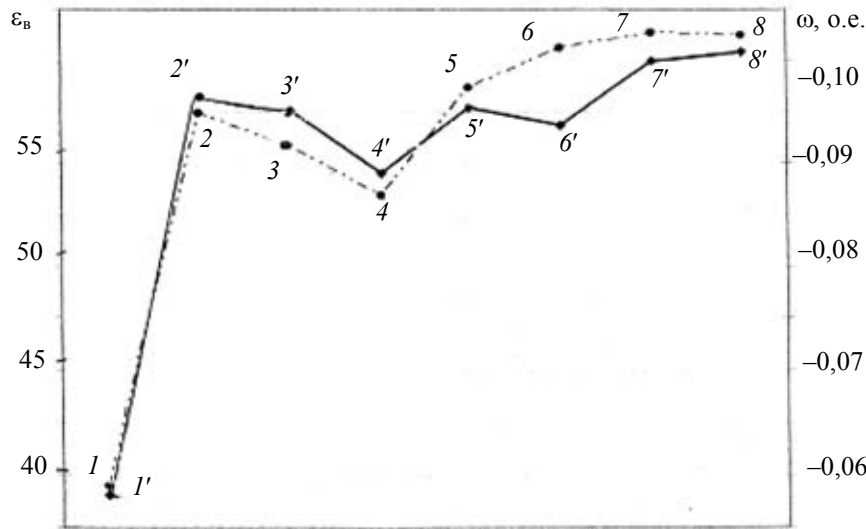


Рис. 2

**Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования.** Электродинамическую задачу ВЧ-ближнепольного зондирования будем анализировать исходя из схемы, приведенной на рис. 3.

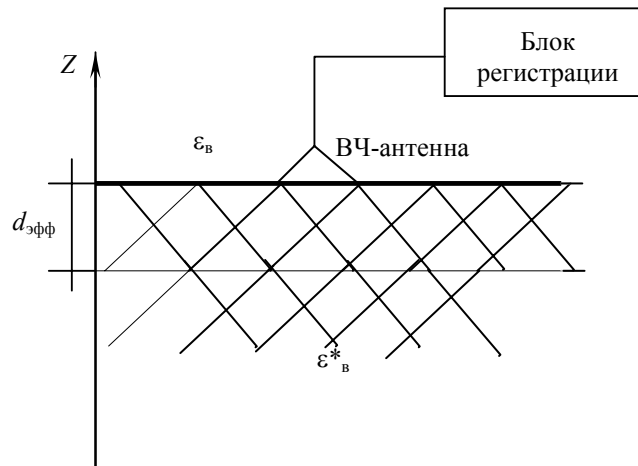


Рис. 3

ВЧ-антенна расположена в однородном верхнем полупространстве ( $Z > 0$ ) с действительным значением диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ . Нижним полупространством ( $Z < 0$ ), которое характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью вещества  $\varepsilon_{\text{в}}^* = \varepsilon_{\text{в}} - i\varepsilon_{\text{в}}^{**}$  будем считать исследуемый физический объект (раствор в ампуле). Такая среда будет поглощать энергию электромагнитного поля ВЧ-антенны. Это поглощение описывается законом Бугера [2]

$$I_Z = I_0 \exp(-\alpha Z), \quad (1)$$

где  $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \varepsilon_{\text{в}}^{**}$  — коэффициент поглощения электромагнитного поля веществом на единицу длины. При оценке коэффициента  $\alpha$  и глубины проникновения электромагнитного поля ВЧ-антенны в вещество для нашей модели наиболее важным является определение природы этого поглощения — является оно резонансным или нерезонансным.

Нерезонансное поглощение определяется потерями энергии электромагнитного поля при его взаимодействии со свободными зарядами в веществе, концентрация которых определяет проводимость последнего  $\sigma_B$ . Для этого случая  $\varepsilon_B^{**}$ , а значит и  $\alpha$ , определяются как

$$\varepsilon_B^{**} = \frac{\sigma_B}{\omega \varepsilon_B}, \quad \alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\sigma_B}{\omega \varepsilon_B}. \quad (2)$$

Резонансное поглощение характеризуется энергетическими потерями поля при взаимодействии его со связанными зарядами в веществе (дипольными моментами атомов и молекул). В этом случае  $\varepsilon_B$  и  $\varepsilon_B^{**}$  определяются через дисперсионные соотношения Крамерса-Кронинга [2] как  $\varepsilon(\omega)$  и  $\varepsilon_B^{**}(\omega)$ .

Обратимся теперь к параметрам ВЧ-антенны из работы [1]. Излучение антенны в воздухе (при отстройке) происходит на частоте  $f = 4 \cdot 10^6$  Гц, что соответствует длине волны  $\lambda = 75$  м. Отношение диаметра антенны  $D = 25$  мм к длине волны получается менее 0,0001. Для таких параметров антенны резонансное поглощение в воде и водных растворах можно не учитывать.

Что касается нерезонансного поглощения, то этот процесс характеризуется эффективной глубиной проникновения  $d_{эфф}$  (рис. 3) электромагнитного поля в вещество, которую можно определить из формулы (1) как:

$$\alpha Z \rightarrow \alpha d_{эфф} = 1 \rightarrow d_{эфф} = \frac{1}{\alpha}. \quad (3)$$

Ниже приведены значения  $\alpha$  дистиллированной воды 9 %-ного раствора NaCl для электромагнитного поля с частотой, равной единицам мегагерц (соизмеримой с частотой ВЧ-антенны), взятые из работы [3], и значения  $d_{эфф}$  (данные по  $\sigma_{H_2O}$  и  $\sigma_{NaCl}$  из работы [3] — усредненные).

$$\sigma_{H_2O} = (10^{-4} — 10^{-5}) \text{См} \cdot \text{м}^{-1} \rightarrow \alpha = 4,7 \cdot 10^{-2} \text{м}^{-1} \rightarrow d_{эфф} = 2,1 \cdot 10^2 \text{ м.}$$

$$\sigma_{NaCl} = (2,6 — 3,3) \text{См} \cdot \text{м}^{-1} \rightarrow \alpha = 1,41 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1} \rightarrow d_{эфф} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Как видно из этих соотношений, значения глубины проникновения электромагнитного поля в растворы (кроме дистиллированной воды) позволяют рассматривать ВЧ-зондирование как поверхностное, в отличие от метода СВЧ-зондирования с частотой электромагнитного поля в сотни мегагерц, при котором проникновение поля в вещество может достигать единиц-десятков сантиметров [4].

Таким образом, в нашей задаче физический объект (растворы) рассматривается как вещество с характерным значением  $d_{эфф}$ , обладающее диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_B$  и проводимостью  $\sigma_B$ , определяющими особенности процесса нерезонансного поглощения в этом веществе. Такую модель можно использовать не только для растворов. Это обстоятельство и определяет основную специфику рассматриваемой электродинамической модели, а именно: поглощающая среда в ближней зоне ВЧ-антенны существенно влияет на квазистационарную компоненту поля этой антенны и, как следствие — приводит к изменению комплексного сопротивления (импеданса) ВЧ-антенны, а значит и частоты ВЧ-генератора, частью колебательной системы которого она является. В результате этого влияния формируется информационный сигнал, соответствующий изменению частоты  $\delta\omega$  генератора в область „*m*“ или „*n*“ (см. рис. 1) относительно уровня опорной частоты, полученной от ампулы с дистиллированной водой  $\omega_0 = 2\pi f_0$ . Для веществ, которые являются диамагнетиками либо парамагнетиками (к ним можно отнести исследуемые растворы),  $\delta\omega$  генератора будет определяться через соотношение:

$$\delta\omega = \frac{\delta C}{C_{\text{эфф}}} \omega_0, \quad (4)$$

где  $\delta C$  — изменение емкостной составляющей импеданса антенны,  $C_{\text{эфф}}$  — эффективная емкость ВЧ-антенны, которая отлична от емкости этой антенны в воздухе  $C_0$  [4]:

$$C_{\text{эфф}} = \frac{\epsilon_B D^2}{d_{\text{эфф}}}. \quad (5)$$

Все вышеизложенное позволяет качественно объяснить результаты исследования физических объектов с помощью метода ВЧ-ближнепольного зондирования.

На рис. 1 для области сигналов „*m*“ (неорганические растворы) в предположении, что  $\delta\omega = (\omega_m - \omega_0) > 0$ , получим, воспользовавшись формулой (4):

$$\delta\omega = \omega_0 \frac{C_m - C_0}{C_0} > 0 \quad (6)$$

С помощью формул (2), (3) и (5) выражение (6) можно преобразовать в неравенство, определяющее уровни сигналов от неорганических растворов.

$$\epsilon_m \sigma_m > \epsilon'_0 \sigma_0, \quad (7)$$

где  $\epsilon_m$  и  $\sigma_m$  — соответственно диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость исследуемого вещества, а  $\epsilon'_0$  и  $\sigma_0$  — дистиллированной воды.

Для области „*n*“ аналогичным образом получим неравенство для органических растворов:

$$\epsilon_n \sigma_n < \epsilon'_0 \sigma_0. \quad (8)$$

Оценим условия (7) и (8) на примере конкретных растворов. Раствор NaCl (ампулы № 3 и 4)

$$\epsilon_{\text{NaCl}} = \epsilon_m = 5,9; \quad \sigma_m = 3 \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1},$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon'_0 = 75,9; \quad \sigma_0 = 10^{-4} \text{—} 10^{-5} \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1}.$$

Очевидно, что эти данные обеспечивают выполнение неравенства (7), которое определяет условие формирования отношения уровня сигнала ВЧ-антенны от неорганических растворов к уровню дистиллированной воды.

Если обратиться к органическим растворам, то в качестве примера была рассмотрена ампула №19 с раствором ацетона:

$$\epsilon_a = \epsilon_n = 20,74; \quad \sigma_n = 10^{-9} \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1},$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \epsilon'_0 = 75,9; \quad \sigma_0 = 10^{-4} \text{—} 10^{-5} \text{ С}\cdot\text{мм}^{-1}.$$

Эти значения подтверждают справедливость условия (8) при формировании уровней сигналов от органических растворов.

**Заключение.** Рассмотренная на примере водных растворов количественная электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования подтверждает гипотезу о том, что достоверную информацию о веществе и процессах, происходящих в нем под воздействием различных факторов, можно получить с поверхности вещества, основываясь на уровне информационного сигнала, который связан со значениями диэлектрической проницаемости и проводимости этого вещества и их изменениями при наличии внешнего воздействия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балошин Ю. А. и др. Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 37—43.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 865 с.
3. Самойлов В. О. Медицинская биофизика. СПб: Спец. лит., 2007. 560 с.
4. Кинг Р. Антенны в материальных средах. М.: Мир, 1984. 824 с.



*Сведения об авторах*

- Юрий Александрович Балошин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики
- Анатолий Александрович Сорокин** — канд. техн. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра радиоэлектронных систем управления, Санкт-Петербург;  
E-mail: an\_sor@mail.ru
- Александр Николаевич Волченко** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики;  
E-mail: wolf2684@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
физики

Поступила в редакцию  
22.06.11 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 536.6

Н. В. ПИЛИПЕНКО, Д. А. ГЛАДСКИХ

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрен перспективный нестационарный метод восстановления проходящих через ограждающие конструкции различных зданий и сооружений тепловых потоков на основе дифференциально-разностных моделей процесса теплопереноса.

*Ключевые слова:* тепловой поток, параметрическая идентификация, температура, дифференциально-разностная модель, ограждающие конструкции.

**Введение.** Проблема энергосбережения является важной частью социально-экономической политики государства. В 2009 г. был утвержден Федеральный закон № 261 „Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации“. Особое внимание в нем уделено энергетической эффективности зданий, строений, сооружений, поскольку значительная часть территории России находится за Полярным кругом, где отопительный сезон достигает 300 дней в году. Наиболее жесткие требования по эффективному использованию тепловой энергии предъявляются к жилым зданиям и сооружениям. Удельное энергопотребление жилых зданий в России (85 Вт·ч/м<sup>2</sup>·К·сут) существенно выше, чем в зарубежных странах (Швеция — 34, США — 44) [1].

Теплозащита отапливаемого здания является одним из важнейших эксплуатационных критериев оценки его качества, поскольку от этого показателя зависят благоприятный микроклимат зданий, тепловые потери в зимнее время, температура внутренней поверхности ограждения. Эта характеристика определяет расходы на отопление помещений и поддержание в них нормативного микроклимата.

**Постановка задачи и метод решения.** Одним из наиболее важных теплоэнергетических показателей зданий и сооружений является сопротивление теплопередаче элементов ограждающих конструкций (несущие стены, перекрытия, кровля, окна, двери и другие аналогичные конструктивные элементы зданий и сооружений), под которым обычно понимают сумму конвективных сопротивлений на наружной и внутренней поверхностях стен и суммарное кондуктивное сопротивление слоев ограждающей конструкции (ОК):

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{вн}}$  и  $\alpha_{\text{нар}}$  — коэффициенты теплоотдачи от воздуха к внутренней поверхности ОК и от наружной поверхности ОК к наружному воздуху,  $h_i$  и  $\lambda_i$  — толщина (м) и теплопро-

водность (Вт/м·К)  $i$ -го слоя. В уравнении (1) предполагается идеальный тепловой контакт между слоями ОК.

Как следует из литературы [2], вклад первого и последнего членов в правой части уравнения (1) в общее сопротивление незначителен и в зависимости от конструкции ОК не превышает 5 %.

Для качественной и, что важнее, количественной оценки величины тепловых потерь, возникающих при эксплуатации зданий и сооружений, необходимо определить тепловое сопротивление ОК. При этом принципиально возможно использовать два подхода: нестационарный и стационарный. Сильной стороной нестационарного подхода определения теплового сопротивления ОК является относительно малое время измерений, необходимое для расчетов (менее одного рабочего дня).

При стационарном подходе время измерений составляет 15 суток и более [3, 4]. Авторы на основе расчетно-экспериментальных исследований утверждают, что установившееся тепловое состояние ОК в зависимости от тепловой инерции достигается в течение 120—150 часов. При этом необходимо выполнять многократные измерения температурного напора  $\Delta t(\tau)$  (разности температуры воздуха внутри и вне помещения).

Предложенный А. В. Шишкиным [1] подход заключается в решении в общем виде дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с начальными и граничными условиями с дальнейшей подстановкой результата в уравнение теплового баланса на поверхности теплообмена с атмосферой. Как утверждает автор, при этом подходе можно получить решение только для наружной поверхности ОК. Но приведенные в работе [1] формулы для расчета температуры и удельного теплового потока на наружной поверхности ОК громоздки и малоприспособны для использования. Однако подход, основанный на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопередачи, является перспективным. Применять его возможно практически в любое время года, в неотапливаемых помещениях, его реализация не требует продолжительного времени.

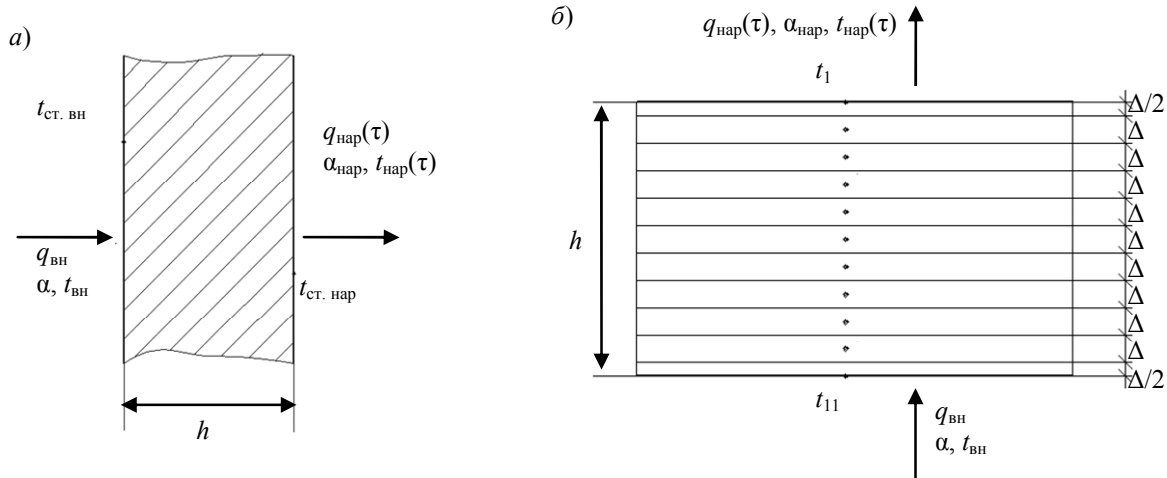
Представим метод решения задачи с помощью параметрической идентификации тепловых потоков и уточнения теплофизических свойств материалов ОК [5]. Поскольку системой теплоснабжения температура внутри помещения поддерживается практически постоянной, то на величину тепловых потерь существенно влияют коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ОК и температура наружного воздуха. Термическое сопротивление ОК с изменением температуры внутренней поверхности стенки изменяется незначительно, поэтому, измерив температуру наружной поверхности ОК и рассчитав или измерив удельный тепловой поток через исследуемый участок ОК, можно вычислить термическое сопротивление рассматриваемого участка ОК.

Динамика одномерного теплопереноса в ОК может быть описана системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Математические модели, в которых выполнена дискретизация пространства теплопереноса вдоль одной оси, а время считается непрерывным, принято называть дифференциально-разностными моделями (ДРМ) [6].

Предлагается использовать ДРМ в качестве основной универсальной модели теплопереноса в одномерных стенках ОК различных тепловых схем. В качестве примера рассмотрим однородную стенку, которая может быть представлена в виде теплоизолированной на боковой поверхности пластины толщиной  $h = 0,2$  м с теплофизическими свойствами:  $\lambda = 0,076$  Вт/м·К,  $c\rho = 1,69 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>3</sup>·К, где  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  — теплопроводность, теплоемкость, плотность материала ОК. На рисунке приведены тепловая схема (а) и топология (б) ОК в виде пластины ( $t_{ст.вн}$  и  $t_{ст.нар}$  — температура внутренней и наружной стенки соответственно,  $q$  — тепловой поток).

Для построения ДРМ пластину по толщине  $h$ , разбиваем на  $n$  слоев (в данном случае  $n = 11$ ) с температурой  $t_1, t_2, \dots, t_{11}$ . Средние значения температуры слоев, отнесенные к их

центрам, составляют вектор состояния пластины. При этом для расчетов толщину граничных слоев удобно установить как  $\Delta/2$ , а средние значения их температуры —  $t_1$  и  $t_{11}$  — отнести к торцевым поверхностям.



Для каждого слоя составим уравнение теплового баланса между изменением его теплоемкости и потоками тепла от соседних слоев, а для граничных слоев — от внешней и внутренней среды при постоянных теплофизических характеристиках. Проведя преобразование уравнений, получим ДРМ в развернутой форме:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{d\tau} = -\frac{2a}{\Delta^2}t_1 + \frac{2a}{\Delta^2}t_2 - \frac{2q}{c\rho\Delta}, \\ \dots \\ \frac{dt_i}{d\tau} = \frac{a}{\Delta^2}t_{i-1} - \frac{2a}{\Delta^2}t_i - \frac{a}{\Delta^2}t_{i+1}, \\ \dots \\ \frac{dt_{11}}{d\tau} = \frac{2a}{\Delta^2}t_{10} - \left(\frac{2\alpha}{c\rho\Delta} + \frac{2a}{\Delta^2}\right)t_{11} + \frac{2\alpha}{c\rho\Delta}t_{cp}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $a = \lambda/c\rho$  — температуропроводность материала пластины.

Окончательно ДРМ (2) можно записать в векторно-матричной форме [3]:

$$\frac{d\mathbf{T}}{d\tau} = F\mathbf{T} + G\mathbf{U}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{T} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{11}]^T$  —  $(11 \times 1)$ -вектор состояния,  $\mathbf{U} = q(\tau)$  —  $(1 \times 1)$ -вектор управления (входных воздействий),  $G = \left[ \begin{array}{cccc} -2 & 0 & 0 & \dots & \frac{2\alpha}{c_3\rho_3\Delta_3} \\ c_1\rho_1\Delta_1 & & & & \end{array} \right]^T$  —  $(11 \times 1)$ -матрица управления. Матрица обратных связей  $F$  размерности  $(11 \times 11)$  имеет обычную трехдиагональную форму.

Предложенный подход был использован при восстановлении плотности теплового потока по измеренным значениям температуры наружного воздуха для ряда зданий Вологодской области [1].

**Заключение.** Полученные в настоящей статье результаты хорошо совпадают с данными, приведенными в работе [1]. Изложенная методика прошла многократную апробацию как для восстановления тепловых потоков, так и для уточнения теплофизических свойств материалов ОК, и в настоящее время используется различными организациями [5].

В работе рассмотрен перспективный нестационарный метод восстановления тепловых потоков, проходящих через ОК различных зданий и сооружений, который позволяет проводить исследования в режиме реального времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкин А. В. Разработка методики расчета теплового сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с использованием тепловизионной диагностики. Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2001.
2. ГОСТ 26254-84 Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.
3. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотметрии. Ч. 1 // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 8. С. 50—54.
4. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотметрии. Ч. 2 // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 10. С. 67—71.
5. Пилипенко Н. В., Сиваков И. А. Метод определения нестационарных тепловых потоков и теплопроводности путем параметрической идентификации // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 48—51.
6. Pilipenko N. Parametrical identification of differential-difference heat transfere models in non-stationary thermal measurements // Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39, N 4. P. 311—315.

*Сведения об авторах*

- Николай Васильевич Пилипенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: pilipenko38@mail.ru
- Дмитрий Аркадьевич Гладских** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: gladskih@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики  
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
14.04.11 г.

---

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК 546.711.620.18

А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ, Ю. А. ГАТЧИН, В. Л. ТКАЛИЧ, К. В. ДУКЕЛЬСКИЙ

### ИССЛЕДОВАНИЯ ФТОРИДНЫХ НАНОКЕРАМИК

Экспериментально исследованы свойства фторидных нанокерамик и даны рекомендации по их применению.

**Ключевые слова:** фторидная нанокерамика, спектры люминесценции.

Анализ развития устройств, обладающих высокой радиационной стойкостью и повышенной оптической однородностью, показывает, что прогресс в этой области будет в значительной мере связан с использованием фторидных материалов. Основанием для этого являются фундаментальные свойства фторидов. Поэтому задача исследования спектрально-люминесцентных свойств фторидных нанокерамик, таких как  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$ , является актуальной.

Приготовление образцов  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$  осуществлялось в Научно-исследовательском и технологическом институте оптического материаловедения ВНЦ „ГОИ им. С.И. Вавилова“ методом горячего прессования порошка в высокотемпературной вакуумной печи.

Экспериментально исследованы спектры люминесценции, отражения и возбуждения люминесценции образцов фторидных нанокерамик  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$ , а также природной нанокерамики  $\text{CaF}_2$  Суранского месторождения. Экспериментальное измерение кинетики затухания показало, что время затухания кросслюминесценции в  $\text{BaF}_2$  составляет  $\tau \sim 0,8$  нс.

В широком спектральном диапазоне спектрально-люминесцентные свойства нанокерамик  $\text{CaF}_2$  и  $\text{BaF}_2$  сравнивались с аналогичными свойствами монокристаллов того же состава.

С учетом того, что фторидная нанокерамика обладает рядом улучшенных спектрально-люминесцентных и физических свойств [см. лит.], можно рекомендовать использовать ее в коротковолновой области спектра вместо монокристаллов.

#### ЛИТЕРАТУРА

Палашов О. В., Хазанов Е. А., Мухин И. Б., Миронов И. А., Смирнов А. Н., Дукельский К. В., Федоров П. П., Осико В. В., Басиев Т. Т. Сравнение оптических характеристик монокристалла и оптической керамики  $\text{CaF}_2$  // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 1. С. 27—28.

#### Сведения об авторах

**Анатолий Григорьевич Коробейников**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: Korobeynikov\_A\_G@mail.ru

**Юрий Арменакович Гатчин**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; заведующий кафедрой; E-mail: Gatchin@mail.ifmo.ru

**Вера Леонидовна Ткалич**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: Vera\_Leonidovna\_Tkalich@mail.ru

**Константин Владимирович Дукельский**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; доцент; E-mail: KDukel@GOI.ru

Рекомендована кафедрой  
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию  
11.05.11 г.

УДК 681.2:535.8

В. М. ВОЛЫНКИН, В. С. ЕРМОЛАЕВ, Д. С. КОВАЛЕВ, Б. П. ПАПЧЕНКО

## НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВУЮ ГЕТЕРОСТРУКТУРУ УФ-ДИАПАЗОНА

Исследована возможность нанесения защитного просветляющего покрытия на полупроводниковую поверхность гетероструктуры УФ-диапазона. Показано, что специально приготовленный раствор на основе стандартной эпоксидной композиции ЭК-54 позволяет получать слои без существенного изменения объема (менее 1 %), а также снизить потери излучения, генерируемого полупроводниковой структурой, на 11 %.

**Ключевые слова:** *УФ-диапазон, полупроводниковая гетероструктура, просветляющее покрытие.*

В настоящее время активно расширяется применение светодиодных модулей в диапазоне спектра от ИК- до УФ-диапазона. В частности, авторы настоящей работы исследуют особенности использования УФ-излучения для решения задач в сфере экологии (очистка воды и воздуха) и космического приборостроения. Стандартные технологические приемы по защите и просветлению оптических поверхностей, освоенные в ходе создания оптико-механических устройств [1], в основном заключаются в нанесении различных покрытий на оптическую поверхность в условиях относительного вакуума и повышенной температуры.

В задачи настоящей работы входило исследование возможности нанесения просветляющего защитного (протектирующего) слоя на оптическую поверхность полупроводниковой структуры, генерирующей излучение с длиной волны 365 нм, для повышения механической стойкости поверхности. Авторы ожидали снижения потерь излучения при выходе его через высокопреломляющую ( $n \sim 2,9$ ) внешнюю поверхность полупроводниковой структуры благодаря нанесению защитного покрытия на полупроводниковую структуру. Защитное покрытие представляло собой слой эпоксидного раствора (ЭР) на основе стандартной эпоксидной композиции (ЭК-54), получаемого за счет глубокой очистки и добавки микродоз сенсибилизирующих веществ.

Предварительные исследования свойств ЭР в ходе полимеризации показали, что объемные изменения слоя ЭР не превысили 1 %, поперечные и продольные напряжения на поверхности слоя отсутствуют. Отсутствие напряжений в слое при полимеризации проверялось по стандартной методике контроля [2] в скрещенных поляроидах в видимой области спектра. Как и предполагали авторы, нанесение защитного покрытия с показателем преломления  $n \approx 1,47$  на высокопреломляющую поверхность снизило потери излучения на 11 % при выходе

его через внешнюю поверхность полупроводниковой структуры. В ходе исследований была отработана технология нанесения защитного покрытия на кристаллы  $1 \times 1$  мм без нарушения свойств поверхностного слоя кристалла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № 02.523.12.3028.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977.
2. Креопалова Т. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987.

#### Сведения об авторах

- Валерий Михайлович Волюнкин** — канд. хим. наук; НИТИОМ ВНЦ „ГОИ им. С.И. Вавилова“, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник; E-mail: vvolynkin@yandex.ru
- Владимир Сергеевич Ермолаев** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; старший научный сотрудник; E-mail: vermolaev@yahoo.com
- Дмитрий Сергеевич Ковалев** — ООО „Энергия УФ“, Всеволожск, Ленинградская обл.; младший научный сотрудник; E-mail: d.s.kovalev@mail.ru
- Борис Петрович Папченко** — ООО „Энергия УФ“, Всеволожск, Ленинградская обл.; генеральный директор; E-mail: b.p.papchenko@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
лазерной техники  
и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию  
23.09.11 г.

УДК 681.78

## А. А. МАРАЕВ, А. В. ПАНТЮШИН, А. Н. ТИМОФЕЕВ, С. Н. ЯРЫШЕВ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ

Рассмотрены возможности метода оценки координат изображений реперных меток в синей и красной областях спектра на матричном приемнике, реализованного по шаблону Байера.

**Ключевые слова:** спектрально-зональный метод, оптико-электронная система, оценки координат изображений меток.

При долговременном оперативном контроле пространственного положения элементов конструкций с целью предупреждения катастроф [1] распределенные оптико-электронные системы (РОЭС) имеют ряд преимуществ по точности и быстродействию [2]. Метод спектрально-зональной селекции [3] при определении координат изображений активных реперных меток (РМ) на едином матричном фоточувствительном поле (МФП) позволяет ослабить влияние воздушного тракта на работу таких РОЭС. Наиболее доступной реализацией указанного метода является использование независимых каналов RGB единого МФП, что позволяет синхронно оценивать положения изображений меток в нескольких спектральных диапазонах. В настоящем исследовании ставилась цель оценить погрешности определения координат



изображений РМ — полупроводниковых излучающих диодов (ПВД) белого цвета — в синей и красной областях спектра на едином МФП.

Теоретические исследования доказали, что при синхронной обработке изображений РМ на МФП с целью получения истинных пространственных координат РМ следует учитывать пространственное расположение синих и красных элементов МФП: необходимо вводить поправку на расположение и размер пиксела МФП.

Экспериментальные исследования на физической модели РОЭС с камерой VEC-545 (матрица КМОП OV5620 с размером пиксела 2,2×2,2 мкм, объектив „Юпитер-9“ с фокусным расстоянием 80 мм), РМ — ПВД FYL3914WC, управляемый программой, разработанной в среде LabView) показали, что смещение центров изображения РМ в красном и синем каналах относительно зеленого (калибровочного) составляет 0,5 пиксела при среднеквадратическом отклонении (СКО) не более 0,08 пиксела.

Как и ожидалось, даже при небольшом температурном градиенте воздушного тракта (0,01 °С/м) разница между координатами центров изображений РМ в разных каналах для дистанции 6 метров достигла 0,34 пиксела, что доказывает принципиальную реализуемость метода. При этом СКО определения центра изображения РМ выросло до 1,5 пиксела во всех каналах, что отражает воздействие турбулентности, вызванной нагревом воздушного тракта.

Проведенные исследования подтверждают возможность практического использования спектрально-аналитического метода для компенсации вредного воздействия воздушного тракта на работу РОЭС и определяют необходимость дальнейших углубленных исследований по оптимизации структур таких систем.

Работа проводится в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. по государственному контракту № П1112 от 26 августа 2009 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатинский Е. М., Кортаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (67). С. 130.
2. Андреев А. Л., Ярышев С. Н. Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения: Метод. указания к лабораторным работам. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 52 с.
3. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга; Логос, 2007. 192 с.

#### Сведения об авторах

- Антон Андреевич Мараев** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: antoshka87@gmail.com
- Антон Валерьевич Пантюшин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: pantyushin@ya.ru
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; старший научный сотрудник; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Сергей Николаевич Ярышев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: ysn63@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
25.02.11 г.

---

---

## ИНФОРМАЦИЯ

---

---

В издательстве Санкт-Петербургского государственного политехнического института подготовлена к публикации монография М. Г. Томилина и Г. Е. Невской „Фотоника жидких кристаллов“ объемом 618 с. под научной редакцией д. ф.-м. н. В. В. Данилова.

Монография посвящена направлению прикладной оптики, связанному с разработкой и применением оптических приборов на основе жидких кристаллов (ЖК). Успехи, достигнутые в синтезе широкого класса жидкокристаллических материалов, изучение их физических свойств и оптических эффектов, а также разработка новых технологий позволили создать новую элементную базу оптического приборостроения. Разработанные элементы в ряде случаев обладают уникальными свойствами, что привело к существенному прогрессу в развитии оптических приборов. К важнейшим достижениям следует отнести возможность плавного и локального управления параметрами излучения: светопропусканием, светорассеянием, преломлением, отражением и поглощением света, цветовыми характеристиками и др.

В книге приведена классификация ЖК, описаны их структура и свойства. Рассмотрены основные оптические эффекты в жидкокристаллических материалах, которые нашли применение в современных информационных технологиях. Описаны возможности применения ЖК в дисплеях, составляющих основу современных систем отображения информации, в оптических устройствах, а также в качестве регистрирующих сред. Применение ЖК в оптических приборах приводит к улучшению эксплуатационных параметров и расширению их возможностей, в ряде случаев уникальных. Использование ЖК в качестве регистрирующих сред позволяет осуществлять запись голографических решеток и детектирование полей различной физической природы (электрических, магнитных, световых, температурных и полей межмолекулярных взаимодействий). Они могут работать как в реальном масштабе времени, так и с памятью.

Книга предназначена для научных сотрудников, работающих в области фотоники жидких кристаллов, а также для студентов и аспирантов.



## SUMMARY

P. 5—9.

### ASSESSMENT OF INFORMATION SYSTEM PROTECTABILITY ON THE BASE OF DEVELOPMENT OF TREE OF SOCIAL ENGINEERING ATTACK

An approach to the problem of information system protectability assessment is developed as an outgrowth of the method proposed by the authors earlier. The new approach is based on development of trees of socio-engineering attacks. The concepts of model and construction related to the possibility of account for socio-engineering attacks are introduced.

**Keywords:** information security, security analysis, information system, social engineering attacks, protection criterion.

#### *Data on authors*

- Igor V. Kotenko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Computer Security Problems; Head of Laboratory;  
E-mail: ivkote@comsec.spb.ru
- Mikhail V. Stepashkin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Computer Security Problems; Scientist;  
E-mail: stepashkin@comsec.spb.ru
- Dmitry I. Kotenko** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Computer Security Problems;  
E-mail: dmitrykotenko1986@gmail.com
- Elena V. Doynikova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, Laboratory of Computer Security Problems; E-mail: doynikova@comsec.spb.ru

P. 10—16.

### METHODS OF MEASURING INFORMATION PROCESSING AND ESTIMATION OF MEASURING ACCURACY IN STEREOSCOPIC SYSTEM FOR CONTROL OVER OBJECT SPATIAL DISPLACEMENTS

Methods of measuring information processing in stereoscopic system for the control over object spatial displacements are considered. Possibility of using perturbation theory for estimation of systematic and accidental errors in stereoscopic measuring system is justified.

**Keywords:** perspective transformation, stereoscopic system, singular decomposition, perturbation theory, measurement accuracy.

#### *Data on authors*

- Konstantin G. Arakantsev** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Junior Scientist; E-mail: kostya3312@mail.ru, kostya3312@yandex.ru
- Dmitry V. Zhukov** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems;  
E-mail: dzhukov@gmail.com
- Igor A. Konyakhin** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems;  
E-mail: igor@grv.ifmo.ru

## P. 17—21.

**ANALYSIS OF EFFICIENCY OF FRACTAL METHODS OF COMPRESSION OF BIOMEDICAL IMAGES ON THE BASE OF THE MINIMAL DESCRIPTION LENGTH PRINCIPLE**

An investigation on efficiency of fractal compression methods as applied to microscopic images of blood cells is carried out. The efficiency estimation is performed on the base of minimal description length principle, which made it possible to merge particular criteria of compression ratio and data loss. Fractal representations for the images under consideration are shown to be less effective than other types of image compression.

**Keywords:** fractal compression, image compression, remote medicine, representational minimum description length.

*Data on authors*

- Igor P. Gurov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology; Head of Department; E-mail: ckyznetsov@gmail.com
- Vadim V. Okunev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology; Junior Scientist; E-mail: vadik-okunev@yandex.ru
- Alexey S. Potapov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Photonic Information Technology; E-mail: pas.aicv@gmail.com

## P. 22—29.

**ROBUST CONTROL OVER A LINEAR OBJECT OF PURE DELAY WITH THE USE OF QUADRATIC METHODS OF SYSTEM SYNTHESIS**

Synthesis of a robust controller for an object of pure delay is performed for expanded object model. The model is derived as a result of compulsory separation of the object motions and solution for the problem of  $H_2$ -optimal control and analytical design of optimal controllers for objects of pure delay.

**Keywords:** uncertainty, integral quadratic functional, random perturbations, linear theory, extended theory, damping.

*Data on authors*

- Olga A. Remizova** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Department of Automation of Processes in Chemical Industry; E-mail: remizova-oa@yandex.ru
- Irina V. Rudakova** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Department of Automation of Processes in Chemical Industry; E-mail: rudakowa@ws01.sapr.pu.ru
- Vladislav V. Syrokvashin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Department of Automation of Processes in Chemical Industry
- Alexander L. Fokin** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Department of Automation of Processes in Chemical Industry; E-mail: fokin\_sa@mail.ru

## P. 30—33.

**CONTROL OVER LOAD MOVEMENT BY BRIDGE CRANE USING THE METHOD OF INVERSE PROBLEM OF DYNAMICS**

The problem of control over cargo shifting by means of overhead type crane is analyzed with the use of the method of inverse problems of dynamics. The results of numerical simulations are presented.

**Keywords:** overhead crane, inverse problem of dynamics.

*Data on authors*

- Sergey A. Kabanov** — Dr. Techn. Sci., Professor; D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOEN-MEH”, Department of Information Processing Systems and Control, St. Petersburg; E-mail: kaba-sa@mail.ru
- Eugeny N. Nikulin** — Dr. Techn. Sci., Professor; D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOEN-MEH”, Department of Destruction Means and Ammunition, St. Petersburg; E-mail: enikulin@onixmail.ru
- Boris E. Yakushev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Department of Theoretical Mechanics; E-mail: yakushev.spb@mail.ru
- Darya B. Yakusheva** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University, Department of Information Systems; E-mail: dariayakusheva@gmail.com

**P. 34—40.**

### **AUTOMATIC DIFFERENTIATION OF FUNCTION DETERMINED BY ITS PROGRAM CODE**

Dual numbers algebra is formulated as formalism for automatic differentiation of function determined by its program code. Specific characteristics of dual numbers necessary for this application are presented.

**Keywords:** automatic differentiation, dual numbers.

*Data on author*

- Konstantin K. Semenov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Polytechnical University, Department of Measuring Information Technologies; E-mail: semenov.k.k@gmail.com

**P. 40—46.**

### **APPLICATION OF STIMULATED ELECTRO-PHOTON EMISSION TO ANALYSIS OF LIQUIDS**

Computerized system for evaluation of parameters of liquids, based on recording and computer processing of stimulated electro-photon emission from the liquid surface known as Gas Discharge Visualization (GDV) technique has been developed. High sensitivity of the method is demonstrated for various liquids such as water, blood, saliva, microbiological cultures, and oils. Hypothesis is proposed that GDV parameters are determined by the structure of clusters at the liquid surface.

**Keywords:** electro-photonics, structured water, water energy, GDV, quality of water, essential oils.

*Data on authors*

- Konstantin G. Korotkov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: kk@korotkov.org
- Dmitry V. Orlov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: mityaorlov@gmail.com
- Elena N. Velichko** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design

P. 47—50.

### APPROACH TO THE AUTOMATED UNCERTAINTY ESTIMATION OF DIMENSIONAL MEASUREMENTS

An approach to the problem of automated uncertainty estimation of dimensional measurements with digital image processing is presented. The proposed method does not require any extensive supplemental experiments. Aprobation of the method is carried out with measurements of industrial objects with mean percental deviation of 5 % from empirically estimated values.

**Keywords:** measurement uncertainty, image processing, uncertainty propagation, probability density function (PDF), Monte-Carlo method.

#### *Data on authors*

- Karina Weissensee* — TU Ilmenau, Suhl, Germany; Department of Quality Assurance;  
E-mail: karina.weissensee@tu-ilmenau.de
- Galina A. Polte* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: galinkan@rambler.ru
- Gerhard Linss* — Professor; TU Ilmenau, Suhl, Germany; Department of Quality Assurance

P. 51—56.

### NEURO-FUZZY VOLTAGE CONTROLLER FOR THE OBJECT OF MANAGEMENT

Neuro-fuzzy voltage controller for the object of management (brushless synchronous generator with damping coil) is described. The controller combines advantages of fuzzy controller and neural network on adaptive neurons. Description of three-level neural network of adaptive voltage controller defuzzifier is included.

**Keywords:** brushless synchronous generator with damping coil, linguistic variable, term, grade of membership, fuzzification, adaptive neuron, activation function, offset.

#### *Data on authors*

- Yury N. Khizhnyakov* — Cand. Techn. Sci.; Perm State Technical University, Department of Automatics and Telemechanics; E-mail: luda@at.pstu.ac.ru
- Alexander A. Yuzhakov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Perm State Technical University, Department of Automatics and Telemechanics; E-mail: uz@at.pstu.ac.ru

P. 57—61.

### COORDINATION OF INTERACTION OF WIND GENERATORS IN A LOCAL ENERGY SYSTEM

Theoretical basis for synthesis of coordinating control over operation of local energy grid using wind power plants is considered. The control system provides a group management of active and reactive power through coordinated redistribution of load between the given set of generating units.

**Keywords:** local energy grid, wind energy generator, model, steady-state mode, coordinating operation.

#### *Data on authors*

- Vladimir N. Efanov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Ufa State Aviation Technical University, Department of Aircraft Device Building; Head of the Department; E-mail: efanov@mail.rb.ru
- Timerbulat U. Yenikeev* — Post-Graduate Student; Ufa State Aviation Technical University, Department of Aircraft Device Building; E-mail: tibulus@list.ru

P. 62—67.

### INVESTIGATION OF POLYMERIC PERIODICAL STRUCTURES FORMATION PROCESS AT UV-CURING COMPOSITION MATERIALS BY LASER INTERFERENCE LITHOGRAPHY METHOD

The process of periodical structure formation at UV-curing monomer compositions and nanocomposites with self-organization effects by photopolymerization at submicron volume of materials by laser interference lithography method is investigated. Dependence of diffraction characteristics of polymeric periodical structures on material composition, exposure conditions, and post-exposure development is established. Possible mechanisms of self-organization and their connection to chemical composition of materials are considered.

**Keywords:** UV-curing material, nanocomposite, self-organization, periodical structure, laser interference lithography, volume microstructure, diffraction efficiency.

#### *Data on authors*

- Nadezhda D. Vorzobova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; E-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru
- Yulia E. Burunkova* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems
- Vera G. Bulgakova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; E-mail: vera-bulgakova@yandex.ru
- Igor Yu. Denisyuk* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru
- Nina M. Kalinina* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems

P. 68—73.

### ELECTRODYNAMIC MODEL OF THE NEAR-FIELD HIGH FREQUENCY METHOD OF PHYSICAL OBJECTS PROBING

An electrodynamic model near-field high frequency method of physical objects probing is considered for the case of organic and inorganic solutions in distilled water. Signal from the object surface is shown to contain information on the bulk physical objects and inside processes. The information signal is described for the most part by the dielectric conductivity of the physical object.

**Keywords:** electrodynamic model, near-field high frequency probing method, dielectric conductivity, information signal.

#### *Data on authors*

- Yury A. Baloshin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physics
- Anatoly A. Sorokin* — Cand. Techn. Sci.; D. F. Ustinov Baltic State Technical University “VOENMEH”, Department of Radioelectronic Control Systems, St. Petersburg; E-mail: an\_sor@mail.ru
- Alexander N. Volchenko* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physics; E-mail: wolf2684@mail.ru

P. 74—77.

### NONSTATIONARY THERMAL MEASUREMENTS OF BUILDING ENVELOPE

A promising method for restoring of nonstationary heat flux through QA of various buildings and facilities is presented. The main advantage of the nonstationary method is a relatively low time necessary for its implementation in practice (less than one workday).

**Keywords:** heat flow, parametric identification, temperature, differential-difference model, building envelope.

#### *Data on authors*

- Nikolay V. Pilipenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: pilipenko38@mail.ru
- Dmitry A. Gladskih* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: gladskih@gmail.com

P. 78—79.

### STUDIES OF FLUORIDE NANOCERAMICS

Properties of fluoride nanoceramics are experimentally investigated, and recommendations concerning application of the materials are formulated.

**Keywords:** fluoride nanoceramics, luminescence spectra.

#### *Data on authors*

- Anatoly G. Korobeynikov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: Korobeynikov\_A\_G@mail.ru
- Yury A. Gatchin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; Head of the Department; E-mail: Gatchin@mail.ifmo.ru
- Vera L. Tkalich* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: Vera\_Leonidovna\_Tkalich@mail.ru
- Konstantin V. Dukel'sky* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: KDukel@GOI.ru

P. 79—80.

### APPLICATION OF PROTECTIVE ANTIREFLECTION COATING ON SEMICONDUCTOR HETEROSTRUCTURE IN THE UVA RANGE

The possibility of applying a protective antireflective coating on semiconductor heterostructure surface in the UVA range is examined. It is shown that a specially prepared solution based on standard epoxy-54 EC makes it possible to obtain layers without a significant change in the volume (less than 1 %), as well as reduce losses of radiation generated by the semiconductor structure by 11 %.

**Keywords:** UVA range, semiconductor heterostructures, antireflecting coating.



*Data on authors*

- Valery M. Volynkin* — Cand. Chem. Sci.; Scientific Research and Technological Institute of Optical Materials, S. I. Vavilov State Optical Institute All-Russian Center, St. Petersburg;  
E-mail: vvolykin@yandex.ru
- Vladimir S. Ermolaev* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Bio-Medicine Optics; Senior Scientist;  
E-mail: vermolaev@yahoo.com
- Dmitry S. Kovalev* — Energy UV ltd., Vsevolozhsk, Leningrad Region; Junior Scientist;  
E-mail: d.s.kovalev@mail.ru
- Boris P. Papchenko* — Energy UV ltd., Vsevolozhsk, Leningrad Region; Director General;  
E-mail: b.p.papchenko@gmail.com

P. 80—81.

**STUDY OF POSSIBILITIES OF THE MULTISPECTRAL SELECTION METHOD IN OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR ANTHROPOGENIC CATASTROPHES PREVENTION**

Possibilities of estimation of coordinates of reference marks image on matrix receiver in red and blue spectral bands are considered. The receiver is constructed according to the Bayer filter mosaic.

**Keywords:** multispectral method, optical-electronic system, coordinates estimation for reference marks image

*Data on authors*

- Anton A. Maraev* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems;  
E-mail: antoshka87@gmail.com
- Anton V. Pantyushin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems;  
E-mail: pantyushin@ya.ru
- Alexander N. Timofeev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Senior Scientist; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Sergey N. Yaryshev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems;  
E-mail: ysn63@mail.ru

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2011 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Араканцев К. Г., Жуков Д. В., Коняхин И. А.	Методы обработки измерительной информации и оценки погрешностей в стереоскопической системе контроля пространственного положения объектов	12
Бондаренко И. Б., Каляева Е. А., Кокшаров Д. Н.	Адаптация параметров генетического алгоритма для оптимизации сложных функций	9
Волынская А. В.	Особенности преобразования дискретных сигналов в цифровых каналах передачи информации	9
Воробьев С. Н., Гирина Н. В., Осипов Л. А.	Гауссовы марковские последовательности	1
Воронина И. Е.	Количественные оценки при моделировании языковой системы	5
Гатчин Ю. А., Донецкая Ю. В., Комарова И. Б.	Алгоритмы автоматизации проектирования изделий приборостроения	5
Гуров И. П., Окунев В. В., Потапов А. С.	Исследование эффективности фрактальных методов компрессии биомедицинских изображений с помощью принципа минимальной длины описания	12
Дроздов В. Н., Шефер Е. А.	Математические основы цифрового автотипного растривания	5
Кононенко М. Е., Копилевич Ю. И., Задорожная Е. И.	Влияние индикатрисы рассеяния морской воды на характеристики авиационного океанологического лидара	1
Котенко И. В., Степашкин М. В., Котенко Д. И., Дойникова Е. В.	Оценивание защищенности информационных систем на основе построения деревьев социоинженерных атак	12
Кулешов С. В.	Метод 3D-компрессии данных рентгеновской компьютерной томографии	1
Махов В. Е., Потапов А. И.	Использование алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования в системах технического зрения	9
Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.	Метод приближенного корректирующего оператора в задачах вариационного оценивания параметров движения космических аппаратов	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
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	1
Сеньченков В. И., Абсалямов Д. Р.	Выбор минимального множества контролируемых признаков для определения технического состояния системы	3
Ушаков А. В., Яицкая Е. С.	Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем	3

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Кабанов С. А., Никулин Е. Н., Якушев Б. Э., Якушева Д. Б.	Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном	5
Кабанов С. А., Никулин Е. Н., Якушев Б. Э., Якушева Д. Б.	Управление перемещением груза мостовым краном по методу обратных задач динамики	12
Петунин В. И., Фрид А. И.	Метод построения адаптивных логико-динамических систем автоматического управления с селекторами	5
Ремизова О. А., Рудакова И. В., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л.	Робастное управление линейным объектом с запаздыванием с применением квадратичных методов синтеза системы	12
Фоминов И. В., Малетин А. Н.	Алгоритм самонастройки маятникового автоколебательного акселерометра при воздействии периодических возмущений	9
Фургат И. Б.	Алгоритм субвариантного управления по выходу линейным структурно неопределенным динамическим объектом	9

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Коротков К. Г., Орлов Д. В., Величко Е. Н.	Применение метода газоразрядной визуализации для анализа различных жидкостей	12
Малинин А. А., Иванова Н. Ю.	Разработка универсальной модели электронного архива конструкторской документации с применением методологии IDEF	5
Маньлов И. В.	Оценка точности распознавания классов при автоматизированной обработке аэрофотоснимков	5
Никитин Ю. А.	Математическая модель формирования колебаний с использованием методов пассивного цифрового синтеза	9
Овсянников Е. П., Петров С. Е., Юрков К. В.	Сравнительный анализ сложности реализации быстрых цифровых преобразований на RISC-процессорах	9

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Польте Г. А., Саенко А. П.	Количественная оценка качества изображений с использованием методов нечеткой логики	3
Савков С. В., Шишкин В. М.	Разработка системы интервального оценивания информационных рисков	9
Семенов К. К.	Автоматическое дифференцирование функций, выраженных программным кодом	12
Сизиков В. С., Кривых А. В.	Применение способа эталонных примеров при решении обратной задачи спектроскопии методом регуляризации	9
Титенко Е. А., Семенихин Е. А.	Быстродействующий арбитр обработки запросов большой разрядности	5
Тозик В. Т.	Алгебраический метод определения полного множества простых разрезов в двухполюсных сетях	3

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А., Ульрих Т. А.	Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа	1
Емельянец Г. И., Блажнов Б. А., Лочехин А. В., Степанов А. П.	Выработка курса интегрированной навигационной системой на базе микромеханических датчиков	5

### ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

Амвросьева А. В., Мусалимов В. М.	Усталостное разрушение миниатюрного пьезоэлектрического схвата	1
Вайсензее К., Польте Г. А., Линс Г.	Автоматизированное определение погрешности геометрических измерений	12
Коваленко П. П., Мусалимов В. М.	Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений	1

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Абдуллин А. А., Толмачев В. А.	Система регулирования скорости двухмассового механизма с использованием наблюдателя	5
Балошин Ю. А., Сорокин А. А., Арсеньев А. В., Дудин М. Г., Волченко А. Н.	Метод диагностики функциональной активности тканей и органов биообъектов и устройство для его реализации	3
Борисов П. А., Лукичев Д. В.	Методики анализа и синтеза энергоподсистем приборных электроприводов	1

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Галайдин П. А., Мустафаев Ю. Н., Мустейкис А. И.	Измерение скорости процессов в детонационных трубах с использованием ионизационных регистраторов	5
Галалу В. Г.	Преобразователь код—напряжение для цифровых вольтметров	3
Демин А. В., Войтюк Т. Е.	Концептуальная модель автоматизированной системы контроля и управления процессом разработки многопластовых нефтяных месторождений	9
Ефанов В. Н., Еникеев Т. У.	Управление взаимодействием ветроэнергетических установок в составе локальной энергетической системы	12
Журавлев Ю. Н., Федоров Д. С.	Определение тягового усилия низкочастотного электродинамического вибровозбудителя	1
Зиатдинов С. И.	Дискретные алгоритмы дифференцирования с промежуточным сглаживанием отсчетов входного сигнала	3
Севастьянов В. В., Казмиров Э. К.	Многоканальное устройство для электровоздействия на органы и ткани группы пациентов	3
Сухов Т. М., Беляев Е. А.	Использование принципа постоянной цветовой яркости для передачи видеoinформации	1
Сясько В. А.	Геометрически подобные магнитоиндукционные преобразователи для толщиномеров защитных покрытий	9
Хижняков Ю. Н., Южаков А. А.	Нейро-нечеткий регулятор напряжения объекта управления	12
Янушковский А. Ю. Кривошейкин А. В.	Помехоустойчивость приема сигналов фазоамплитудной модуляции в условиях неидеальности квадратурных каналов	9

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Балошин Ю. А., Сорокин А. А., Волченко А. Н.	Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов	12
Белов Н. П., Гайдукова О. С., Панов И. А., Патяев А. Ю., Смирнов Ю. Ю., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д.	Лабораторный спектрофотометр для ультрафиолетовой области спектра	5
Ворзобова Н. Д., Бурункова Ю. Э., Булгакова В. Г., Денисюк И. Ю., Калинина Н. М.	Получение полимерных периодических структур в УФ-отверждаемых композиционных материалах методом лазерной интерференционной литографии	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Воронин А. А., Смирнова Е. В., Фаизов И. Н.	Алгоритмическая коррекция погрешностей портативного спектрофотометра	1
Городецкий А. Е., Дорошенко М. С., Тарасова И. Л., Коняхин И. А.	Анализ погрешностей системы управления автоколлиматора с активной компенсацией	5
Грамматин А. П., Цыганок Е. А.	Особенности вторичного спектра объективов коллиматоров, работающих в диапазоне длин волн 400—900 нм	9
Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б., Чуркин Ю. В.	Быстродействующий прибор для контроля угловой зависимости коэффициента отражения лазерного луча	3
Кирилловский В. К., Гаврилов Е. В., Жевлаков А. П.	Применение компьютерной изофотометрии при контроле объектива для нанолитографа	1
Кожевников В. И., Мерзляков П. Г., Валеев Г. Р.	Модернизация электростатических фотоэлектронных спектрометров ЭС-2401 и ЭС-3201	1
Коняхин И. А., Мерсон А. Д., Тимофеев А. Н.	Анализ проектных инвариантов для анаморфотных контрольных элементов оптико-электронных систем определения деформаций скручивания	3
Трофимов В. А., Прокопенко В. Т., Нагибин Ю. Т., Александров М. Е.	Анализ погрешности измерений векторных характеристик световой волны методом интерференционной поляриметрии	9

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Демин А. В., Сорокин А. В., Гордеев Д. М., Белянский М. А., Птицына А. С., Шалковский А. Г., Чуриков А. Б., Смолин А. С.	Авиационный теплопеленгатор	5
Емельянов А. Л.	Теплоотдача в воздушно-капельном потоке в системах охлаждения приборов	3
Емельянов А. Л., Платунов Е. С.	Кинетика испарения капель в системах охлаждения теплонагруженных элементов приборов	1

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Пилипенко Н. В., Гладских Д. А.	Нестационарная теплотметрия зданий и сооружений	12
Пилипенко Н. В., Казарцев Я. В.	Оптимальное планирование эксперимента при идентификации процессов теплообмена сенсоров теплового потока	5
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>		
Вейко В. П., Беженар Т. В., Чуйко В. А., Шандыбина Г. Д., Ярчук М. В.	Лазерная термохимическая технология микроstructuring пленок хрома	1
Путилин Э. С., Губанова Л. А.	Перспективы развития оптики тонких пленок	3
Фокина М. И., Собещук Н. О., Денисюк И. Ю.	Исследование процессов формирования полимерного микроэлемента на торце оптического волокна в условиях значительного ингибирующего влияния кислорода на процесс фотополимеризации	3
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>		
Андронов В. Г., Дегтярёв С. В., Клочков И. А., Волобуев Ю. Н.	Координатно-временная модель формирования космических сканерных изображений линейками матриц ПЗС	9
Безгодов А. А., Бухановский А. В.	Виртуальный полигон для исследования экстремальной динамики морских объектов на нерегулярном волнении	5
Войнов К. Н., Есбулатова А. Ж.	Оценка плотности несанкционированного заполнения межстенного пространства пассажирского вагона	3
Волынкин В. М., Ермолаев В. С., Ковалев Д. С., Папченко Б. П.	Нанесение защитного просветляющего покрытия на полупроводниковую гетероструктуру УФ-диапазона	12
Горбачев А. А., Зюзин В. В., Серикова М. Г.	Исследование многокоординатных оптико-электронных измерительных систем пространственного положения движущегося объекта относительно реперных точек	3
Захаров Д. Д.	Программная среда для решения задачи устранения коллимационных искажений при рентгеновском малоугловом рассеянии	9
Коробейников А. Г., Гатчин Ю. А., Ткалич В. Л., Дукельский К. В.	Исследования фторидных нанокерамик	12
Лебедько Е. Г., Серикова М. Г.	Анализ распределения интервалов между выбросами случайного процесса и возможность построения систем ближней оптической локализации с шумовой синхронизацией	5

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Мараев А. А., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н.	Исследование метода спектрональной селекции в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф	12
Семёнов А. В., Бухановский А. В.	Метрологический анализ в социальных сетях	3

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Агеев Э. И., Вейко В. П., Киеу К. К.	Модификация фоточувствительной стеклокерамики „Фотуран“ ультракороткими лазерными импульсами	2
Бессмельцев В. П., Булусhev Е. Д., Голошевский Н. В.	Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки	2
Вейко В. П., Волков С. А., Мутин Т. Ю., Смирнов В. Н.	О возможности спектроскопического контроля процесса лазерной очистки	2
Вейко В. П., Горный С. Г., Одинцова Г. В., Патров М. И., Юдин К. В.	Формирование многоцветного изображения на поверхности металлов при ее лазерном окислении	2
Вейко В. П., Петров А. А., Мазнев А. С., Евстафьев А. М., Калинина А. А.	Лазерная очистка рельсового пути	2
Вольнский М. А., Воробьева Е. А., Гуров И. П., Маргарянц Н. Б.	Бесконтактный контроль микрообъектов методами интерферометрии малой когерентности и оптической когерентной томографии	2
Кособукин В. А.	Ближнепольная микроскопия на основе линейного нанозонда	2
Кочетов А. Д., Петров А. А.	Лазерная гибка тонколистовых деталей импульсным излучением	2
Малкиель И. К.	Применение лазерных технологий при реставрации предметов искусства	2
Маркин Е. П., Лозовой А. К., Смирнов С. Н., Яхонтов Ю. Г.	Опыт промышленного применения лазерных технологических комплексов на базе волоконных генераторов	2



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Мухамедгалиева А. Ф., Бондарь А. М., Велесевич И. В., Зильбершмидт М. Г., Лаптев В. Б., Шведов И. М.	Образование периодических структур на поверхности силикатов при воздействии излучения CO <sub>2</sub> -лазера	2
Новиков Б. Ю., Чикалев Ю. В., Шахно Е. А.	Очистка объектов городской архитектуры от граффити	2
Резунков Ю. А.	Лазерная реактивная тяга	2
Самохвалов А. А., Ярчук М. В.	Лазерная очистка растрированных полиграфических валов	2
Сурменко Е. Л., Попов И. А., Соколова Т. Н.	Использование лазерной эмиссионной спектроскопии для анализа распределения химических элементов в лазерных сварных швах	2
Хайдуков Е. В., Храмова О. Д., Рочева В. В., Зуев Д. А., Новодворский О. А., Лотин А. А., Паршина Л. С., Поройков А. Ю., Тимофеев М. А., Унтила Г. Г.	Лазерное текстурирование кремния для создания солнечных элементов	2

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОТРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Афиногенов И. А., Конькин А. В., Эннс П. Б., Капустин А. Н.	Электростатические реле на базе МЭМС-технологии	4
Богданов К. В., Ловчиков А. Н.	Архитектура EDA-системы на основе конкурирующих параллельных процессов	4
Горностаев А. И.	Унификация интерфейсных модулей сопряжения блоков бортового комплекса управления	4
Горяшин Н. Н., Лукьяненко М. В., Соломатова А. А., Хорошко А. Ю.	Анализ режимов работы квазирезонансного преобразователя напряжения	4
Гришелёнок Д. А., Ковель А. А.	Использование результатов математического планирования эксперимента при формировании обучающей выборки нейросети	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Кашубский А. Н., Крушенко Г. Г.	Идентификация марок сплавов с использованием методов неразрушающего контроля	4
Ковель А. А., Покидько С. В.	Исследование элементной базы бортовой аппаратуры в условиях космического пространства	4
Ковель А. А., Покидько С. В.	Математическое планирование эксперимента в условиях факторной ниши	4
Кочура С. Г., Кузнецов Н. А., Носенков А. А.	О математическом моделировании электрических испытаний космических аппаратов связи	4
Лапко А. В., Лапко В. А.	Непараметрические алгоритмы распознавания образов в задаче проверки гипотезы о распределениях случайных величин	4
Лапко А. В., Лапко В. А., Хлопов А. Н.	Непараметрический алгоритм автоматической классификации статистических данных	4
Логанов А. А., Ямашев Э. М.	Моделирование характеристик насосов системы терморегулирования	4
Мизрах Е. А., Сидоров А. С.	Об абсолютной устойчивости процессов в имитаторах солнечных батарей	4
Покидько С. В., Кочура С. Г.	Корректировка результатов ресурсных испытаний электромеханических устройств при малых выборках	4
Федосов В. В., Орлов В. И.	Минимально необходимый объем испытаний изделий микроэлектроники на этапе входного контроля	4

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Алиев Т. И., Муравьева-Витковская Л. А.	Приоритетные стратегии управления трафиком в мультисервисных компьютерных сетях	6
Антонов В. Ф., Быстров С. В., Григорьев В. В.	Утилизация тепловой энергии при контактной сварке	6
Арановский С. В., Бобцов А. А., Пыркин А. А.	Синтез гибридного наблюдателя для линейного объекта в условиях гармонического возмущения	6
Бессмертный И. А.	Методы поиска информации в производственных системах	6
Бирюков Д. С., Ушаков А. В.	Грамманный подход к оценке энергетических затрат на управление в непрерывных системах при стационарных стохастических воздействиях	6
Бобцов А. А., Крылов А. В., Пыркин А. А.	Повышение точности оценки частоты синусоидального сигнала с использованием нелинейного фильтра	6

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бушуев А. Б., Быстров С. В., Григорьев В. В.	Анализ треугольных динамических структур	6
Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К., Рабыш Е. Ю., Рюхин В. Ю., Черевко Н. А.	Проектирование статических регуляторов в дискретных системах с периодически изменяющимися коэффициентами	6
Григорьев В. В., Быстров С. В., Наумова А. К., Рабыш Е. Ю., Черевко Н. А.	Использование условий качественной экспоненциальной устойчивости для оценки динамических процессов	6
Евстифеев М. И.	Основные этапы разработки отечественных микромеханических гироскопов	6
Захаров И. Д., Ожиганов А. А.	Использование порождающих полиномов М-последовательностей при построении псевдослучайных кодовых шкал	6
Ильина А. Г., Ловлин С. Ю., Тушев С. А.	Синтез ЛКГ-регулятора прецизионного следящего электропривода оси телескопа тракторных измерений	6
Ландау Б. Е., Белаш А. А., Гуревич С. С., Емельянцева Г. И., Левин С. Л., Романенко С. Г.	Бескарданная инерциальная система ориентации на электростатических гироскопах для орбитального космического аппарата	6
Овчинников И. Е., Егоров А. В.	Математическая модель вентильного двигателя поворотной платформы телескопа	6
Садовников М. А., Томасов В. С., Толмачев В. А.	Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства	6

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Анодина-Андриевская Е. М., Божокин С. В., Марусина М. Я., Полонский Ю. З., Суворов Н. Б.	Перспективные подходы к анализу информативности физиологических сигналов и медицинских изображений человека при интеллектуальной деятельности	7
Антонов С. Е., Марусина М. Я., Лямин А. В., Киселев С. С., Федосов Ю. В.	Программный инструментальный для исследования математических моделей прецизионных триподов	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Быченко В. А.	Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники	7
Быченко В. А., Кинжагулов И. Ю.	Лазерно-ультразвуковой контроль тонкостенных паяных соединений камер жидкостных ракетных двигателей	7
Виноградов Н. С., Воронцов Е. А.	Оптоволоконный базис для поверки дальномерного блока тахеометра	7
Виноградова А. А., Трутненко С. В.	Сравнительные особенности программ мультифрактального анализа	7
Воронцов Е. А., Виноградов Н. С.	Информационно-измерительные комплексы с применением биологической обратной связи	7
Дайнека Г. Б., Киселев С. С., Марусина М. Я., Мешковский И. К., Марусин М. П., Лопарёв В. А., Шугаев М. Н.	Двухкоординатная поворотная платформа	7
Иванов И. Ю., Васильев А. А., Взнуздаев М. Е., Воропаев Н. И., Каммель П., Кравцов П. А., Надточий А. В., Петров Г. Е., Петижан К., Трофимов В. А.	Криогенная времяпроекционная ионизационная камера для исследования процесса захвата мюона дейтроном в эксперименте MuSUN	7
Кинжагулов И. Ю.	Модель термооптического возбуждения ультразвуковых волн в паяных тонкостенных изделиях	7
Кирьянов К. А., Сизиков В. С.	Применение сигнальных микропроцессоров в задачах реконструкции искаженных изображений	7
Мешковский И. К., Унтилов А. А., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л.	Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа	7
Павлов И. В.	Современные требования к обеспечению единства измерений	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Терехин С. Н., Васильев А. А., Взнуздаев М. Е., Коченда Л. М., Иванов И. Ю., Киселев С. С., Марусина М. Я., Кравцов П. А., Надточий А. В., Трофимов В. А.	Приборная база эксперимента по исследованию сечения реакции $dd$ -ядерного синтеза с поляризованными компонентами в проекте PolFusion	7
Толкович Д. В.	Разработка учебного макета магнитно-резонансного томографа	7

## ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

## АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Андреев В. Л., Иванов Р. В., Козлов Е. Б., Потупчик С. Г., Соколов П. В.	Системы управления малоразмерными дистанционно пилотируемыми самолетами	8
Аро Х. О.	Применение методов робастного управления для стабилизации метеорологической ракеты	8
Богачева Н. А., Жуков А. Д., Жуков С. А.	Полунатурное моделирование системы антиюзовой автоматики самолета	8
Богословский С. В.	Дифференциальный чувствительный элемент на поверхностных акустических волнах с малым изменением частоты и фазовым кодированием	8
Власов С. А., Бураков В. В.	Подход к спецификации структурной модификации кода бортового программного обеспечения	8
Иванов Ю. П.	Метод адаптивной оптимальной фильтрации сигналов в навигационных комплексах	8
Лазарев И. В.	Дискриминационный метод повышения точности звездных координаторов с ПЗС-матрицами	8
Михайлов Н. В.	Автономная навигация космических кораблей с использованием одночастотного приемника сигналов GPS	8
Небылов А. В., Небылов В. А.	Принципы построения системы управления полетом тяжелого транспортного аппарата с экраным эффектом	8
Оводенко А. А., Красюк В. Н., Бестугин А. Р., Рыжиков М. Б.	Радиозаметность антенных окон гиперзвуковых летательных аппаратов	8

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Панферов А. И., Небылов А. В., Бродский С. А.	Математические модели сложных упругих аэрокосмических конструкций и программные средства для проектирования их систем управления	8
Северов Л. А., Золотарев С. К., Овчинникова Н. А., Панферов А. И., Пономарев В. К.	Информационные характеристики микромеханических гироскопов на основе кремниевой технологии микроэлектромеханических систем	8

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****КОНСТРУИРОВАНИЕ, ЮСТИРОВКА И МЕТРОЛОГИЯ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

Абакшина О. А., Егоров Г. В., Латыев С. М., Митрофанов С. С.	Модернизация конструкций фотоэлектрических индикаторов линейных перемещений	11
Бурбаев А. М., Зюзин В. В., Лукин М. Г., Марусов С. А., Мищенко В. И.	Применение дисперсионного элемента при настройке интерферометров типа Цендера — Маха	11
Бурбаев А. М., Леонтьева А. И., Одиноких Г. А., Френкель Д. А.	Применение инвариантных оптических систем в схемах контроля и юстировки ОЭП	11
Иванов А. Н.	Контроль геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционной картины Фраунгофера	11
Иванов А. Н., Каракулев Ю. А., Михайлов В. М.	Алгоритм измерения геометрических параметров объекта по его муар-интерференционной картине	11
Ишанин Г. Г., Польщиков Г. В., Шевнина Е. И.	Использование френелевских ответвителей при построении проходных измерителей энергетических параметров лазерного излучения	11
Латыев С. М., Смирнов А. П., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Шухат Р. В.	Проект линии автоматизированной сборки микрообъективов	11
Латыев С. М., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Резников А. С.	Унификация оптических и механических конструкций линзовых микрообъективов	11
Назаров В. Н., Иванов А. Н.	Формирование муар-интерференционной картины при дифракции на щели между краем с конечной толщиной и зеркальной поверхностью	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Назаров В. Н., Соколов Ю. А.	Дифракционный метод контроля пространственного положения объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье	11
Польщиков Г. В., Шевнина Е. И., Фам Шон Лам, Шалыгина Н. В.	Использование режима теплового хранения термоупругого преобразователя для построения многоканальных измерительных систем	11
Разумовский И. Т.	Пирометр для контроля перегрева скруток проводов линий электропередач	11
Роженцов В. В., Мамедов Р. К.	Гониоспектрорадиометрический метод определения пространственных спектральных характеристик локальных световых полей	11
Смирнов А. П., Латыев С. М.	Математическая модель автоматизированной сборки микрообъективов	11
Смирнов А. П., Резников А. С., Абрамов Д. А.	Автоматизированный пересчет оптических схем при проектировании	11

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Безгодов А. А., Иванов С. В., Косухин С. С., Бухановский А. В.	Виртуальный полигон для исследовательского проектирования морских объектов и сооружений	10
Боголепов Д. К., Сопин Д. П., Ульянов Д. Я., Турлапов В. Е.	Построение SAN BVH деревьев для трассировки лучей с использованием графических процессоров	10
Болгова Е. В., Иванов С. В., Григина Е. А., Слоот П. М. А., Бухановский А. В.	Параллельные алгоритмы моделирования динамических процессов на комплексных сетях	10
Бухановский А. В., Васильев В. Н., Виноградов В. Н., Смирнов Д. Ю., Сухоруков С. А., Яппаров Т. Г.	CLAVIRE: перспективная технология облачных вычислений второго поколения	10
Бухановский А. В., Житников А. Н., Петросян С. Г., Слоот П. М. А.	Высокопроизводительные технологии экстренных вычислений для предотвращения угрозы наводнений	10

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бухановский А. В., Марьин С. В., Князьков К. В., Сиднев А. А., Жабин С. Н., Баглий А. П., Штейнберг Р. Б., Шамакина А. В., Воеводин В. В., Головченко Е. Н., Фалалеев Р. Т., Духанов А. В., Тарасов А. А., Шамардин Л. В., Моисеенко А. И.	Результаты реализации проекта „Мобильность молодых ученых“ в 2010 году: развитие функциональных элементов технологии iPSE и расширение состава прикладных сервисов	10
Иванов С. В., Болгова Е. В., Каширин В. В., Якушев А. В., Чугунов А. В., Бухановский А. В.	Web-ориентированный производственно-исследовательский центр „Социодинамика“	10
Князьков К. В.	Особенности работы с потоками задач длительного исполнения в рамках концепции iPSE	10
Князьков К. В., Ларченко А. В.	Предметно-ориентированные технологии разработки приложений в распределенных средах	10
Ковальчук С. В., Маслов В. Г.	Интеллектуальная поддержка процесса конструирования композитных приложений в распределенных проблемно-ориентированных средах	10
Марьин С. В., Ковальчук С. В.	Сервисно-ориентированная платформа исполнения композитных приложений в распределенной среде	10
Мостаманди С. В., Насонов Д. А., Калюжная А. А., Бухановский А. В.	Ансамблевые прогнозы экстремальных гидрометеорологических явлений в распределенной среде CLAVIRE	10
Насонов Д. А., Иванов С. В., Бухановский А. В.	Распределенная программная платформа для прототипирования интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами	10
Спельников Д. М., Гуськов А. А., Маслов В. Г., Бухановский А. В.	Учебно-научный комплекс „Компьютерное моделирование в нанотехнологиях“ на основе Грид-среды	10
Сысоев А. В.	О построении семейства множественных разверток на основе кривых Пеано для параллельного решения задач глобально-оптимального поиска	10



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Фадеев Д. А.	Особенности численного решения эволюционных задач распространения коротких лазерных импульсов на системах архитектуры NUMA	10
Чуров Т. Н., Насонов Д. А., Штейнберг Б. Я., Бухановский А. В.	Особенности вероятностного анализа производительности и надежности проблемно-ориентированных сред облачных вычислений	10
Штейнберг Б. Я., Кравченко Е. Н., Морылев Р. И., Нис З. Я., Петренко В. В., Скиба И. С., Шаповалов В. Н., Штейнберг О. Б., Штейнберг Р. Б.	Особенности реализации распараллеливающих преобразований программ в системе ДВОР	10

**ИНФОРМАЦИЯ**

Марусина М.Я.	Сообщение о XIV International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry (PST2011)	7
Никифоров В. О., Гвоздев С. С., Попова Е. В.	Сообщение о конкурсе выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика“ 2010 г.	3
—	Борис Владимирович Соколов. К 60-летию со дня рождения	1
—	Владимир Николаевич Васильев. К 60-летию со дня рождения	4
—	О присуждении премии Правительства Российской Федерации	1
—	О публикации монографии М. Г. Томилина и Г. Е. Невской „Фотоника жидких кристаллов“	12