

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Пиуновский Е. В., Тропченко А. А. Анализ аудиоданных с помощью вейвлет-функций..... 3

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Богатырев В. А., Голубев И. Ю., Беззубов В. Ф. Организация межмашинного обмена в дублированных вычислительных комплексах ..... 8

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Гулин А. И. Проектирование многозвенных РС-генераторов..... 14  
Никитин Ю. А. Построение тракта приведения активного синтезатора частот..... 19  
Стеблев Ю. И., Вашуркина Е. С. Многоэлементные электроемкостные преобразователи для поточной влагометрии нефтяных эмульсий..... 27

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Мараев А. А., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Исследование энергетической чувствительности в оптико-электронных системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной..... 31  
Мачихин А. С., Пожар В. Э. Особенности передачи изображений при коллинеарной дифракции света на акустической волне ..... 36  
Гайворонский С. В., Зверев В. А. Анализ коррекционных параметров оптической системы из трех отражающих поверхностей ..... 42  
Трофимов В. А., Нагибин Ю. Т., Шванова М. Л. Бесконтактный пневмооптический метод измерения внутриглазного давления ..... 47  
Баля В. К., Денисюк И. Ю. Получение трехмерных оптических микроструктур с использованием лазерного гравера ..... 51

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитическое описание нестационарных температур изотермического объекта в условиях его лучистого теплообмена с окружающей средой..... 56  
Бирюлин Г. В., Егоров В. И., Муров С. Ю., Невский И. В. Оптимизация конструкции системы охлаждения электронного модуля..... 61  
Кузнецова О. А. Оценка надежности структурно избыточных комплексов авионики с учетом среднего времени между восстановлениями при отказах ..... 65

### ИСТОРИЯ ОПТИКИ

- Томилин М. Г. Глаз и линза через призму тысячелетий ..... 70

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Ушаков А. В., Яицкая Е. С. Модификация матриц систематических помехозащищенных кодов в задаче обеспечения скрытности передачи информации..... 80

### ИНФОРМАЦИЯ ..... 83

### SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)..... 86

# CONTENTS

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Piunovsky E. V., Tropchenko A. A. Audio Data Analysis Using Wavelet Functions ..... 3

## COMPUTING TECHNIQUE

- Bogatyrev V. A., Golubev I. Yu., Bezzubov V. F. Arrangement of Machine-Machine Data Exchange in Backup Computer Complex..... 8

## ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Gulin A. I. Design of Ladder-Type RC-Generators..... 14  
Nikitin Yu. A. Design of Reduction Tract of Active Frequency Synthesizer ..... 19  
Steblev Yu. I., Vashurkina E. S. Multielement Electrical Capacitor Converters for Full-Flow Moisture Measurement of Crude Emulsion ..... 27

## OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Maraev A. A., Konyakhin I. A., Timofeev A. N. Investigation on Energetic Sensitivity of Optical-Electronic Systems with Polychromatic Optical Equisignal Zone..... 31  
Machikhin A. S., Pozhar V. E. Peculiarities of Image Transmission at Collinear Diffraction of Light on Acoustic Wave ..... 36  
Gayvoronsky S. V., Zverev V. A. The Correction Parameter Analysis in Three-Component Optical System ..... 42  
Trofimov V. A., Nagibin Yu. T., Shvanova M. L. A Noncontact Pneumatic-Optical Method of Intraocular Pressure Measurement..... 47  
Balina V. K., Denisiuk I. Yu. Production of Three-Dimensional Optical Microstructures with the Laser Ablation Method ..... 51

## HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Lapovok E. V., Khankov S. I. Analytical Description of Non-Stationary Temperature Field of Isothermal Object under Radiant Heat Exchange with Environment ..... 56  
Biryulin G. V., Egorov V. I., Murov S. Yu., Nevsky I. V. Optimization of Construction of Cooling System for Electronic Module ..... 61  
Kuznetsova O. A. Consideration of Average Time between Renewals in Prediction of Failure-Free Operation Time of Avionics..... 65

## HISTORY OF OPTICS

- Tomilin M. G. Eye and Lens through the Prism of Milleniums..... 70

## BRIEF NOTES

- Ushakov A. V., Yaitskaya E. S. Matrix Modification of Systematic Noise-Free Codes in the Problem of Information Transfer Security Ensuring ..... 80

## INFORMATION ..... 83

## SUMMARY ..... 86

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

Е. В. Пиуновский, А. А. Тропченко

## АНАЛИЗ АУДИОДАНЫХ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ФУНКЦИЙ

Рассмотрены области применения вейвлет-функций при цифровой обработке звука. Показаны преимущества вейвлет-преобразований по сравнению с традиционными методами анализа. Приведены результаты исследования возможностей вейвлет-анализа при фильтрации и сжатии аудиоданных.

*Ключевые слова:* анализ, звук, вейвлет, сжатие, аудиоданные.

**Введение.** Вейвлет-преобразование (ВП) — относительно новая эффективная технология, позволяющая проводить обработку сигналов различного типа. Обладая рядом преимуществ по сравнению с традиционными видами преобразований, ВП нашли применение в области кодирования видеоданных и изображений. Кроме того, существует множество исследований по использованию ВП для сжатия звука, в ходе которых было показано, что данный вид функций позволяет выделять различные характеристики аудиосигналов. Это свойство обуславливает возможность применения ВП для анализа звуковых данных с последующим использованием полученных сведений не только для их компрессии, но и для решения ряда других задач. Одной из таких задач является так называемый поиск музыкальной информации (англ. MIR — Music Information Retrieval), иными словами — выделение основных сигналов в музыкальном фрагменте. Это направление получило в последнее время широкое распространение [1].

Выделение информации в звуковых сигналах (особенно, в музыке) с помощью преобразований позволяет выполнять ряд сложных действий без вмешательства человека. В первую очередь, это касается поиска музыкальной информации по ее содержанию, классификации и жанровой принадлежности. В настоящее время существует достаточное количество публикаций, в которых описываются разные подходы к решению данной задачи на основе ВП [1—3]. Тем не менее исследования по применению ВП при обработке звука с последующим его сжатием или шумоподавлением не теряют своей актуальности и перспективности, учитывая разнообразие доступных функций.

**Вейвлет-преобразование и преобразование Фурье.** Вейвлет-функции являются набором функций, получаемых с помощью сжатий (растяжений) и сдвигов по временной оси исходной функции (материнского вейвлета). Математически это можно выразить следующим образом:

$$\Psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

где  $\Psi(t)$  — материнский (исходный) вейвлет,  $t$  — время,  $b$  — параметр, характеризующий сдвиг по времени,  $a$  — параметр масштаба,  $1/\sqrt{a}$  — множитель, обеспечивающий нормализацию.

Видно, что уже в самом определении вейвлетов заложена идея масштабируемости. Это позволяет подбирать функции, способные обеспечить наиболее точный анализ, для каждого вида сигнала. Кроме того, вейвлеты имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами работы со звуком. Так, преобразование Фурье не обладает временным разрешением, а использование специально разработанного оконного преобразования Фурье (ОПФ) позволяет фиксировать время с определенной точностью, однако сигнал при этом делится на окна одинакового размера, что лишает процедуру анализа гибкости. ВП, напротив, имеет частотно-временное окно изменяемого размера, площадь которого (как и в случае с ОПФ) определяется согласно принципу неопределенности Гейзенберга [4]. Применительно к практике можно выделить два основных преимущества вейвлетов для анализа сигналов, а именно: компактный носитель (хорошее временное разрешение) и полосчатый спектр (хорошее частотное разрешение).

**Виды анализа звука с помощью вейвлетов.** Один из видов анализа аудиосигналов — их графическое отображение с помощью различных способов. Как правило, выделяют четыре основных вида представления звуковой волны:

- сигналограмму (амплитудно-временная зависимость);
- спектр сигнала (амплитудно-частотная зависимость);
- спектрограмму (часто называемую „сонограммой“ — псевдотрехмерный график с отображением амплитуд частотных составляющих);
- трехмерную спектрограмму (с отображением амплитуд частотных составляющих по третьей координатной оси).

По мнению специалистов, спектрограмма обеспечивает наилучшее визуальное представление спектра сигнала и позволяет в подробностях анализировать динамику его развития [5]. Именно использование ВП позволяет построить наиболее наглядные графики подобного типа, на которых, в соответствии со свойствами вейвлетов, определена четкая привязка сигнала ко времени.

При числовом анализе звука можно выделить два основных подхода на базе вейвлетов: дискретное ВП (ДВП) и пакетное дискретное ВП (ПДВП). Если рассматривать такие преобразования как наборы фильтров, то ДВП можно характеризовать как пропускание сигнала через набор низкочастотных фильтров, что приводит к „однобокому“ дереву преобразования. Особенность такого подхода заключается в неявном предположении о большем количестве информации об исходном сигнале, содержащемся в области низких частот, что оправдано для многих реальных сигналов и соответствует особенностям человеческого слуха. При ПДВП производится полное каскадирование сигнала как в низкочастотной, так и в высокочастотной области, в результате чего формируется „сбалансированное“ дерево, путь по которому может быть выбран в зависимости от предъявляемых требований к степени сжатия сигнала. Таким образом, пакетное ДВП является более гибким средством декомпозиции сигнала и подходит для решения особенно сложных задач [4, 6]. При этом следует отметить дополнительное особое преимущество ПДВП при обработке музыкальных данных, которое позволяет определить набор вейвлет-коэффициентов, совпадающих с октавами и нотами [2].

**Обработка аудиоданных с помощью вейвлет-анализа.** Экспериментальная часть проведенных авторами исследований заключалась в анализе набора музыкальных файлов в системе компьютерного моделирования MatLab, которая, имея в своем составе дополнение Wavelet Toolbox, является одним из лучших средств исследования вейвлетов [6]. В ходе экспериментов применялось моделирование работы блока анализа аудиоданных на основе ДВП (в терминах MatLab: One-Dimensional Wavelet Analysis — одномерный анализ с помощью дискретного преобразования) и ПДВП (в терминах MatLab: One-Dimensional Wavelet Packet Analysis — одномерный анализ с помощью вейвлет-пакетов). В первом случае осуществля-

лась фильтрация звука в целях шумоподавления, во втором — его сжатие. В качестве анализируемых данных использовались три фрагмента со следующим звуковым наполнением:

- 1) звучание (сигнал) отдельного музыкального инструмента (пианино);
- 2) звучание (сигнал) симфонического оркестра;
- 3) зашумленный музыкальный сигнал (с уровнем шума около 35 дБ).

Были установлены следующие постоянные параметры работы системы:

- 5-й уровень декомпозиции для вейвлетного дерева (подобранный для получения лучшего соотношения времени обработки и качества анализа);
- 4-й порядок функций в случае семейств вейвлетов (на основе статистических сведений об эффективности базовых функций [4, 6], а также исследования, описанного в работе [7]);
- степень сжатия звука, равная 10 (в системе MatLab задается параметром „number of zeros“ [6]); столь высокая степень сжатия задана для удобства сравнения результатов, которые при более низкой степени сжатия менее резко изменяются при переходе от одного базового вейвлета к другому.

В качестве базовых функций преобразований использовались следующие семь наборов вейвлетов — Хаара (Haar), Добеши (Db4), симлет (sym4), койфлет (coif4), биортогональный (bior4.4), обратный биортогональный (rbior4.4) и Мейера (Meur).

На первом этапе эксперимента осуществлялось сжатие аудиосигналов с помощью ПДВП. Результаты данной операции для всех функций представлены на рис. 1. Как показывает анализ рисунка, огибающие результатов сжатия сигналов для первого и второго музыкальных фрагментов (кривые 1 и 2) схожи между собой, но различаются лишь качеством сжатия (это проявляется в смещении соответствующих графиков по вертикали). Наиболее сложным для компрессии оказался третий фрагмент (кривая 3). Это связано с неоднородностью и нестационарностью данного сигнала, что вызвано высоким уровнем зашумленности и большой амплитудой высокочастотной составляющей по сравнению с другими сигналами. Лучшие результаты сжатия аудиосигнала наблюдались при использовании в качестве базовых функций биортогонального вейвлета и вейвлета Мейера.

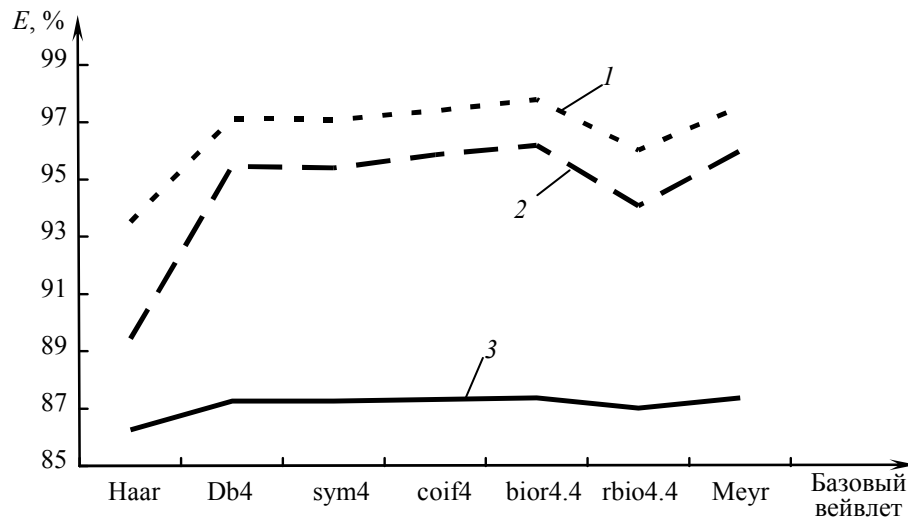


Рис. 1

На следующем этапе проводились фильтрация данных с помощью ДВП и последующее сжатие полученных сигналов посредством ПДВП (как и на первом этапе). Результаты показаны на рис. 2 (обозначения кривых соответствуют приведенным на рис. 1). Форма огибающей изменилась только для зашумленного сигнала (кривая 3), для него же заметно значительное улучшение качества сжатия при анализе с помощью определенных вейвлетов (в частности, биортогонального вейвлета с увеличением сохраненной энергии  $E$  на 2 %). Целесообразно проиллюстрировать полученный график, приведя средние показатели улучшения качества

для каждого звукового фрагмента: 0,26 % — для отдельного инструмента, 0,81 % — для оркестра и 0,87 % — для зашумленного сигнала.

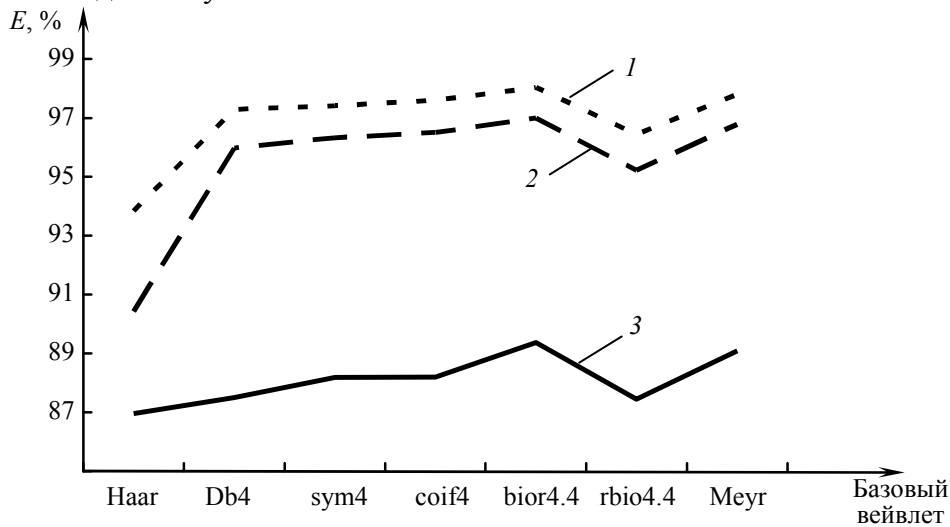


Рис. 2

Изменение качества сжатия сигналов в зависимости от применяемого базового вейвлета можно показать на другом графике (рис. 3): результаты анализа фрагментов 1 и 2 похожи — наибольшего повышения качества сжатия достигли симлет и обратный биортогональный вейвлет; совершенно другая ситуация с зашумленным сигналом — при его анализе уже отмеченные биортогональный вейвлет и вейвлет Мейера показали наилучший результат.

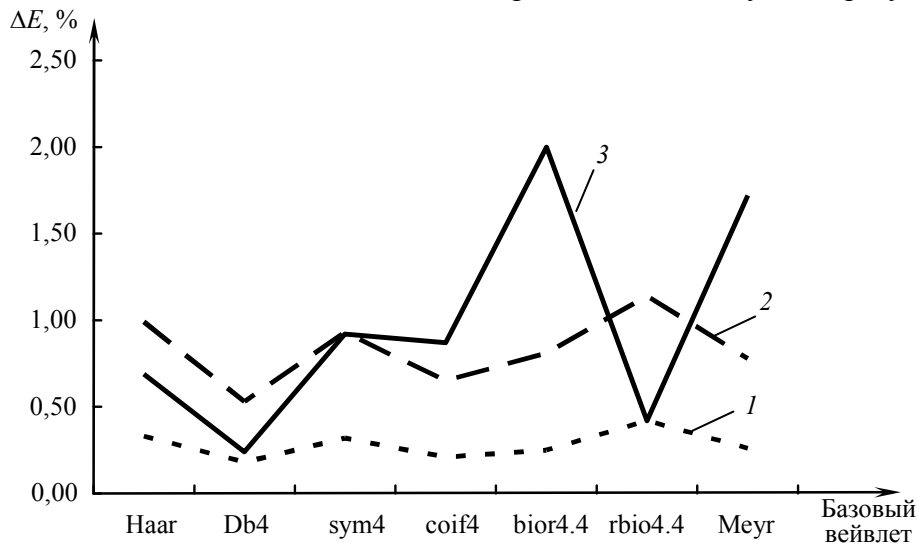


Рис. 3

**Заключение.** Рассмотренные в настоящей статье технологии анализа звуковых данных с помощью вейвлет-функций являются перспективными методами, способными превзойти и дополнить традиционные подходы в области цифровой обработки аудиосигналов. Обладая рядом преимуществ по сравнению с преобразованием Фурье и ОПФ, вейвлеты позволяют осуществлять более гибкий и масштабируемый анализ, что приводит к очень точному выделению свойств сигналов как при графическом, так и при числовом представлении получаемых коэффициентов.

Представленные результаты позволяют выделить ряд направлений для дальнейших исследований — например, подбор базовых функций и типов преобразований (и их комбинаций) для решения традиционных задач, а также применение вейвлетов в актуальной и перспективной области поиска музыкальной информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tzanetakis G., Essl G., Cook P.* Audio analysis using the discrete wavelet transform // Proc. Conf. in Acoustics and Music Theory Applications, 2001 [Электронный ресурс]: <[http://soundlab.cs.princeton.edu/publications/2001\\_ama\\_aadwt.pdf](http://soundlab.cs.princeton.edu/publications/2001_ama_aadwt.pdf)>.
2. *Grimaldi M., Cunningham P., Kokaram A.* A wavelet packet representation of audio signals for music genre classification using different ensemble and feature selection techniques // Proc. of Multimedia Information Retrieval. 2003. P. 102—108 [Электронный ресурс]: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=973281>>.
3. *La Cour-Harbo A., Endelt L.* Time-frequency distributions of music based on sparse wavelet packet representations // Control Eng. Working Paper, Ser. 4850. Aalborg: Dep. of Control Engineering, Aalborg Univ., 2005 [Электронный ресурс]: <[http://vbn.aau.dk/files/6353816/4850\\_Endelt.pdf](http://vbn.aau.dk/files/6353816/4850_Endelt.pdf)>.
4. *Воробьев В. И., Грибунин В. Г.* Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб: Изд-во Военного ун-та связи, 1999. 204 с.
5. *Радзишевский А. Ю.* Основы аналогового и цифрового звука. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2006. 288 с.
6. *Misiti M. et al.* Wavelet Toolbox User's Guide. USA, MA: The Mathworks, Inc., 2010. 454 p. [Электронный ресурс]: <[http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/wavelet/wavelet\\_ug.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/wavelet/wavelet_ug.pdf)>.
7. *Пиуновский Е. В., Тропченко А. А.* Возможности сжатия звука с использованием вейвлет-преобразований // Интеллектуальные и информационные системы: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. Тула, 2009.

**Сведения об авторах**

- Евгений Витальевич Пиуновский** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: [evgriun@gmail.com](mailto:evgriun@gmail.com)
- Андрей Александрович Тропченко** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: [zayka\\_98rus@mail.ru](mailto:zayka_98rus@mail.ru)

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
03.03.11 г.

В. А. БОГАТЫРЕВ, И. Ю. ГОЛУБЕВ, В. Ф. БЕЗЗУБОВ

## ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖМАШИННОГО ОБМЕНА В ДУБЛИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Проводится анализ надежности двухмашинных вычислительных комплексов при различных подходах к организации взаимосвязи между полукомплексами. Показано преимущество организации межмашинного обмена на основе двойного прямого доступа к памяти.

*Ключевые слова:* дублированный вычислительный комплекс, отказоустойчивость, надежность, межмашинный обмен.

**Введение.** Высокая надежность и отказоустойчивость [1, 2] управляющих компьютерных систем достигается при их построении на основе дублированных (двухмашинных) вычислительных комплексов (ДВК), зачастую объединяемых в кластеры [3—5].

В системах компьютерного управления двухмашинные комплексы функционируют либо в режиме дублированных вычислений (параллельной работы, при которой каждый запрос направляется на обслуживание в два полукомплекса, а результаты вычислений сравниваются), что повышает достоверность работы, либо в режиме разделения нагрузки, что позволяет повысить производительность системы, но снижает достоверность результатов вычислений и может привести к их потере.

Эффективность дублированных комплексов и кластеров на их основе во многом определяется организацией межмашинного обмена [6, 7], что обуславливает важность анализа при проектировании ДВК результативности использования известных вариантов организации межмашинного обмена и возможностей их модификации с учетом особенностей построения систем.

Проанализируем потенциальные возможности повышения эффективности дублированных комплексов в результате организации межмашинного обмена с двойным прямым доступом к памяти (ПДП) [8—10], суть которого заключается в конвейерном совмещении передачи данных с использованием ПДП одновременно в обоих полукомплексах [11]. Двойной ПДП потенциально позволяет ускорить межмашинный обмен при повышении отказоустойчивости дублированных комплексов [11, 12].

**Организация дублированного комплекса.** В качестве типовой рассмотрим реализацию дублированного комплекса (рис.1), каждый из полукомплексов которого содержит процессор ( $P$ ) и модуль памяти ( $M$ ). Реконфигурация системы и обмен данными между полукомплексами осуществляются с использованием переключателя ( $S$ ) [12, 13].

При работе дублированного комплекса в режиме разделения нагрузки по мере накопления отказов при реконфигурации возможен переход (деградация) от обслуживания запросов двумя полукомплексами к их обслуживанию одним полукомплексом, формируемым, в частности, из исправного оборудования разных полукомплексов.



Если время выполнения запросов в системе является критичным и при отказе оборудования выполняемый запрос не может быть возобновлен без риска срыва процесса управления, прерванную обработку запросов следует восстанавливать, используя контрольные точки. В контрольных точках полукомплексы обмениваются данными, необходимыми для взаимоконтроля и восстановления вычислительного процесса.

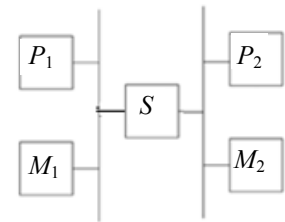


Рис. 1

В режиме дублированных вычислений организация межмашинного обмена в целях контроля осуществляется путем сравнения окончательных или промежуточных (в контрольных точках) результатов вычислений.

Время, затрачиваемое на межмашинный обмен, и возможности восстановления работоспособности комплекса после сбоев и отказов зависят от варианта реализации межмашинного обмена.

**Оценка готовности дублированного комплекса.** Рассмотрим варианты построения дублированного комплекса с реализацией переключателей, позволяющих организовать программно управляемый обмен и обмен на основе ПДП и двойного ПДП.

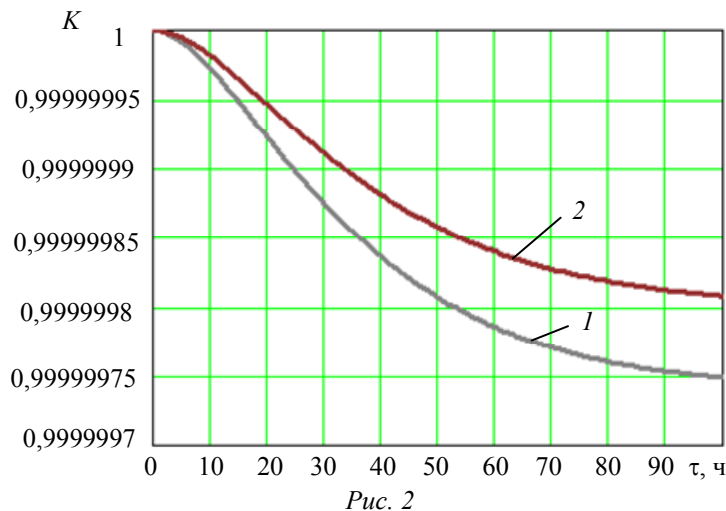
При построении марковской модели надежности восстанавливаемого комплекса с разделением нагрузки будем считать, что известны интенсивности отказов  $\lambda_p, \lambda_m, \lambda_s$  и восстановлений  $\mu_p, \mu_m, \mu_s$  процессора  $P$ , модуля памяти  $M$  и переключателя  $S$ , причем восстановление производится одним ремонтником после любого отказа. Ниже представлена матрица интенсивностей переходов для марковской модели надежности исследуемой системы. Состояния системы отображаются пятью двоичными разрядами. Два старших и два младших разряда отображают состояния („0“ — исправное, „1“ — отказавшее) процессоров  $P$  и модулей памяти  $M$  соответственно первого и второго полукомплексов. Третий разряд отображает состояние переключателя  $S$ . Коды состояний записаны в шестнадцатеричном виде.

	0	1	2	3	4	5	6	7	9	A	B	D	E	F	12	13	16	17	1B	1F
0	0	$2\lambda_m$	$2\lambda_p$	0	$\lambda_s$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	$\mu_m$	0	0	$\lambda_p$	0	$\lambda_s$	0	0	$\lambda_m$	$\lambda_p$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	$\mu_p$	0	0	$\lambda_m$	0	0	$\lambda_s$	0	0	$\lambda_m$	0	0	0	0	$\lambda_p$	0	0	0	0	0
3	0	$\mu_p$	$\mu_m$	0	0	0	0	$\lambda_s$	0	0	$\lambda_m$	0	0	0	0	$\lambda_p$	0	0	0	0
4	$\mu_s$	0	0	0	0	$2\lambda_m$	$2\lambda_p$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	$\mu_s$	0	0	$\mu_m$	0	0	$\lambda_p$	0	0	0	$\lambda_m$	$\lambda_p$	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	$\mu_s$	0	$\mu_p$	0	0	$\lambda_m$	0	0	0	0	$\lambda_m$	0	0	0	$\lambda_p$	0	0	0
7	0	0	0	$\mu_s$	0	$\mu_p$	$\mu_m$	0	0	0	0	0	0	$\lambda_m$	0	0	0	0	$\lambda_p$	0
9	0	$\mu_m$	0	0	0	0	0	0	0	0	$2\lambda_p$	$\lambda_s$	0	0	0	0	0	0	0	0
A	0	$\mu_p$	$\mu_m$	0	0	0	0	0	0	0	$\lambda_m$	0	$\lambda_s$	0	0	$\lambda_p$	0	0	0	0
B	0	0	0	$\mu_m$	0	0	0	0	$\mu_p$	$\mu_m$	0	0	0	$\lambda_s$	0	0	0	0	0	$\lambda_p$
D	0	0	0	0	0	$\mu_m$	0	0	$\mu_s$	0	0	0	0	$2\lambda_p$	0	0	0	0	0	0
E	0	0	0	0	0	$\mu_p$	$\mu_m$	0	0	$\mu_s$	0	0	0	$\lambda_m$	0	0	0	0	$\lambda_p$	0
F	0	0	0	0	0	0	0	$\mu_m$	0	0	$\mu_s$	$\mu_p$	$\mu_m$	0	0	0	0	0	0	$\lambda_p$
12	0	0	$\mu_p$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$2\lambda_m$	$\lambda_s$	0	0	0
13	0	0	0	$\mu_p$	0	0	0	0	0	$\mu_p$	0	0	0	0	$\mu_m$	0	0	0	$\lambda_s$	$\lambda_m$
16	0	0	0	0	0	0	$\mu_p$	0	0	0	0	0	0	0	$\mu_s$	0	0	$2\lambda_m$	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	$\mu_p$	0	0	0	0	$\mu_p$	0	0	$\mu_s$	$\mu_m$	0	0	$\lambda_m$
1B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\mu_p$	0	0	0	0	$\mu_m$	0	0	0	$\lambda_s$
1F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$\mu_p$	0	0	0	$\mu_m$	$\mu_s$	0

Решение дифференциальных уравнений, составленных по матрице интенсивностей переходов, позволяет определить вероятности всех состояний комплекса и, в результате суммирования вероятностей работоспособных состояний, вычислить нестационарный коэффициент готовности (функцию готовности)  $K(\tau)$  комплекса [1].

В режиме межмашинного обмена с двойным ПДП состояние комплекса относится к работоспособным в случае исправности хотя бы одного процессора и хотя бы одного модуля памяти в любом полукомплексе. При программно управляемом обмене состояние комплекса относится к работоспособным, если исправны модуль памяти и процессор одновременно хотя бы в одном полукомплексе.

Результат расчета нестационарного коэффициента готовности  $K(\tau)$  ДВК представлен на рис. 2: кривые 1 и 2 соответствуют комплексу на основе межмашинного обмена без ПДП и с использованием двойного ПДП. Расчет проведен при  $\lambda_p = 0,00005 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_m = 0,00015 \text{ ч}^{-1}$ ,  $\lambda_s = 0,0001 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\mu_p = \mu_m = \mu_s = 0,5 \text{ ч}^{-1}$ . При тех же исходных данных в результате решения системы алгебраических уравнений найдены значения стационарного коэффициента готовности  $K_{\Gamma}$  комплекса без ПДП и с использованием двойного ПДП, они равны соответственно 0,9999997 и 0,9999998.



### Оценка эффективности межмашинного обмена в дублированном комплексе.

Сравним эффективность ДВК при следующих вариантах межмашинного обмена:

— вариант В<sub>1</sub>: обмен в режиме ПДП с конвейерным совмещением передачи данных из модуля памяти  $M_1$  первого полукомплекса в буфер переключателя  $S$  и из него в модуль памяти  $M_2$  второго полукомплекса по магистралям обоих полукомплексов (обмен с двойным ПДП);

— вариант В<sub>2</sub>: обмен под управлением процессора  $P$  с конвейерным совмещением передачи данных из модуля памяти  $M_1$  в буфер переключателя  $S$  и из него в модуль памяти  $M_2$  по магистралям обоих полукомплексов (программно управляемый обмен с конвейеризацией);

— вариант В<sub>3</sub>: обмен в режиме ПДП с занесением кадра из модуля памяти  $M_1$  в буферную память переключателя  $S$  с дальнейшей передачей этого кадра (после его полного приема) в модуль памяти  $M_2$  в режиме ПДП;

— вариант В<sub>4</sub>: обмен под управлением процессора  $P$  с занесением кадра из модуля памяти  $M_1$  в буфер переключателя с дальнейшей передачей этого кадра (после его полного приема) в модуль памяти  $M_2$  под управлением процессора  $P$ .

Время межмашинного обмена при передаче кадра из  $L$  слов для вариантов В<sub>1</sub>—В<sub>4</sub> вычисляется соответственно как

$$T_1 = (L+1)t + d, \quad T_2 = (L+1)2t + D, \quad T_3 = 2(Lt + d), \quad T_4 = 4tL + D,$$

где  $t$  — время передачи одного слова,  $d$  и  $D$  — время инициализации и установления режима ПДП и режима прерывания.

Среднее время обмена для вариантов В<sub>1</sub>—В<sub>4</sub> с учетом повторных передач кадров в случае сбоев определяется соответственно как

$$T_1 = ((L+1)t + d) \sum_{i=1}^{\infty} ib_1(1-b_1)^{i-1}, \quad b_1 = e^{-((L+1)t+d)(\lambda_2+\lambda_3)};$$

$$T_2 = ((L+1)2t + D) \sum_{i=1}^{\infty} ib_2(1-b_2)^{i-1}, \quad b_2 = e^{-((L+1)2t+D)(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)};$$

$$T_3 = 2(Lt + d) \sum_{i=1}^{\infty} ib_3(1-b_3)^{i-1}, \quad b_3 = e^{-(2(Lt+d))(\lambda_2+\lambda_3)};$$

$$T_4 = (4tL + D) \sum_{i=1}^{\infty} ib_4(1-b_4)^{i-1}, \quad b_4 = e^{-(4tL+D)(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  — интенсивности сбоев процессора  $P$ , модуля памяти  $M$  и переключателя  $S$ .

Результаты расчета среднего времени  $T$  межмашинного обмена в зависимости от длины  $L$  массива передаваемых данных (количества слов) без учета повторных передач из-за сбоев для вариантов межмашинного обмена  $B_1$ — $B_4$  представлены на рис. 3 соответствующими кривыми. Расчеты выполнены в предположении, что  $t=10^{-7}$  ч,  $d=5t$  ч,  $D=10t$  ч. Представленные зависимости показывают эффективность межмашинного обмена на основе двойного ПДП, причем эта эффективность растет с увеличением объемов передаваемых данных.

При функционировании ДВК в режиме дублированных вычислений, когда в полуконплексах решаются одни и те же задачи, программно управляемый обмен может быть организован без прерываний. Для этого режима результаты расчета среднего времени межмашинного обмена при различных вариантах его организации приведены на рис. 4. Анализ рисунка показывает, что существует граница целесообразности обмена с двойным ПДП.

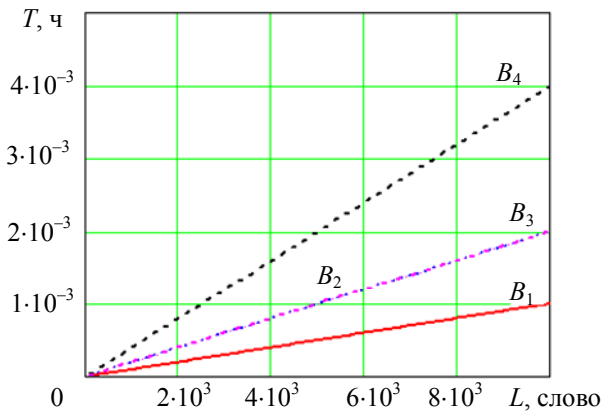


Рис. 3

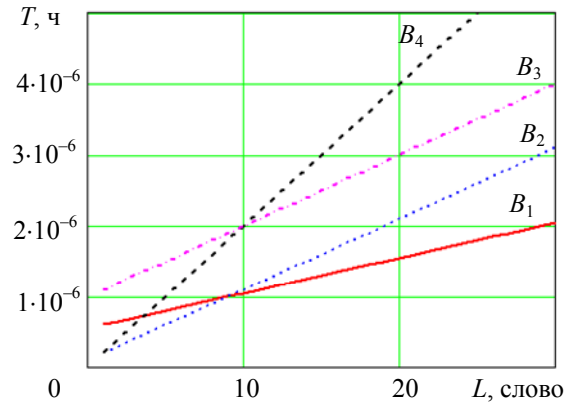


Рис. 4

При передаче больших массивов данных с использованием варианта  $B_1$  возможно их разбиение на части (кадры) с организацией канала двойного ПДП между полуконплексами для каждого кадра. Очевидно, что в отсутствие сбоев (их пренебрежимо малой вероятности) весь массив данных наиболее быстро удастся передать без его разбиения на кадры, так как передача каждого кадра связана с временными потерями на установление канала ПДП. В реальных условиях разбиение передаваемого массива данных на кадры (и соответственно уменьшение их длин) приводит, с одной стороны, к снижению вероятностей повторных передач из-за ошибок (сбоев), а с другой — к возрастанию издержек времени на организацию каналов прямого доступа. Таким образом, возникает задача оптимизации числа кадров, формируемых при передаче массива данных в режиме двойного ПДП.

Среднее время межмашинного обмена ( $T_1$ ) с установлением канала двойного ПДП при разбиении передаваемого массива данных из  $L$  слов на  $k$  кадров вычисляется как

$$T_1 = \left( \left( \frac{L}{k} + 1 \right) t + d \right) k \sum_{i=1}^{\infty} i b (1-b)^{i-1}, \quad b_1 = e^{-\left( \left( \frac{L}{k} + 1 \right) t + d \right) (\lambda_2 + \lambda_3)}.$$

Зависимость величины  $T$  от числа  $k$  кадров, формируемых при передаче массива данных длиной  $L$  слов, представлена на рис. 5 для интенсивности сбоев  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ , когда  $\lambda = 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$  и  $\lambda = 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ . Из графиков видно, что существует оптимальное значение  $k$ , при котором в условиях сбоев (ошибок передачи) достигается минимальное время межмашинного обмена в режиме двойного ПДП.

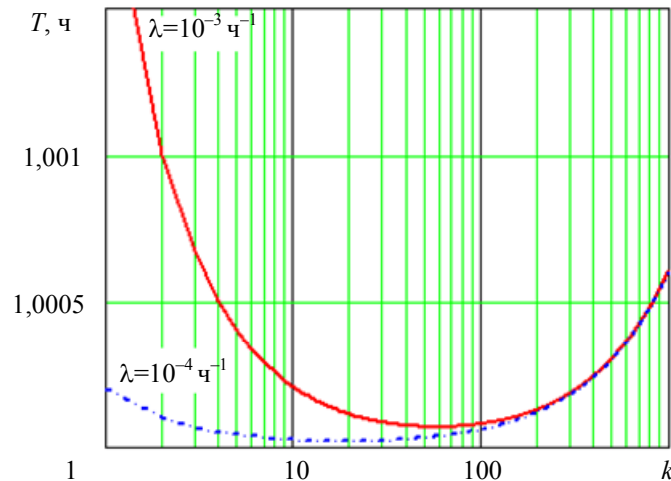


Рис. 5

**Заключение.** Представленные в настоящей статье результаты показывают:

- существенность влияния организации межмашинного обмена на эффективность отказоустойчивого дублированного вычислительного комплекса;
- преимущество межмашинного обмена на основе использования двойного ПДП при условии, что длина передаваемых кадров превышает некоторое граничное значение, зависящее от времени установления ПДП;
- наличие в режиме двойного ПДП оптимального числа кадров, формируемых при передаче массива данных, при котором в условиях сбоев время межмашинного обмена минимально.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности: Учеб. пособие. СПб: БВХ–Петербург, 2008. 704 с.
2. Активная защита от отказов управляющих модульных вычислительных систем / И. Б. Шубинский, В. И. Николаев, С. К. Колганов, А. М. Заяц. СПб: Наука, 1993. 285 с.
3. Богатырев В. А. Отказоустойчивые многомашинные вычислительные системы динамического распределения запросов при дублировании функциональных ресурсов // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39, № 4. С. 81–84.
4. Богатырев В. А. Оценка надежности и оптимальное резервирование кластерных компьютерных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 10. С. 18–21.
5. Богатырев В. А. Мультипроцессорные системы с динамическим перераспределением запросов через общую магистраль // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1985. Т. 28, № 3. С. 33–38.
6. Богатырев В. А. Оптимальное резервирование системы разнородных серверов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2007. № 12. С. 30–36.
7. Bogatyrev V. A. Exchange of duplicated computing complexes in fault tolerant systems // Automatic Control and Computer Sciences. 2011. Vol. 46, N 5. P. 268–276.

8. Пат. 1679493 СССР, G 06 F 13/00. Устройство для сопряжения ведущей и ведомой ЭВМ / В. Ф. Беззубов и др. Б.И. 1993. № 8.
9. А.с. 1462341 СССР, G 06 F 15/16. Устройство для сопряжения ЭВМ / В. Ф. Беззубов. Б.И. 1989. № 8.
10. А.с. 1798946 СССР, H 05 K 10/00, G 06 F11/20. Резервированная вычислительная система / В. Ф. Беззубов и др. Б.И. 1991. № 35.
11. *Беззубов В. Ф.* Сравнительный анализ методов обмена в многопроцессорных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. № 4. С. 51—56.
12. *Голубев И. Ю., Богатырев В. А., Беззубов В. Ф.* Сравнительный анализ структур отказоустойчивых дублированных вычислительных комплексов // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2011. Т. 9, № 2. С. 8—12.
13. *Богатырев В. А., Башкова С. А., Беззубов В. Ф.* Надежность дублированных вычислительных комплексов // Науч.-техн. вестн. СПбНИУ ИТМО. 2011. Вып. 6. С. 74—78.

**Сведения об авторах**

- Владимир Анатольевич Богатырев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Иван Юрьевич Голубев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: www.golubev@mail.ru
- Владимир Федорович Беззубов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
23.11.11 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.373.121

А. И. Гулин

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОЗВЕННЫХ RC-ГЕНЕРАТОРОВ

Представлены полученные с помощью функций преобразования аналитические выражения и алгоритмы для определения частот квазирезонанса многозвенных фазирующих RC-цепей всех возможных конфигураций.

*Ключевые слова:* генератор, квазирезонанс, функция преобразования, цепная структура, фазирующая цепочка.

Многозвенные частотно-зависимые цепи, представляющие собой цепную структуру (ЦС), широко используются в системах управления и связи в качестве фильтров, частотных корректоров, фазирующих четырехполюсников в генераторах, синтезаторах частот и т.д. Интерес к таким цепям объясняется возможностью использования в них не только емкостных и индуктивных, но и резистивных преобразователей для измерения различных физических величин (освещенности, состава вещества и т.д.). Типичным примером таких цепей являются датчики с RC-генераторами, выходная частота которых определяется квазирезонансом RC-цепи. Однако в настоящее время получены аналитические выражения для частоты и затухания сигналов в подобных ЦС лишь с числом звеньев не более восьми [1, 2]. Использование функций преобразования (ФП) позволило устранить этот пробел [3].

Рассмотрим генератор с фазирующим четырехполюсником [4], представляющий собой замкнутую систему с положительной цепью обратной связи и содержащий пассивную ЦС одного из четырех видов. Возможные структурные схемы генераторов с фазирующей ЦС приведены на рис. 1. Потенциальные ( $U/U$ ) либо токово-потенциальные ( $I/U$ ) ЦС (рис. 1, а, з) для построения генераторов требуют наличия усилителей напряжения (активных преобразователей), т.е. усилителей с высоким входным и низким выходным сопротивлениями. Такие цепи целесообразно выполнять на полевых транзисторах и электронных лампах. При использовании усилителей на биполярных транзисторах удобнее применять токовые ( $I/I$ ) или потенциально-токовые ( $U/I$ ) ЦС (рис. 1, в, б). В генераторе с токовой цепью усилитель должен иметь высокое выходное и низкое входное сопротивления (цепь включается, например, в качестве коллекторной нагрузки усилителя). В генераторе с потенциально-токовой цепью и входное, и выходное сопротивления усилителя должны быть низкими.

Активными преобразователями (АП), осуществляющими компенсацию потерь в пассивной ЦС, могут быть транзисторные либо электронные и операционные усилители, а также специальные устройства [5], например гираторы, конверторы отрицательного сопротивления и др.

Возникновение колебаний характеризуется условием

$$K'K \leq 1, \quad (1)$$

где  $K$  — ФП цепной структуры,  $K'$  — ФП активного преобразователя;

Так как ФП активного преобразователя является вещественной, то для выполнения условия (1) необходимо, чтобы ФП цепной структуры на частоте самовозбуждения была тоже вещественной. При этом обе ФП могут иметь одновременно либо положительные, либо отрицательные значения, иными словами, в зависимости от вида активного преобразователя с помощью ЦС осуществляется сдвиг фазы на четное или нечетное число  $\pi$  радиан, где  $i = 1, 2, 3, \dots$  — натуральный ряд чисел.

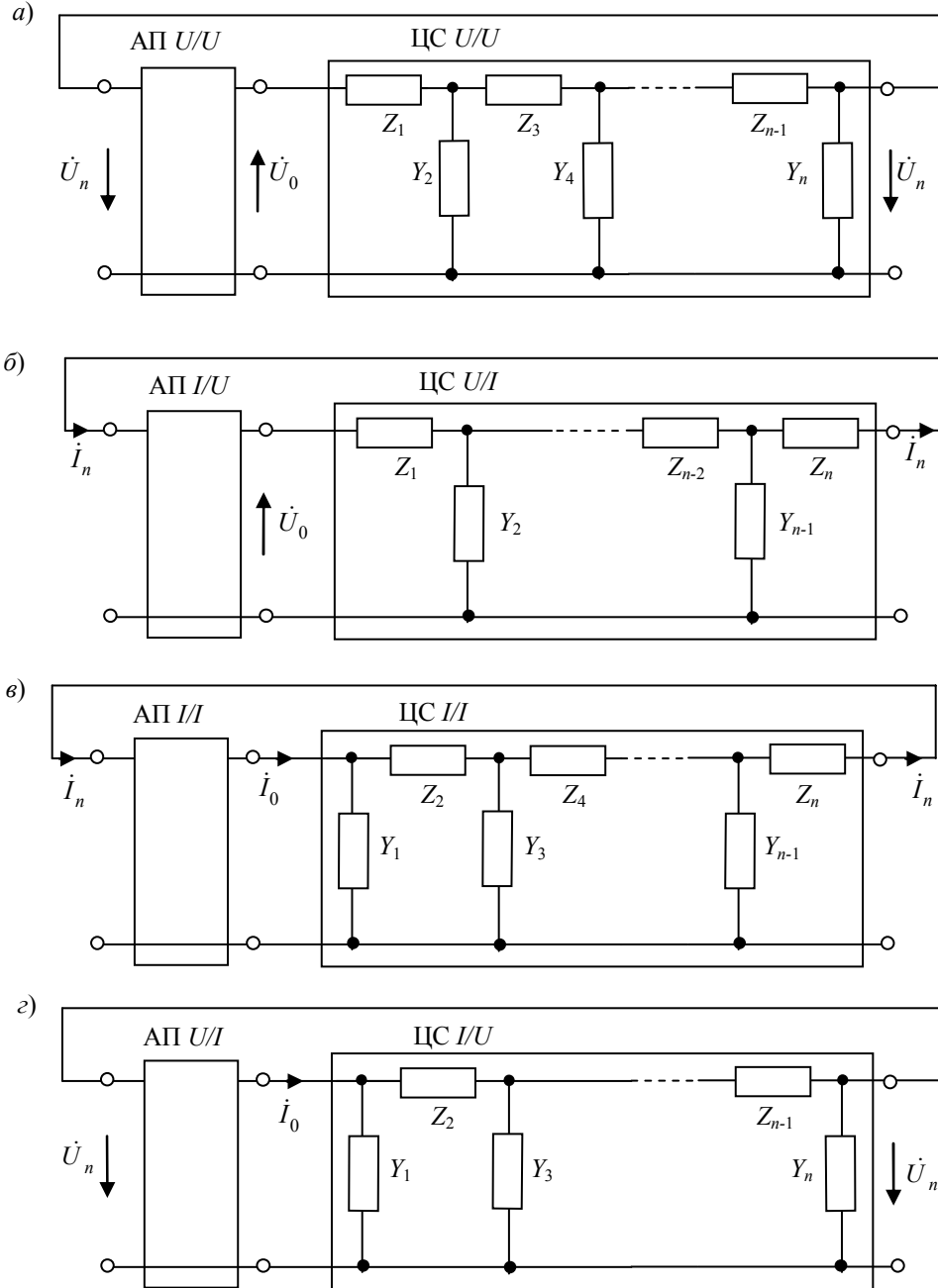


Рис. 1

Рассмотрим порядок определения частот квазирезонанса для наиболее часто используемых при построении генераторов на однокаскадных усилителях четырех видов  $n$ -звенных ЦС, составленных из RC-элементов и осуществляющих поворот фазы на  $180^\circ$ . Частота квазирезонанса определяется мнимой частью ФП фазирующего четырехполюсника при обращении ее в нуль, т.е.

$$\text{Im}(K) = 0, \tag{2}$$

и для ЦС  $U/U$  и  $I/I$  (рис. 2, а и б) характеризуется выражением [6]

$$\omega_0 = \frac{k_n}{RC}, \quad (3)$$

где коэффициент  $k_n$  определяется как

$$k_n = \sum_{i=0,1,\dots}^p (-1)^i k_n^{2i+1} C_{0,5n+1+2i}^{2+4i} = 0, \quad (4)$$

здесь  $C_{0,5n+1+2i}^{2+4i}$  — число сочетаний из  $2+4i$  элементов по  $0,5n+1+2i$  элемента;  $p = 0,25n - 1$  — для четных значений  $0,5n$ ;  $p = 0,25(n+2) - 1$  — для нечетных значений  $0,5n$ .

Для схем ЦС  $U/U$  и  $I/I$  (рис. 2, *в* и *г*) частота квазирезонанса определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{1}{k_n RC}. \quad (5)$$

С увеличением числа звеньев  $n$  от 6 до бесконечности ФП фазирующих ЦС  $U/U$  и  $I/I$  изменяется от  $K_6 = -29$  до  $K_n = -11,6$ .

Значения коэффициентов  $k_n$  не превышают  $\sqrt{6}$  и для уравнений (4) определяются по программе [6].

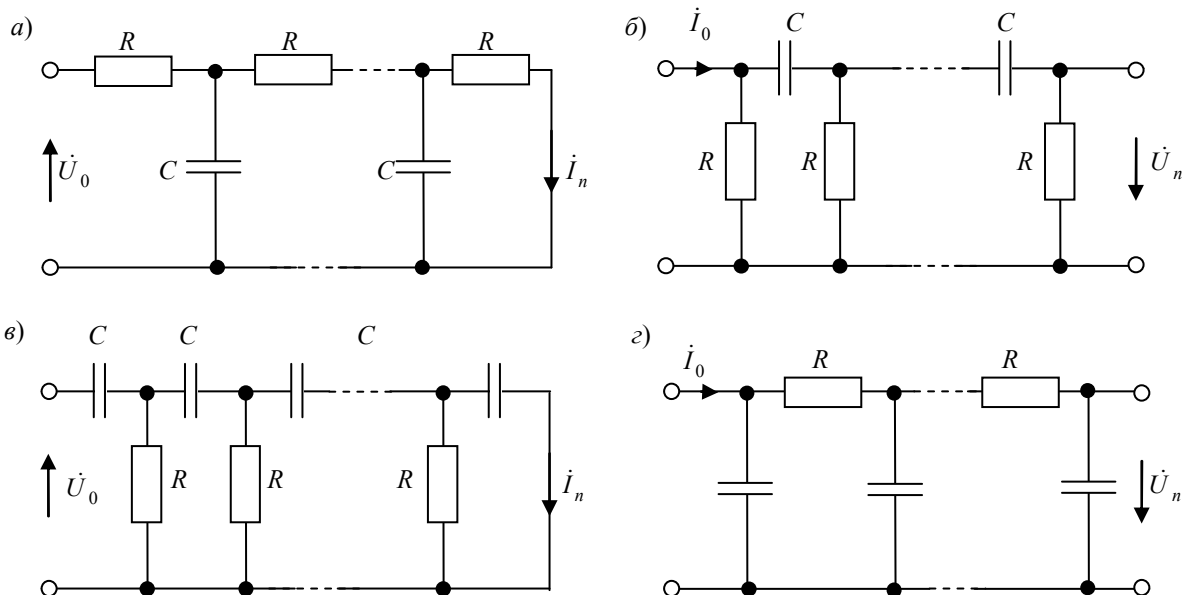


Рис. 2

Частота квазирезонанса для фазирующей ЦС  $U/I$  (рис. 3, *а*) определяется выражением

$$\omega_0 = \frac{b_n}{RC}, \quad (6)$$

а для ЦС  $I/U$  (рис. 3, *б*) — выражением

$$\omega_0 = \frac{1}{b_n RC}. \quad (7)$$

Здесь коэффициент  $b_n$  зависит от числа  $n$  и вычисляется как

$$b_n = \sum_{i=0,1,\dots}^l (-1)^i b_n^{2i+1} C_{0,5(n+3)+2i}^{3+4i} = 0, \quad (8)$$

где  $C_{0,5(n+3)+2i}^{3+4i}$  — число сочетаний из  $n-3+2i$  элементов по  $n-6+4i$  элемента;  $l = 0,25(n+1) - 1$  — для четных значений  $0,5(n+1)$ ;  $l = 0,25(n-1) - 1$  — для нечетных значений  $0,5(n+1)$ .



ФП таких ЦС не превышает  $56R$ , т.е.  $|K_n| \leq 56R$ . Так, для 9-звенной ЦС  $U/I$  (см. рис. 3, а) уравнение (8) для определения коэффициента  $b$  имеет вид:  $20b - 8b^3 = 0$ , откуда  $b = \sqrt{5/2}$ , а частота квазирезонанса для такой ЦС  $\omega_0 = \sqrt{5}/(\sqrt{2} \cdot RC)$ . ФП на частоте квазирезонанса имеет значение  $K_9 = -31,25R$ .

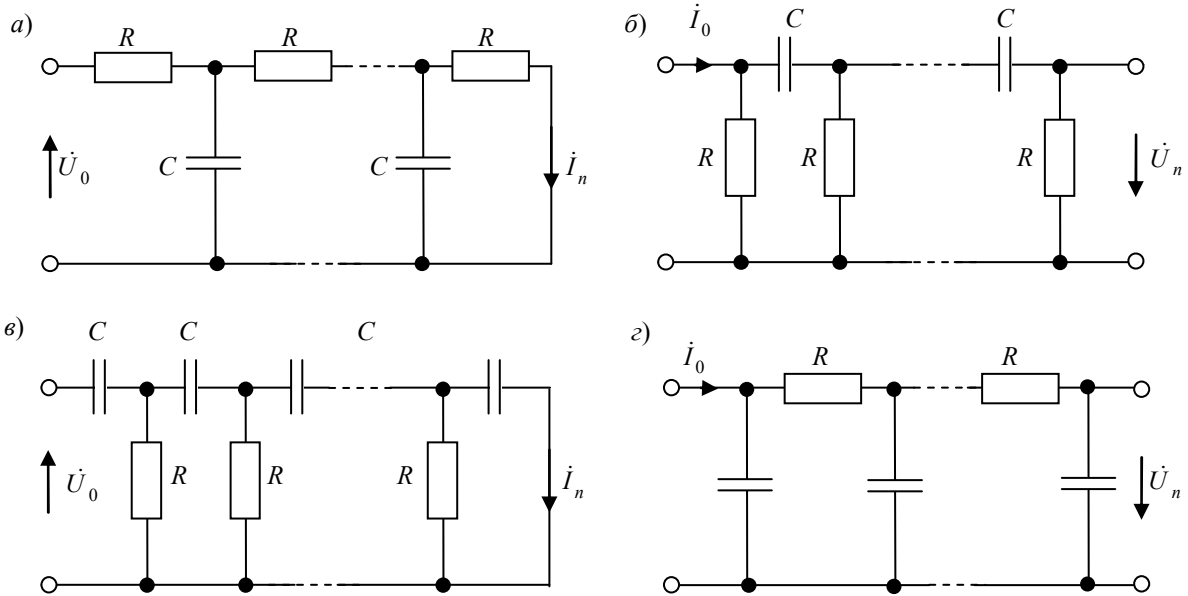


Рис. 3

Частоты квазирезонанса для ЦС  $U/I$  и  $I/U$  определяются выражениями, аналогичными уравнениям (6) и (7):

— для ЦС  $I/U$  (рис. 3, з)

$$\omega_0 = \frac{h_n}{RC}, \tag{9}$$

— для ЦС  $U/I$  (рис. 3, в)

$$\omega_0 = \frac{1}{h_n RC}. \tag{10}$$

Здесь коэффициент  $h_n$  также зависит от числа звеньев ЦС и определяется как

$$h_n = \sum_{i=0,1,\dots}^m (-1)^i h_n^{2i+1} C_{0,5(n+1)+2i}^{1+4i} = 0, \tag{11}$$

где  $C_{0,5(n+1)+2i}^{1+4i}$  — число сочетаний из  $0,5(n+1)+2i$  элементов по  $1+4i$  элемента;  $m = 0,25(n+1) - 1$  — для четных значений  $0,5(n+1)$ ;  $m = 0,25(n-1)$  — для нечетных значений  $0,5(n+1)$ .

Для осуществления сдвига фаз на  $180^\circ$  минимальное число емкостей  $C$  в таких ЦС должно быть не менее трех, и, следовательно, минимальное число звеньев равно 5 ( $n \geq 5$ ). Коэффициент  $h_n \leq \sqrt{3}$ , а ФП ЦС не превышает  $12/R$  (рис. 3, в) либо  $1/12R$  (рис. 3, з). Так, для 7-звенной ЦС (см. рис. 3, з) уравнение (11) имеет вид:  $4h - 6h^3 = 0$ , откуда  $h = \sqrt{4/3}$ , а частота квазирезонанса  $\omega_0 = 2/(\sqrt{3} \cdot RC)$ .

Из выражений (3), (5)—(7), (9) и (10) следует, что одну и ту же частоту квазирезонанса можно получить при бесчисленном множестве значений  $R$  и  $C$  при выполнении условия постоянства их произведения. Однако произвольный выбор значений элементов не всегда удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пассивным ЦС при построении генераторов.

Для однозначного решения подобной задачи предлагается методика, основанная на расчете RC-генератора с ЦС  $U/U$ , который, как известно [4], реализуется с использованием схем двух видов.

Рассмотрим 6-звенную ЦС, состоящую из RC-звеньев. Полагаем, что она не нагружена. Такой режим характерен для большинства случаев ее применения. Из уравнения (4) для рассматриваемого случая получим выражение:  $k_6 - 6k_6^3 = 0$ , откуда  $k_n = \sqrt{6}$ . Подставив значение коэффициента  $k_n$  в формулу (5), получим выражение для частоты квазирезонанса:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot RC}.$$

Коэффициент усиления усилителя должен превышать значение ФП преобразователя на частоте квазирезонанса и с учетом  $\omega_0$  для 6-звенной ЦС, согласно работе [3], равен  $|K_6| = 29$ .

Для устранения потери энергии сигнала выполним условие согласования

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вх}}, \quad (12)$$

где  $R_{\text{вых}}$  — выходное сопротивление усилителя,  $R_{\text{вх}}$  — входное сопротивление ЦС.

Входное сопротивление однородной 6-звенной ЦС  $U/U$  определяется как [3]

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z^3 Y^3 + 5Z^2 Y^2 + 6ZY + 1}{Z^2 Y^3 + 4ZY^2 + 3Y} \quad (13)$$

и в рассматриваемом случае его модуль на частоте квазирезонанса  $\omega_0$  равен  $|Z_{\text{вх}}| = 2,8R$ . Используя выражения (12) и (13), определим значение сопротивления  $R$  звена ЦС:  $R = R_{\text{вых}}/2,8$ , а из выражения для частоты  $\omega_0$  — значение емкости:  $C = 1/(\sqrt{6} \cdot R\omega_0)$ .

Аналогичный подход применяется и для других схем, используемых при построении частотно-зависимых цепей.

Для расчета частот квазирезонанса и ФП многозвенных RC-схем любой сложности и конфигурации разработана программа [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. Л.: Энергия, 1970. 424 с.
2. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
3. Кольцов А. А., Гулин А. И. Коэффициенты преобразования цепных трехполюсных структур // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1975. Т. 17, № 9. С. 31—34.
4. Барсуков Ф. И., Русанов Ю. Б. Элементы и устройства радиотелеметрических систем. М.: Энергия, 1983.
5. Бондаренко В. Г. RC-генераторы синусоидальных колебаний. М.: Связь, 1988.
6. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ, № 2003611147. Расчет частоты квазирезонанса и коэффициента передачи многозвенных RC-структур / А. И. Гулин, Ж. А. Сухинец, Д. Ф. Мударисов, И. Р. Хаников. М.: Роспатент, 2003.

#### Сведения об авторе

**Артур Игоревич Гулин** — канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра телекоммуникационных систем;  
E-mail: Gulin\_tks@ugatu.ac.ru

Рекомендована кафедрой  
телекоммуникационных систем

Поступила в редакцию  
26.03.10 г.

Ю. А. НИКИТИН

## ПОСТРОЕНИЕ ТРАКТА ПРИВЕДЕНИЯ АКТИВНОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ

Рассмотрены различные варианты построения тракта приведения кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты. Определены коэффициенты умножения помех, приходящих с опорным колебанием и попадающих в полосу прозрачности кольца, и предложены способы их уменьшения.

**Ключевые слова:** импульсно-фазовая автоподстройка частоты, тракт приведения, конечный автомат, дискретные побочные спектральные составляющие.

Построение широкополосных синтезаторов в СВЧ-диапазоне связано с необходимостью синтеза качественного сигнала с минимальным уровнем побочных спектральных составляющих при заданном шаге сетки частот [1—6].

Глобальную задачу синтеза СВЧ-колебаний с заданным качеством целесообразно разделить на локальные, подчиненные общей идеологии построения системы синтеза частот (ССЧ). Для синтеза сетки частот с малым и сверхмалым шагом можно использовать специализированный синтезатор, например многокольцевой активный синтезатор на основе колец импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАП) или пассивный цифровой синтезатор (ПЦС); перенос полученного колебания в требуемый СВЧ-диапазон можно возложить на тракт переноса (приведения) — ТП — на основе умножающего или синтезаторного кольца ИФАП.

При проектировании ТП умножающего кольца ИФАП следует учитывать, что он вносит существенный вклад в преобразование и усиление шумов ССЧ [2, 7].

Цель настоящей статьи — сравнительный анализ трактов приведения активных цифровых синтезаторов частот.

Отметим, что на качество синтезируемого (умножаемого) колебания значительное влияние оказывают низкочастотные флуктуации и шумы, т.е. приходящие с опорным колебанием побочные спектральные составляющие (ПСС), формируемые операционными узлами синтезатора.

Прямое умножение с большой кратностью низкочастотного опорного колебания (выходной частоты ПЦС)  $F_{\text{опНЧ}}$  нежелательно вследствие значительного ухудшения спектрального состава выходного колебания ССЧ с частотой  $f_{\text{выхВЧ}}$ , поскольку в  $N$  раз возрастают помехи (шумовые и дискретные ПСС) исходного колебания  $F_{\text{опНЧ}}$ ; здесь  $N$  — параметр тракта приведения умножающего кольца ИФАП. Как правило [7, 8], под дискретными ПСС (ДПСС) понимают помехи, отличающиеся от выходного колебания  $f_{\text{выхВЧ}}$  на частоту, кратную шагу сетки  $\pm F_S$ ; к ДПСС относят и комбинационные составляющие на выходе смесителей (сумматоров частот).

Рассмотрим варианты построения трактов приведения цифровой ССЧ на основе кольца ИФАП. Будем считать, что ТП входит в структуру кольца ИФАП, которая имеет один (сигнальный) вход для частоты опорного колебания  $f_{\text{опВЧ}}$  и один (сигнальный) выход для частоты синтезируемого колебания  $f_{\text{выхВЧ}}$  (рис. 1). Дополнительные сигналы, например колебание с частотой  $F_d$ , в рассматриваемых далее ТП когерентны величинам  $f_{\text{опВЧ}}$  и  $f_{\text{выхВЧ}}$ .

На рис.1 приняты следующие обозначения: ПГ — перестраиваемый генератор (генератор, управляемый либо напряжением, либо током); ЧФД — частотно-фазовый детектор; петлевой ФНЧ — фильтр нижних частот (предназначен для фильтрации помех, приходящих с

частотой  $F_{\text{опнч}}$ , и фильтрации гармоник частот  $F_S$  и  $F_{\text{опнч}}$ ); КА — конечный автомат (цифровое устройство, переключающееся в дискретные моменты времени и имеющее конечное число устойчивых состояний, т.е. обладающее конечной памятью);  $F_{\text{КА}}$  — тактовая частота на входе КА;  $F_{\text{ТП}}$  — частота на выходе тракта приведения (входе ЧФД);  $R$  — параметр КА, коэффициент передачи по частоте тракта опорного колебания; Упр.1, 2 — цифровые входы (шины) управления операционными узлами синтезатора (являются служебными и на общность рассмотрения схемы не влияют).

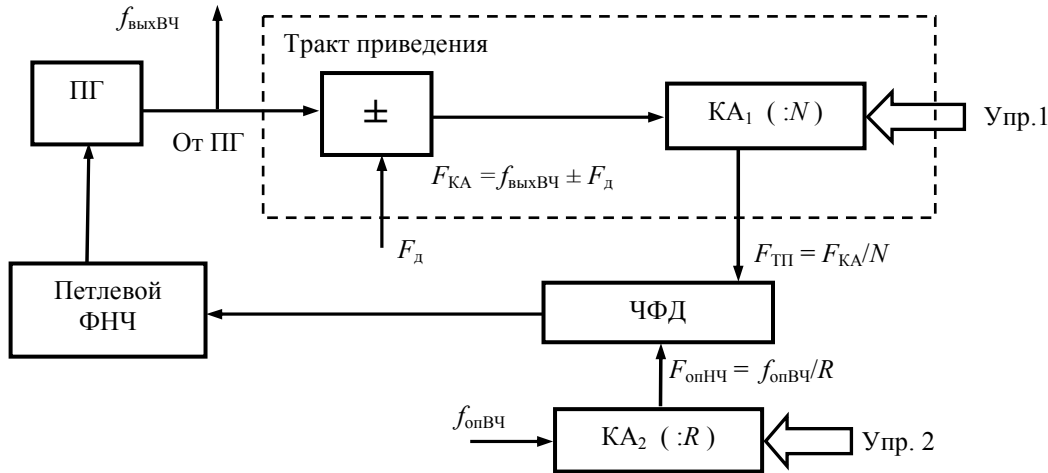


Рис. 1

Введем дополнительные параметры, используемые в дальнейшем для сравнения различных вариантов ТП колец ИФАП:

$$N_э = f_{\text{выхвч}}/F_S \text{ (эквивалентный коэффициент умножения ТП);}$$

$$N_{\text{ш}} = f_{\text{выхвч}}/F_{\text{опнч}} \text{ (коэффициент умножения помех (шумов));}$$

$$K_k = N_э/N_{\text{ш}} \text{ (коэффициент, характеризующий качество ТП).}$$

При активном цифровом синтезе частот кольцо ИФАП с помощью конечного автомата приводит частоту

$$f_{\text{выхвч}} \in \{(f_{\text{max}} \dots f_{\text{min}}) \cap (nF_S) \cap F_{\text{опнч}}\} \quad (1)$$

к частоте  $F_{\text{опнч}}$  таким образом, чтобы выполнялось условие когерентности. Условие (квази)когерентности для синтезаторной системы ИФАП можно записать в виде

$$(\Delta f_{\text{выхвч}})/(\Delta F_{\text{опнч}}) = (f_{\text{выхвч}})/(F_{\text{опнч}}) = N$$

(в статистическом смысле — на интервале наблюдения), где  $\Delta F_{\text{опнч}}$  и  $\Delta f_{\text{выхвч}}$  — отклонение частот соответственно опорного и выходного колебания от номинального значения.

В качестве КА обычно используют счетчики импульсов — делители с переменным (целочисленным) коэффициентом деления (ДПКД) или делители с дробно-переменным коэффициентом деления (ДДПКД). Иногда в качестве КА применяют пассивные цифровые синтезаторы частот [6, 7]. При этом коэффициент  $R = P/Q$ , где  $P$  — емкость накапливающего сумматора (НС), его модуль, а  $Q$  — число, записанное на его вход. Используют также ПЦС, построенные на основе ДДПКД.

Выражение для выходной частоты умножающего (синтезаторного) кольца ИФАП можно записать в виде

$$f_{\text{выхвч}} = f_{\text{опвч}}N/R = F_{\text{опнч}}N.$$

Возможны три варианта построения тракта приведения частоты ПГ к частоте сравнения — аналоговый, цифровой или цифроаналоговый.

В первом случае ТП реализуется в виде аналогового перемножителя — сумматора частот (смесителя). При этом  $N=1$  и кольцо ИФАП, строго говоря, является фильтрующим, а не синтезаторным. Его можно использовать для вложения сеток (мелкой сетки в крупную)

в рамках структуры ССЧ, а также для переноса колебания синтезируемой частоты в требуемый диапазон [9]. Действительно,  $f_{\text{выхВЧ}} = F_{\text{КА}} \pm F_{\text{д}} = F_{\text{опНЧ}}N \pm F_{\text{д}}$ ; если  $F_{\text{д}} > F_{\text{КА}}$ , то на выходе кольца ИФАП наблюдается *инверсия* спектра.

Во втором случае ТП реализуется в виде конечного автомата. Кольцо ИФАП с цифровым ТП является синтезаторным, что позволяет перестраивать выходную частоту с требуемым шагом. КА может быть составным: в начале тракта — быстродействующий счетчик импульсов с небольшим постоянным коэффициентом деления (например, в  $H$  раз), а далее — основной КА с коэффициентом деления  $N$ . Тогда шаг сетки синтезируемых частот  $F_S$  увеличивается в  $H$  раз, а эквивалентный коэффициент деления  $N_s = HN$ . Подчеркнем, что такое решение вынужденное и связано с недостаточным быстродействием основного КА.

В третьем случае частота  $F_{\text{КА}}$  понижается с помощью аналогового смесителя. Построение цифроаналоговых ТП осуществляется в СВЧ-диапазонах в тех случаях, когда быстродействие цифровой элементной базы ДПКД недостаточно для приведения частоты  $f_{\text{выхВЧ}}$  к частоте  $F_{\text{опНЧ}}$  [1, 6]. Кроме того, такое построение ТП позволяет уменьшить коэффициент умножения помех, приходящих с опорным колебанием, что существенно при формировании прецизионных колебаний.

Введение дробности в ДПКД тракта приведения при изначальном значении  $F_S$  уменьшает требуемый коэффициент деления  $N + Q/P$ , что обеспечивает снижение уровня шума выходного колебания синтезатора.

Отметим следующий важный факт: элементы кольца ИФАП — формирователи импульсов, накапливающие сумматоры, ДПКД (ДДПКД), ЧФД — генерируют собственные, как правило, низкочастотные шумы; эти шумы попадают в полосу прозрачности кольца  $f_{\text{п}}$  и в полосе расстроек от 0 до  $f_{\text{п}}$  ухудшают форму спектральной линии выходного колебания. Поэтому уровень собственных шумов синтезатора необходимо учитывать при расчете любого кольца ИФАП.

Проанализируем механизм передачи помех, приходящих с опорным колебанием, на выход кольца ИФАП. Запишем в операторной форме выражение для коэффициента передачи разомкнутого астатического синтезаторного кольца [9]:

$$G_N(s) = K_D K_V K_{\text{и}}(s) K_{\text{ф}}(s) \frac{1}{sN} = \frac{G_1(s)}{N},$$

где  $G_1(s)$  — операторный коэффициент передачи разомкнутого кольца с единичной обратной связью ( $N=1$ );  $K_D = 1/2\pi$  — статический коэффициент передачи ЧФД;  $K_V = f_{\text{выхВЧ max}} - f_{\text{выхВЧ min}} = S_{\text{ПГ}} E$  — полоса перестройки ПГ, здесь  $S_{\text{ПГ}}$  — крутизна управляющей характеристики ПГ,

$E$  — размах управляющего напряжения на входе ПГ;  $K_{\text{и}}(s) = \frac{1 + sT_{\text{и}}}{sT_D}$  — операторный коэффициент передачи изодромного (дифференцирующего) звена, здесь  $T_{\text{и}}$  — постоянная времени изодромного звена,  $T_D$  — постоянная времени ЧФД;  $K_{\text{ф}}(s)$  — операторный коэффициент передачи петлевого фильтра нижних частот.

Для предварительного (качественного) анализа фильтрующих свойств кольца ИФАП принято считать, что петлевой ФНЧ отсутствует и  $K_{\text{ф}}(s)=1$ . Характеристики бесфильтрового кольца с единичной обратной связью наиболее просты в построении и наглядны при анализе.

Коэффициент передачи фазовых шумов  $v$  опорного сигнала на выход замкнутой системы ИФАП с единичной обратной связью (ОС) можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{1v}(s) = \frac{\Theta}{v} = \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s)}, \quad (2)$$

где  $\Theta$  — фазовые шумы на выходе замкнутого кольца ИФАП.

Логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАХ)  $G_1(s)$  и  $\Phi_{1v}(s)$  приведены на рис. 2, где  $f_{и} = 1/T_{и}$  — частота издромного звена;  $f_{\phi}$  — частота среза петлевого ФНЧ. Цифрами обозначены нормированные к единичной крутизне (единичная крутизна равна 6 дБ/окт или, что то же самое, 20 дБ/дек) участки асимптотических ЛАХ [10, 11].

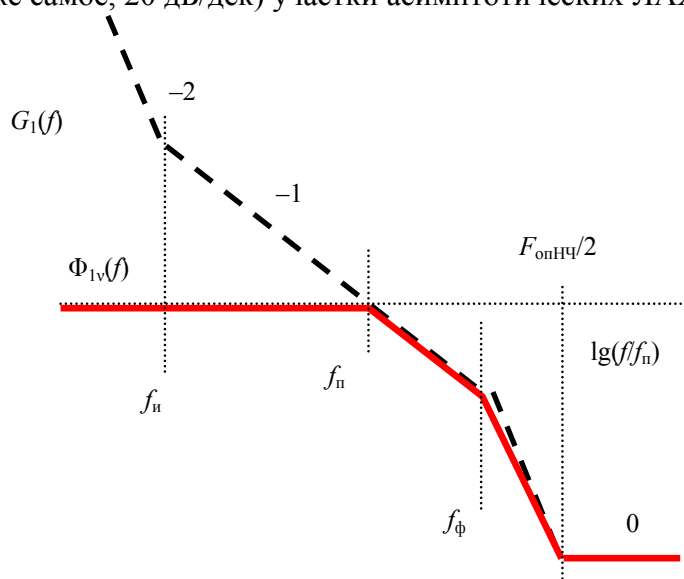


Рис. 2

Анализ рис. 2 и формулы (2) показывает, что для помех, приходящих с опорным колебанием, кольцо ИФАП является фильтром нижних частот с частотой  $f_{п}$  и коэффициентом передачи в полосе прозрачности кольца, равным единице. Иными словами, кольцо ИФАП с единичной ОС не усиливает помехи, приходящие с опорным колебанием. Крутизну следящего фильтра на основе кольца ИФАП можно увеличивать, повышая порядок петлевого ФНЧ, обеспечивая при этом необходимый запас по фазе на частоте  $f_{п}$ .

Для умножающего кольца формула (2) изменится:

$$\Phi_{Nv}(s) = \frac{G_1(s)}{1 + G_N(s)} = \frac{G_N(s)}{1 + G_N(s)} N = \Phi_{1v} N. \tag{3}$$

Соответствующий формуле (3) график показан на рис. 3, здесь же для сравнения пунктиром приведен график  $G_1(f)$  для кольца с единичной обратной связью.

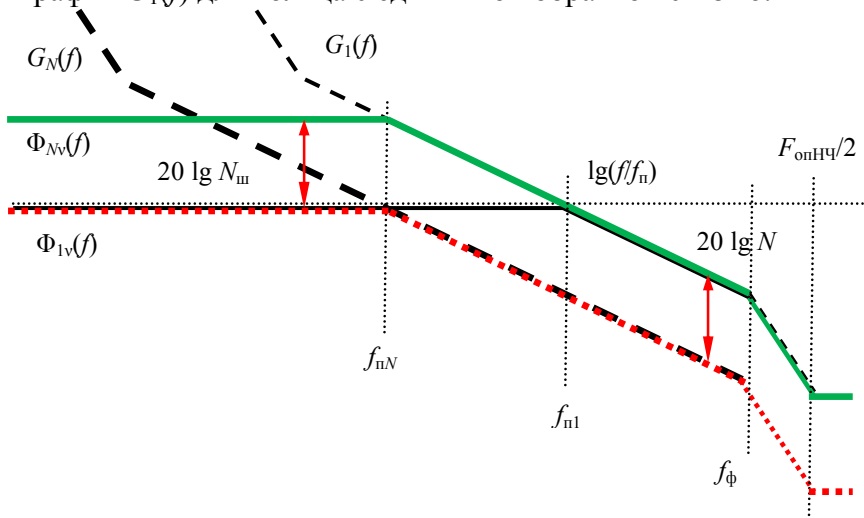


Рис. 3

Представленные графики (рис. 2, 3) и формулы (2), (3) показывают, как изменяются фильтрующие свойства кольца при неединичной обратной связи. Вывод заключается в том, что кольцо ИФАП в  $N_{ш}$  раз умножает низкочастотные флуктуации опорного колебания [7, 8],

попадающие в полосу его прозрачности  $f_{\text{п}}$ ; поэтому необходимо стремиться к минимизации коэффициента деления  $N$  в цепи обратной связи кольца ИФАП.

Рассмотрим способы уменьшения коэффициента умножения помех  $N_{\text{ш}}$  при обеспечении требуемого значения  $F_S$  в диапазоне выходных частот.

Задача минимизации уровня помех, приходящих с опорным колебанием, сводится не только к выбору элементной базы, но, прежде всего, к оптимизации построения ТП.

Тракт приведения синтезаторного кольца ИФАП (см. рис. 1) реализуется в виде делителя частоты (ДПКД или ДДПКД) в цепи обратной связи. В кольце с ДПКД шаг  $F_S = \text{const}$  и  $N \equiv N_{\text{э}} \equiv N_{\text{ш}}$ ,  $K_{\text{к}} = 1$ .

Уменьшения  $N_{\text{ш}}$  можно достигнуть введением дробности в ДПКД, т.е. применением ДДПКД. В этом случае  $F_S = f_{\text{опВЧ}} / (PR)$ , где  $P$  — значение модуля дробности (емкость НС). Ограничением величины  $F_S$  (числа разрядов дробности) служит значение полосы прозрачности кольца ИФАП, т.е.  $F_S > f_{\text{п}}$ .

Уменьшить коэффициент деления ТП умножающего кольца ИФАП можно не только введением дробности, но и введением дополнительного колебания — частоты  $F_{\text{д}}$ , что позволяет уменьшить требуемое значение  $N_{\text{ш}}$  при сохранении  $N_{\text{э}}$ . Рассмотрим данный подход подробнее.

Формулу (1) можно переписать в виде  $N \in (N_{\text{max}} \dots N_{\text{min}})$ , что позволяет сделать вполне определенный вывод: коэффициент деления  $N$  в синтезаторном кольце ИФАП можно уменьшить лишь до  $N \in \{(N_{\text{max}} - N_{\text{min}}) \dots 1\}$ . Для этого необходимо ввести в ТП синтезаторного кольца частоту  $F_{\text{д}}$ , когерентную выходному колебанию (рис. 4).

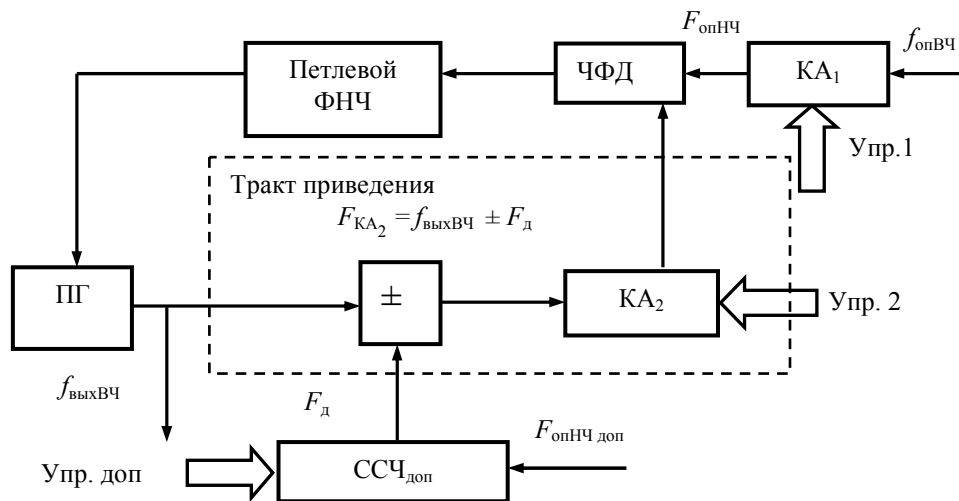


Рис. 4

Частоту  $F_{\text{д}}$  можно сформировать либо умножением частоты  $f_{\text{опВЧ}}$ , либо с помощью алгебраических преобразований частот, формируемых внутри структуры ССЧ. При больших кратностях умножения, что характерно для СВЧ-синтеза, наилучшим решением является использование дополнительной петли синтезаторной ИФАП. Однако при широкополосном синтезе выигрыш от введения частоты  $F_{\text{д}}$  уменьшается. Поэтому для ее формирования применяют дополнительный синтезатор с крупным шагом и перекрытием по частоте, таким же, как и в основном кольце. В рассматриваемых синтезаторных кольцах значение  $N_{\text{ш}}$  можно минимизировать применительно к конкретным задачам и требованиям.

Возможен другой — нониусный целочисленный — вариант построения тракта приведения цифрового синтезатора частоты (рис. 5) [12]. В этом случае частоту  $f_{\text{выхВЧ}}$  путем деления уменьшают в  $L$  и  $M$  раз, а затем вычитают, получая на выходе смесителя разностную частоту  $F_{\text{опНЧ}}$ . Коэффициент  $N_{\text{ш}}$  становится меньше коэффициента  $N_{\text{э}}$ . В этом случае частота опорного колебания умножается в  $LM$  раз, а помехи, приходящие с опорным колебанием, — в  $M$  раз ( $M > L$ ). Одновременно величина  $F_S$  возрастает в  $K_{\text{к}}$  раз и становится неравномерной по диапазону. При

нониусном целочисленном варианте построения ТП коэффициент шума по верхней оценке практически не изменяется по сравнению с классическим ТП на основе ДПКД (ДДПКД), но эквивалентный коэффициент деления  $N_3$  увеличивается в соответствии с выражением

$$N_3 = \frac{LM}{L-M}; N_{ш} = \max\{L, M\}; K_k = \min\{L, M\}.$$

Наибольший практический интерес представляет случай  $M = L + A$ . Тогда  $N_3 = \frac{LM}{A} = \frac{L(L+A)}{A}$ . При  $A = 1$   $N_3 = LM = L(L+1)$ ,  $N_{ш} = L+1$ ,  $K_k = L$ .

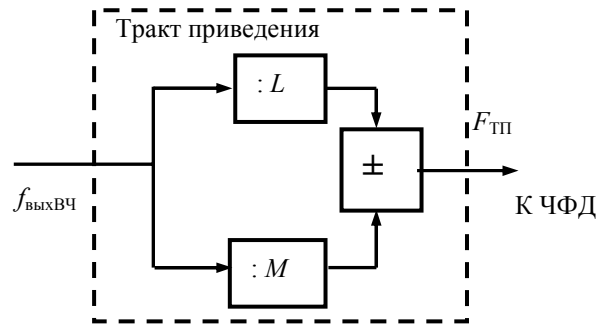


Рис. 5

Следует отметить, что уровень шума на выходе нониусного целочисленного ТП (см. рис. 5) будет выше на 3 дБ, чем шумы на выходе обычного ТП (см. рис. 1), если шумы на выходе делителя  $L$  и делителя  $M$  статистически независимы, а амплитуды их сигналов равны.

В табл. 1 приведены значения  $N_3$ ,  $N_{ш}$  и  $K_k$  для некоторых пар значений  $L$  и  $L+1$  при нониусном целочисленном варианте построения тракта приведения.

Таблица 1

$L$	$L+1$	$N_3$	$N_{ш}$	$K_k$
2	3	6	3	2
3	4	12	4	3
4	5	20	5	4
5	6	30	6	5
6	7	42	7	6
7	8	56	8	7
8	9	72	9	8
9	10	90	10	9
10	11	110	11	10
16	17	272	17	16
32	33	1056	33	32

Во всех вариантах нониусного ТП между выходом смесителя и входом ЧФД можно включать пассивный цифровой синтезатор ( $КА_1$ ) с коэффициентом деления  $P/Q$ , а коэффициенты  $M$  и  $N$  зафиксировать (рис. 6). Значение  $N_{ш}$  увеличится в  $P/Q$  раз, но коэффициент  $K_k$  останется прежним. Шаг сетки синтезируемых частот и его неравномерность будут практически полностью определяться возможностями ПЦС.

Возможен и другой вариант построения тракта. Делитель опорного колебания  $R$  заменяют на ПЦС при постоянных значениях  $M$  и  $N$ . В этом случае кольцо выполняет функцию высокочастотного умножителя выходной частоты ПЦС, а требуемый шаг сетки реализуют с помощью ПЦС в  $R$ -тракте ( $КА_2$ ): см. рис. 6.

Нониусный ТП можно видоизменить путем введения дробности в одну из его ветвей (см. рис. 6). Суть метода заключается в параллельном делении частоты  $f_{выхВЧ}$  и взаимном вычитании полученных результатов:



$$F_{\text{ТП}} = f_{\text{выхВЧ}} \left( \frac{1}{N} - \frac{1}{M + A/B} \right).$$

Примем коэффициент деления первого нониусного делителя равным  $N$ , а коэффициент второго (дробного) нониусного делителя — равным  $M + A/B$ . В общем случае эквивалентный коэффициент деления нониусного тракта

$$N_3 = \frac{MB + A - NB}{N(MB + A)}.$$

Наиболее интересен частный случай:  $M=N=B, A=1$ . Тогда

$$N_3 = N(N^2 + 1), \quad N_{\text{ш}} = N + \frac{1}{N} \approx N, \quad K_{\text{к}} = \frac{N^2 \left( N + \frac{1}{N} \right)}{N + \frac{1}{N}} = N^2.$$

В результате выходная частота синтезатора

$$f_{\text{выхВЧ}} = f_{\text{опНЧ}} N_3 = f_{\text{опНЧ}} N(N^2 + 1).$$

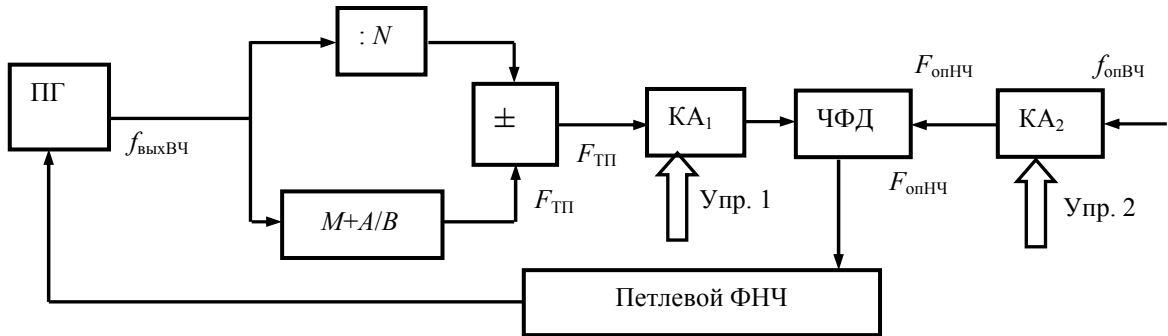


Рис. 6

Заметим, что шаг сетки частот  $F_S$  при изменении  $N$  увеличивается по квадратичному закону по сравнению с „классическим“ синтезом. Преимущество данного метода заключается, во-первых, в практически одинаковом умножении фазовых шумов (в  $N$  раз) по сравнению с целочисленным нониусным ТП и, во-вторых, в  $N$  раз увеличенном  $N_3$ . Это обстоятельство существенно при широкополосном синтезе частот. Использование в качестве КА пассивного синтезатора ПЦС (см. рис. 6) позволяет не только дополнительно минимизировать коэффициент умножения помех, но и синтезировать выходную частоту с практически любым шагом сетки. Результаты расчета основных параметров нониусного дробного ТП для различных коэффициентов  $N$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

$N$	$N_3$	$N_{\text{ш}}$	$K_{\text{к}}$
3	30	3	9
4	68	4	16
5	130	5	25
6	222	6	36
7	350	7	49
8	520	8	64
9	738	9	81
10	1010	10	100
32	32 800	32	1024
64	262 208	64	4096

Возможен еще один вариант построения нониусного дробного ТП, который предпочтителен при СВЧ-синтезе (рис. 7). Такое решение целесообразно при недостаточном быстродействии двухмодульных прескалеров, требуемых для построения дробных делителей нониуса.

Делитель  $H$  может отсутствовать. Наибольший интерес представляет вариант ТП с  $N = PS$ , тогда  $N_3 = HMN(S + 1/M)$  и  $N_{ш} = HN \approx HPS$ .

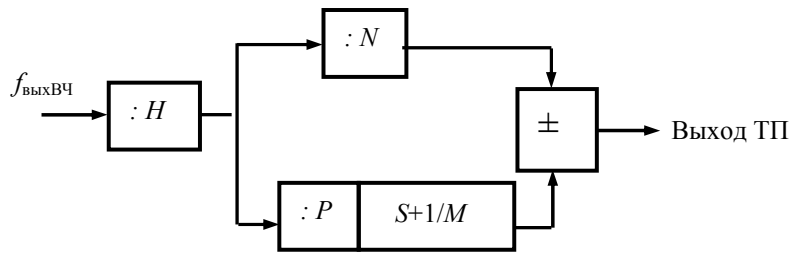


Рис. 7

Результаты анализа рассмотренных вариантов построения тракта приведения кольца ИФАП позволяют сделать следующие выводы:

- все дополнительные колебания, вводимые в синтезаторное кольцо ИФАП, должны быть когерентны опорному колебанию;
- введение частоты  $F_d$  в тракт приведения позволяет уменьшить коэффициент умножения помех, приходящих с опорным колебанием, в пределе до величины  $N_{\max} - N_{\min}$ , при этом  $N_3 \equiv N_{ш}$ ;
- использование нониусного целочисленного преобразования в ТП позволяет уменьшить коэффициент умножения помех, приходящих с опорным колебанием, при сохранении заданного коэффициента деления, при этом  $N_3 > N_{ш}$ ;
- применение нониусного дробного ТП позволяет значительно уменьшить коэффициент умножения помех, попадающих в полосу прозрачности кольца ИФАП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. С. Диапазонно-кварцевая стабилизация СВЧ. М.: Связь, 1976. 256 с.
2. Левин В. А., Малиновский В. Н., Романов С. К. Синтезаторы частот с системой импульсно-фазовой автоподстройки частоты. М.: Радио и связь, 1989. 232 с.
3. Шахгильдян В. В., Пестряков А. В. Тенденции развития техники синтеза частот для телекоммуникационных систем и устройств // Электросвязь. 2003. № 11. С. 74—78.
4. Григорьев В. В. и др. Импульсные системы фазовой автоподстройки частоты. Л.: Энергоатомиздат, 1982. 88 с.
5. Леонов Г. А., Селеджи С. М. Системы фазовой синхронизации в аналоговой и цифровой схемотехнике. СПб: Невский Диалект, 2002. 112 с.
6. Рыжков А. В., Попов В. Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. М.: Радио и связь, 1991. 264 с.
7. Шатино Д. Н., Паин А. А. Основы теории синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
8. Зарецкий М. М., Мовшиович М. Е. Синтезаторы частоты с кольцом фазовой автоподстройки. Л.: Энергия, 1974. 256 с.
9. Никитин Ю. А. Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты. Часть 3 // Современная электроника. 2007. № 9. С. 68—73.
10. Макаров И. М., Менский Б. М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 1977. 464 с.
11. Кузовков Н. Т. Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. М.: Оборонгиз, 1960. 447 с.
12. Sadowski B. A Self-offset phase-locked loop // Microwave J. 2008. Vol. 51, N 4. P. 116—124.

#### Сведения об авторе

**Юрий Александрович Никитин** — канд. техн. наук; Филиал ФГУП НИИ радио — Ленинградский отраслевой НИИР, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: yuriyan@list.ru

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию  
01.02.11 г.

Ю. И. СТЕБЛЕВ, Е. С. ВАШУРКИНА

## МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПОЛНОПОТОЧНОЙ ВЛАГОМЕТРИИ НЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Приведено описание конструкций многоэлементных электроемкостных преобразователей, повышающих точность и надежность определения состава водонефтяной эмульсии в широком диапазоне обводненности нефти.

**Ключевые слова:** многоэлектродный электроемкостный преобразователь, датчик, емкость, влагомер, нефть.

Применение в промышленных условиях диэлькометрического метода для контроля обводненности нефти в потоке осложняется множеством факторов: влиянием гидродинамической структуры многофазного потока на результаты измерений, наличием газовой фазы, малой эффективностью существующей аппаратуры при значениях влажности, превышающих 60—70 %, и практической потерей работоспособности аппаратуры при обводненности 95—98 %, необходимостью специальной калибровки прибора для каждого сорта нефти и нефти каждого месторождения, загрязнением чувствительных элементов первичного преобразователя.

Известен способ измерения влажности эмульсии типа „вода в нефти“, заключающийся в том, что исследуемую эмульсию помещают в электроемкостный преобразователь, в котором измеряют емкость между двумя электродами. В этом случае применяются коаксиальные электроемкостные преобразователи, в которых первым электродом служит трубопровод, а потенциальный электрод выполнен в виде стержня с диэлектрическим защитным покрытием [1].

Цель настоящей статьи — описание конструкций многоэлементных электроемкостных преобразователей, повышающих точность и надежность определения состава водонефтяной эмульсии в широком диапазоне обводненности нефти (от 0 до 100 %) в условиях структурной неоднородности многофазного потока.

Применение многоэлементных (многоэлектродных) электроемкостных преобразователей (МЭП) позволяет проводить электрическое зондирование двухфазной эмульсии в различных зонах контролируемого потока и осуществить, таким образом, комплексирование первичных электроемкостных преобразователей. Комплексирование производится с использованием  $N(N-1)/2$  емкостных элементов в составе МЭП, где  $N$  — число электродов МЭП. При этом измеряются  $N(N-1)$  выходных сигналов МЭП — емкостных элементов преобразователя в двух режимах работы МЭП (емкостей между каждой парой электродов).

Комплексирование первичных электроемкостных преобразователей производится с помощью системы измерительных электродов, расположенных по периферии многофазного потока с минимально возможными конструктивными зазорами между соседними электродами. При этом в каждом сечении преобразователя, перпендикулярном направлению движения потока и не совпадающем с границей раздела между соседними электродами, находящимися на одной поверхности — плоской или цилиндрической, располагаются четыре электрода.

В процессе калибровки многоэлектродного преобразователя формируются  $N(N-1)$  статических функций — калибровочных характеристик, т.е. зависимостей между выходными сигналами МЭП и объемным содержанием воды в эмульсии. При этом для каждой из указанных функций преобразования формируются два участка, одинаковые по объемному содержанию

обратной („вода в нефти“) и прямой („нефть в воде“) водонефтяной эмульсии и объемному содержанию воды. В процессе контроля потока водонефтяной эмульсии производится автоматическое определение ее типа — обратная или прямая [2].

На рис. 1 приведены конструктивные схемы шестиэлектродного ( $N=6$ ) преобразователя с цилиндрическими (а) и плоскими (б) электродами, где  $1-1 \dots 1-6$  — измерительные электроды;  $1-7$  — граница раздела между электродами (конструктивный зазор между электродами);  $1-8$  — направление движения контролируемого потока;  $A$  — блок формирования и аналоговой обработки сигналов;  $B$  — блок цифровой обработки сигналов. Для  $N$ -электродной системы МЭП максимальное число возможных комбинаций из двух электродов, т.е. независимых измерений в одном режиме работы преобразователя равно

$$n = \frac{N(N-1)}{2}.$$

Для  $N = 6$  число независимых измерений составляет  $n=15$ .

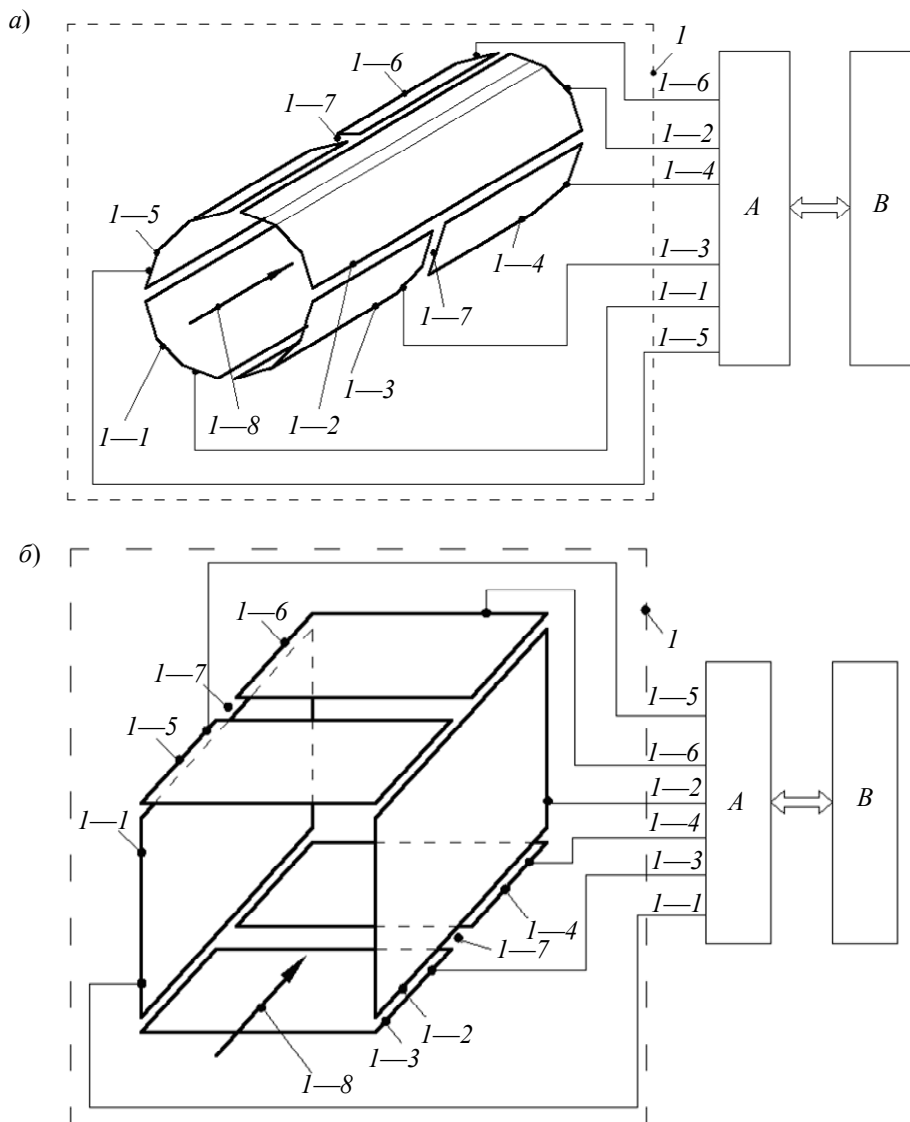


Рис. 1

Электрическое зондирование водонефтяной эмульсии осуществляется в различных направлениях относительно направления движения потока в трубопроводе. При этом производится как сквозное зондирование всего объема потока в зоне контроля электродов МЭП, так

и зондирование локальных областей потока с использованием  $N(N-1)/2$  емкостных элементов многоэлектродного преобразователя.

Калибровка влагомера и контроль обводненности нефти в потоке выполняются в двух последовательно создаваемых режимах работы МЭП в каждом цикле измерений. В первом режиме корпусная точка влагомера гальванически изолирована от контролируемой водонефтяной эмульсии и „физической“ земли (корпуса МЭП, трубопровода) — водонефтяная эмульсия не заземлена (режим  $K_1$ ). Во втором режиме корпусная точка влагомера гальванически соединена с контролируемой водонефтяной эмульсией и „физической“ землей — контролируемая эмульсия заземлена (режим  $K_2$ ). Калибровка влагомера производится с использованием девяти образцов физических сред; из них три — чистые компоненты: газ, нефть и вода, и шесть — водонефтяные эмульсии с объемным содержанием воды 20, 40, 60, 70, 80 и 90 % соответственно.

Калибровочные характеристики влагомера и измеряемые в процессе контроля сигналы — значения межэлектродных (между электродами  $i$  и  $j$ ) емкостей  $C_{ij}(K_1)$  и  $C_{ij}(K_2)$ , полученные в режимах  $K_1$  и  $K_2$  работы преобразователя, — нормируются к значениям емкостей  $C_{ij}^r(K_1)$  и  $C_{ij}^r(K_2)$ , полученным при наличии в зоне контроля МЭП чистой фазы (газа), и представляются в логарифмических единицах:

$$\ln \frac{C_{ij}(K_1)}{C_{ij}^r(K_1)}, \quad \ln \frac{C_{ij}(K_2)}{C_{ij}^r(K_2)}.$$

Измерение величин  $C_{ij}^r(K_1)$  и  $C_{ij}^r(K_2)$  производится при каждом изменении образца физической среды в процессе калибровки влагомера и при каждом случае отсутствия жидкой фазы — чистой нефти, воды или водонефтяной эмульсии в рабочем режиме влагомера; при этом факт отсутствия жидкой фазы в зоне контроля МЭП определяется автоматически из соотношений, приведенных в работе [2].

Автоматическое определение типа водонефтяной эмульсии — обратная („вода в нефти“) или прямая („нефть в воде“) — производится в каждом цикле измерений для каждого выходного сигнала МЭП с использованием следующих операций:

— измерение выходных сигналов МЭП — емкостей  $C_{ij}(K_1)$  между каждой парой  $(i, j)$  электродов преобразователя в режиме  $K_1$  — водонефтяная эмульсия не заземлена,  $i, j \in \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ ;

— измерение выходных сигналов МЭП — емкостей  $C_{ij}(K_2)$  между каждой парой  $(i, j)$  электродов преобразователя в режиме  $K_2$  — водонефтяная эмульсия заземлена,  $i, j \in \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ ;

— определение типа водонефтяной эмульсии в соответствии с соотношениями, приведенными в работе [2].

Определение состава водонефтяной эмульсии — объемного содержания воды и нефти в потоке — производится с использованием  $N(N-1)$  калибровочных характеристик многоэлектродного преобразователя для каждого его выходного сигнала, причем для обратной эмульсии состав определяется по соответствующему участку калибровочной характеристики и сигналам  $C_{ij}(K_1)$  и  $C_{ij}(K_2)$ , а для прямой эмульсии — также по участку калибровочной характеристики и сигналам  $C_{ij}(K_2)$ ,  $i, j \in \overline{1, N}$ ,  $i \neq j$ .

На рис. 2, а, б для режимов  $K_1$  и  $K_2$  соответственно приведены экспериментальные данные по определению типа водонефтяной эмульсии для емкостей  $C_{12}$ ,  $C_{34}$ ,  $C_{45}$  и  $C_{46}$

шестиэлектродного преобразователя ( $N=6$ ) при изменении водосодержания  $\alpha$  от 0 до 1,0. Для остальных емкостных элементов МЭП результаты аналогичны.

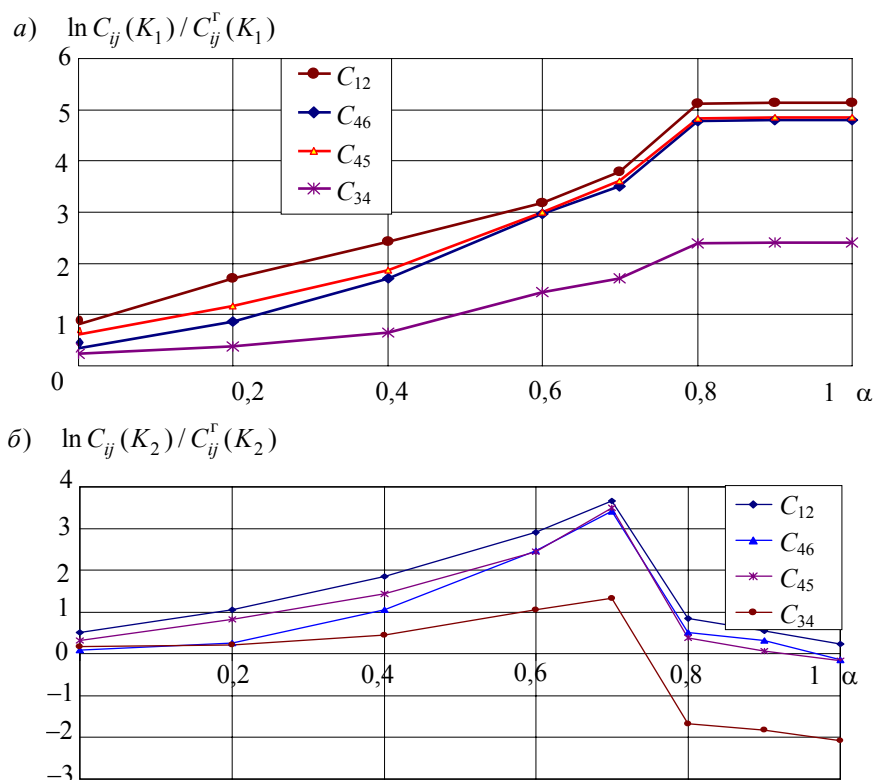


Рис. 2

Таким образом, использование многоэлементных электроемкостных преобразователей позволяет измерять влагосодержание водонефтяной эмульсии в диапазоне от 0 до 100 % с минимальной погрешностью в условиях структурной неоднородности многофазного потока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков В. Л. Автоматический контроль параметров нефтяных эмульсий. М.: Недра, 1992. С. 74.
2. Пат. 2383885 РФ, М. Кл. G01N27/22. Способ электроемкостной влагометрии водонефтяных эмульсий в потоке и устройство для его осуществления / Ю. И. Стеблев, Е. С. Нефедова. 2008.

#### Сведения об авторах

**Юрий Иванович Стеблев**

— д-р техн. наук, профессор; Самарский государственный технический университет, кафедра автоматизации производственных процессов в нефтегазовом и нефтехимическом комплексе;  
E-mail: steblev404@mail.ru

**Екатерина Сергеевна Ваиуркина**

— Самарский государственный технический университет, кафедра автоматизации производственных процессов в нефтегазовом и нефтехимическом комплексе; ст. преподаватель; E-mail: kat\_nef@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
автоматизации производственных процессов в  
нефтегазовом и нефтехимическом комплексе

Поступила в редакцию  
07.11.11 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.78

А. А. МАРАЕВ, И. А. КОНЯХИН, А. Н. ТИМОФЕЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНОЙ

Представлены основные результаты исследований эффективной энергетической чувствительности к смещениям фотоприемной части в системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной. Показано, что применение критерия энергетической чувствительности для таких систем особенно эффективно на стадии выбора излучающих, фотоприемных и оптических компонентов.

*Ключевые слова:* оптико-электронная система, полихроматическая равносигнальная зона, пространственное позиционирование.

Для оптико-электронных систем (ОЭС) с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ) характерны высокая эффективность при полной автоматизации процессов управления или измерения в статическом и динамическом режимах, а также возможность корректировки результатов с учетом влияния условий эксплуатации [1].

Возрастающие требования к точности при позиционировании объектов в строительстве, на железнодорожном транспорте, в самолетостроении и геодезии [2], а также при построении систем, предназначенных для предупреждения техногенных катастроф, обуславливают необходимость совершенствования ОЭС с ОРСЗ. В настоящее время осуществляются исследования по оценке возможности применения полихроматической ОРСЗ в целях учета влияния регулярной рефракции воздушного тракта [3] при использовании специальных алгоритмов обработки информативных параметров [4]. Оптическая равносигнальная зона формируется задатчиком базовой плоскости (ЗБП). При этом чувствительность к поперечным смещениям фотоприемной части (ФПЧ) ОЭС обуславливается энергетической чувствительностью. Понятие энергетической чувствительности ранее не применялось для полихроматического потока оптического излучения источников, образующих ОРСЗ, и было ограничено лишь монохроматическими составляющими оптического излучения [5].

В настоящей статье представлены основные результаты исследований эффективной энергетической чувствительности к смещениям ФПЧ в системах с ОРСЗ с учетом полихроматического потока оптического излучения источников, спектральной характеристики ФПЧ и параметров оптической системы, что более полно соответствует реальным условиям работы систем.

На рис. 1 приведена схема оптико-электронной системы с ОРСЗ, где  $I_1, I_2$  — источники излучения;  $f_1, f_2$  — частота модуляции источников,  $\Phi_1, \Phi_2$  — поток оптического излучения

источников  $I_1$  и  $I_2$  соответственно;  $E_1, E_2$  — облученность, создаваемая на приемнике источниками  $I_1$  и  $I_2$ ;  $l_{\text{п}}$  — размер переходной зоны,  $m_0$  — дистанция фокусировки.

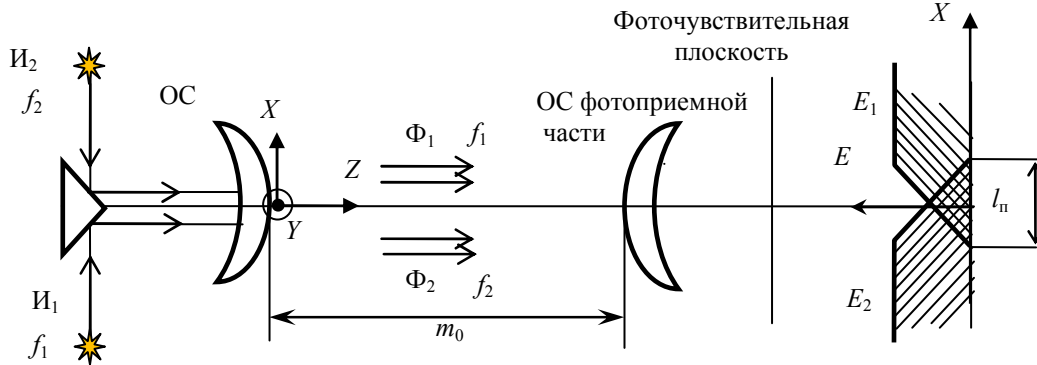


Рис. 1

Разностный поток в ОЭС с ОРМЧ [1], образованной разномодулированными потоками излучения  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , для одинаковых монохромных источников с учетом окончательной обработки электрических сигналов определяется выражением

$$d\Phi(x, y, z, \lambda) = \Phi_1(x, y, z, \lambda) - \Phi_2(x, y, z, \lambda),$$

где  $\Phi_1(x, y, z, \lambda)$  и  $\Phi_2(x, y, z, \lambda)$  — формируемые источниками  $I_1$  и  $I_2$  потоки оптического излучения, попадающие во входной зрачок объектива ФПЧ;  $x, y, z$  — координаты точки пространства в прямоугольной системе координат  $OXYZ$  (см. рис. 1);  $\lambda$  — длина волны источников оптического излучения.

Тогда при смещении ФПЧ на величину  $dx$  разностный поток (информативный поток рассогласования) определяется как

$$d\Phi(x + dx, y, z, \lambda) = d\Phi_1(x + dx, y, z, \lambda) - d\Phi_2(x + dx, y, z, \lambda).$$

Энергетическая чувствительность есть отношение разностного потока  $d\Phi(x + dx, y, z, \lambda)$  к соответствующему малому линейному смещению  $dx$  с учетом спектрального состава излучения однотипных источников в полосе длин волн  $\Delta\lambda$  (от  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ ). Выражение, определяющее энергетическую чувствительность  $W(x + dx, y, z, \lambda)$  в ОЭС, будет иметь следующий вид:

$$W(x + dx, y, z, \lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_1(x + dx, y, z, \lambda) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_2(x + dx, y, z, \lambda) d\lambda}{dx}.$$

Амплитуда потока рассогласования при противофазной модуляции потоков излучения источников с учетом зависимости распределения энергии в пределах переходной зоны  $l_{\text{п}}(\lambda)$  [1] определяется как

$$d\Phi(m, \lambda) = \frac{\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ПЧ}}}{m^2} \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L_{e1}(\lambda)}{l_{\text{п}}(\lambda)} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L_{e2}(\lambda)}{l_{\text{п}}(\lambda)} d\lambda \right) dx, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$  — пропускание атмосферы;  $\tau_{\text{ОС}}(\lambda)$  — пропускание оптической системы;  $S_{\text{ЗБП}}$  — площадь выходного зрачка объектива ЗБП;  $S_{\text{ПЧ}}$  — площадь входного зрачка объектива ФПЧ;  $L_{e1}(\lambda), L_{e2}(\lambda)$  — спектральная плотность энергетической яркости первого и вто-



рого источников оптического излучения в одном канале;  $m$  — расстояние между ЗБП и ФПЧ;  $l_{\text{п}}(\lambda)$  — линейный размер переходной зоны [1] в направлении исследуемой оси координат.

В общем виде размер переходной зоны определяется выражением

$$l_{\text{п}}(\lambda) = k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)m + D_{\text{ЗБП}} \frac{|m_0(\lambda) - m|}{m_0(\lambda)},$$

где  $k(\lambda)$  — коэффициент, характеризующий форму распределения aberrаций объектива ЗБП;  $\delta\varphi(\lambda)$  — угловая сферическая aberrация объектива ЗБП;  $D_{\text{ЗБП}}$  — диаметр выходного зрачка объектива ЗБП;  $m_0(\lambda)$  — дистанция фокусировки объектива ЗБП.

В соответствии с законами геометрической оптики дистанция фокусировки  $m_0(\lambda)$  определяется выражением

$$m_0(\lambda) = \frac{f'(\lambda)a}{a + f'(\lambda)},$$

где  $a$  — расстояние от передней главной плоскости объектива до ребра разделительной призмы, формирующей ОРСЗ;  $f'(\lambda)$  — заднее фокусное расстояние объектива ЗБП.

Следовательно, объектив, сфокусированный на расстояние  $m_{01}$  для длины волны  $\lambda_1$ , для  $\lambda_2$  будет сфокусирован на расстояние  $m_{02}$ , отличное от  $m_{01}$ , так как присутствуют хроматические aberrации объектива.

При одинаковом распределении спектральной яркости источников энергетическую чувствительность можно определить выражением для круглых или квадратных зрачков оптической системы ЗБП и ФПЧ:

$$W(m, \lambda) = \frac{2\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ФПЧ}}}{m^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda)\tau_{\text{ос}}(\lambda)L_e(\lambda)m_0(\lambda)}{k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)m_0(\lambda)m + D_{\text{ЗБП}}|m_0(\lambda) - m|} d\lambda,$$

где  $L_e(\lambda)$  — функция спектральной плотности энергетической яркости источника оптического излучения.

С учетом спектральной чувствительности фотоприемника эффективное значение энергетической чувствительности

$$W_{\text{эф}} = \frac{2\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ФПЧ}}}{m^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda)\tau_{\text{ос}}(\lambda)L_e(\lambda)m_0(\lambda)s(\lambda)}{k(\lambda)\delta\varphi(\lambda)m_0(\lambda)m + D_{\text{ЗБП}}|m_0(\lambda) - m|} d\lambda,$$

где  $s(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность фотоприемника ФПЧ.

Как видно из графика зависимости энергетической чувствительности от длины волны (рис. 2, кривая 1) при одинаковой яркости оптического излучения ( $10 \text{ Вт/м}^2$ ) полупроводниковых излучающих диодов (ПВД), на дистанции 50 м для объектива ПУЛ-Н [1] и серийно выпускаемых ПВД типа VetLux-L515RGBС (на рисунке — VL(R, G, B)) и 3Л136-А энергетическая чувствительность возрастает при смещении максимума спектра излучения ПВД в ИК-область. Эффективная энергетическая чувствительность (кривая 2) рассчитана с учетом ФПЧ на базе кремниевого фотодиода Hamamatsu 1133-14. При этом отношение величин  $W$  изменяется от 55 % при  $\lambda=0,43 \text{ мкм}$  (ПВД типа VL-(B)) до 84 % при  $\lambda=0,81 \text{ мкм}$  (ПВД типа 3Л136-А). Таким образом, эффективная чувствительность к смещению ФПЧ для системы

с ОРСЗ с учетом спектральной характеристики приемника определяет коэффициент полезного действия преобразований оптических сигналов и поэтому должна учитываться при выборе параметров системы.

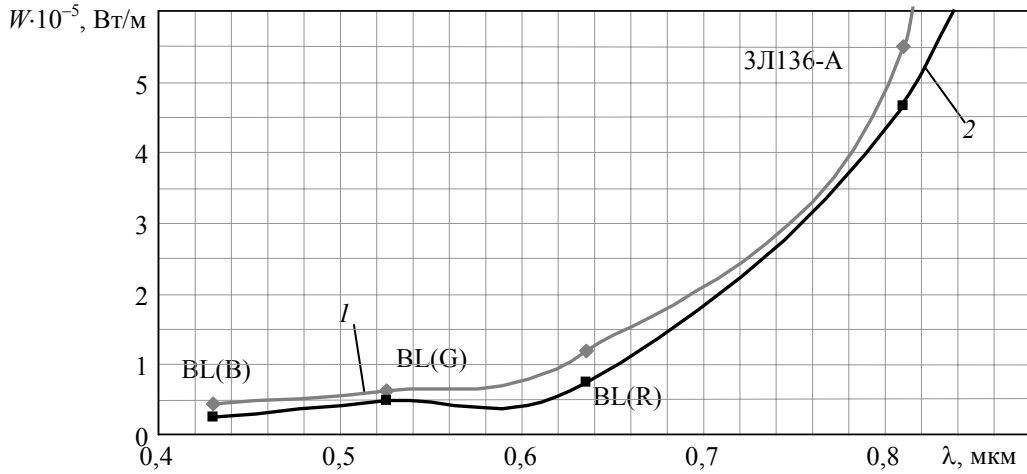


Рис. 2

Для полихроматической ОРСЗ, образованной, например, двумя каналами, суммарная эффективная энергетическая чувствительность определяется как

$$W_{\text{эф}\Sigma} = W_{\text{эф}1} + W_{\text{эф}2} = \frac{2\pi S_{\text{ЗБП}} S_{\text{ПЧ}}}{m^2} \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L'_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L''_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda \right),$$

где  $(\lambda_1, \lambda_2)$ ,  $(\lambda_3, \lambda_4)$  — диапазоны длин волн оптического излучения источников первого и второго каналов соответственно;  $L'_e(\lambda)$ ,  $L''_e(\lambda)$  — функция спектральной плотности энергетической яркости источников первого и второго каналов.

Для равноточного определения смещений ФПЧ, образованных в полихроматической ОРСЗ двумя каналами в разных диапазонах длин волн  $(\lambda_1, \lambda_2)$  и  $(\lambda_3, \lambda_4)$ , необходимо, чтобы энергетическая чувствительность была одинаковой в каждом канале, т.е.  $W_{\text{эф}1} = W_{\text{эф}2}$ . С учетом одинаковых значений величин  $S_{\text{ЗБП}}$ ,  $S_{\text{ПЧ}}$ ,  $D_{\text{ЗБП}}$  и  $m$  для двух каналов получаем

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L'_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \frac{\tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L''_e(\lambda) m_0(\lambda) s(\lambda)}{k(\lambda) \delta\varphi(\lambda) m_0(\lambda) m + D_{\text{ЗБП}} |m_0(\lambda) - m|} d\lambda, \quad (2)$$

откуда следует, что при одинаковом характере распределения aberrаций по длине волны компенсировать разность значений энергетической чувствительности в каналах можно путем изменения яркости источников. При этом отношение значений эффективных энергетических чувствительностей двух каналов дает коэффициент, который следует учитывать при коррекции потока оптического излучения во втором канале по отношению к первому. При одинаковом характере распределения aberrаций и отсутствии хроматических aberrаций для рассмотренных спектральных участков равенство (2) преобразуется к виду

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L'_e(\lambda) s(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \tau_{\text{атм}}(\lambda) \tau_{\text{ОС}}(\lambda) L''_e(\lambda) s(\lambda) d\lambda.$$

Основываясь на анализе хода кривой 2 (см. рис. 2), обеспечить равенство чувствительностей в каналах полихроматической ОРСЗ можно путем уменьшения яркости источников в канале с ПИД в ИК-области спектра.

Проведенные исследования показали, что предлагаемый критерий эффективной энергетической чувствительности к смещениям ФПЧ в системах с ОРСЗ с учетом сложного потока оптического излучения источников, спектральной характеристики фотоприемной части и параметров оптической системы рационально использовать на стадии выбора и оценки оптимальности применения оптоэлектронных и оптических элементов схемы ОЭС.

Применение предложенного критерия позволяет комплексно учитывать не только изменение спектрального распределения мощности излучения источников и спектрального распределения чувствительности приемников, но и изменения условий пропускания воздушного тракта. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении развития адаптивных алгоритмов спектральной селекции, учитывающих указанные изменения.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009 — 2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной. Монография / Под ред. Э. Д. Панкова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 1998. 238 с.
2. Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. и др. Направления развития оптико-электронных систем с оптической равносигнальной зоной // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 27—31.
3. Витол Э. А., Мусяков В. Л., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Реализация дисперсионного метода в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Сб. трудов VI Междунар. конф. „Прикладная оптика“, 18—21 окт. 2004 г., Санкт-Петербург. СПб, 2004. Т. 1. С. 37—40.
4. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга, Логос, 2007. 192 с.
5. Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование распределения энергетической чувствительности в полихроматической оптической равносигнальной зоне // Сб. трудов IX Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2010“, 18—22 окт. 2010 г. СПб: ГОИ им. С.И. Вавилова, 2010. Т. 1, ч. 1. С. 241—245.

#### Сведения об авторах

- Антон Андреевич Мараев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: antoshka87@gmail.com
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: igog@grv.ifmo.ru
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;  
E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
12.04.11 г.

А. С. МАЧИХИН, В. Э. ПОЖАР

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ КОЛЛИНЕАРНОЙ ДИФРАКЦИИ СВЕТА НА АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ

Рассмотрена задача передачи изображения, переносимого световым пучком, при коллинеарной дифракции последнего на акустической волне в кристалле. В общем виде (вне приближения малости двулучепреломления) получены закон трансформации изображения, передаточная функция и другие характеристики коллинеарных акустооптических фильтров.

**Ключевые слова:** акустооптический фильтр, коллинеарная дифракция, искажения изображения.

**Введение.** Коллинеарная дифракция представляет собой когерентное рассеяние света на объемной динамической дифракционной решетке, созданной ультразвуковой волной, при котором волновые векторы падающего  $\mathbf{k}_i$  и дифрагированного  $\mathbf{k}_d$  света и звука  $\mathbf{k}_s$  коллинеарны и связаны условием синхронизма

$$\mathbf{k}_i + \mathbf{k}_s = \mathbf{k}_d. \quad (1)$$

В случае если эти векторы направлены вдоль одной из осей симметрии кристалла (рис. 1), угловая ширина синхронизма может достигать значительной величины (несколько градусов по каждому направлению), а длина взаимодействия волн, ограниченная лишь размерами  $L$  кри-

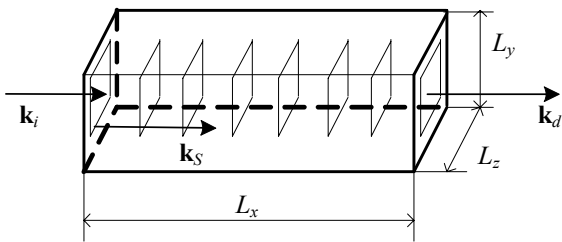


Рис. 1

сталла кварца, может быть большой (до 20 см в  $\text{SiO}_2$ ), что при прочих равных условиях обеспечивает повышение спектрального разрешения  $\lambda/\Delta\lambda \sim L$  и снижение управляющей мощности ультразвука  $P \sim L^{-2}$  [1]. Благодаря совокупности полезных качеств коллинеарные акустооптические (АО) фильтры находят широкое применение в задачах, связанных с передачей и обработкой изображений [2, 3].

Несмотря на то, что коллинеарный тип АО-дифракции достаточно хорошо изучен, а коллинеарные АО-фильтры для передачи изображений давно изготавливаются и эксплуатируются, в литературе коллинеарное АО-взаимодействие, как правило, рассматривают лишь в приближении малого двулучепреломления  $\eta = |n_e - n_o|/n_o \ll 1$  и лишь в плоскостях симметрии кристалла [4]. Более того, вопрос аналитического описания пространственных деформаций (аббераций) изображения без указанных приближений до сих пор не решен.

Настоящая статья посвящена анализу процесса передачи изображений при коллинеарном АО-взаимодействии в наиболее общем случае, который необходимо рассмотреть для вывода закона трансформации изображения  $\Delta\psi_1(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  и  $\Delta\psi_2(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  и вычисления передаточной функции  $T(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$ , а также основных параметров — угловой апертуры  $2\Delta\theta_{\max}$  и спектральной полосы пропускания  $\Delta\lambda$ . Здесь и далее  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\psi$  — значения углов распространения падающей и дифрагированной волн, выраженные в виде отклонения от главного луча падающего пучка; индекс „1“ определяет угол в полярной плоскости, а индекс „2“ — в азимутальной.

**Общее решение.** Для исследования абберационных свойств акустооптической ячейки необходимо определить закономерности распространения неколлимированного пучка, переносящего изображение, т.е. получить в явном виде зависимости направления  $\psi_i$  распространения световой волны после дифракции и величины волновой расстройки  $\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_d - \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s$  от углов падения света ( $\theta_i$ ) и распространения звука ( $\gamma_i$ ) для любой длины волны звука ( $\Lambda$ ) и для

каждой длины волны света ( $\lambda$ ). Как показано в работах [4—6], эти зависимости позволяют определить соответственно пространственно-спектральные и амплитудные искажения.

Для вычисления данных зависимостей необходимо рассмотреть коллинеарную дифракцию расходящегося светового пучка на акустической волне в одноосном кристалле. На рис. 2 приведена волновая диаграмма коллинеарной геометрии АО-взаимодействия в полярной плоскости. Пусть падающая волна имеет необыкновенную поляризацию „e“, а дифрагированная — обыкновенную „o“ (см. рис. 2).

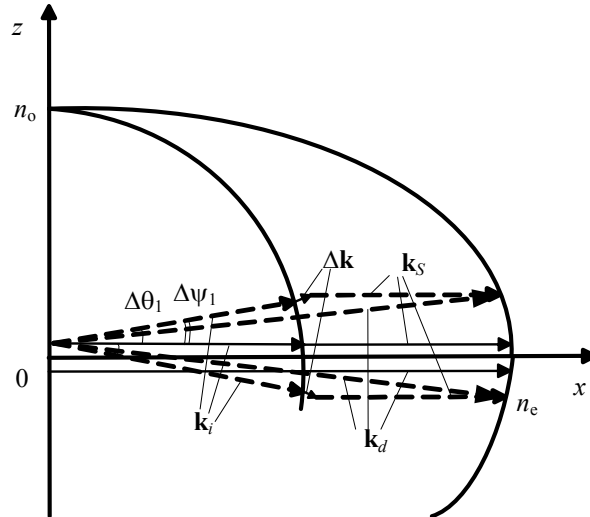


Рис. 2

Из решения системы уравнений синхронизма (1) в проекциях на оси  $x$ ,  $y$  и  $z$  можно получить величины  $\psi$  и  $\Delta k$  как функции углов  $\gamma$  и  $\theta$  [5]. Для случая коллинеарной осевой геометрии ( $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ ) получим

$$\psi_1 = \arctg \left( \frac{\xi(\theta_1) \sin \theta_1}{\sqrt{(\xi(\theta_1) \cos \theta_1 - \eta)^2 + 2\eta \xi(\theta_1) \cos \theta_1 (1 - \cos \theta_2)}} \right); \quad (2a)$$

$$\psi_2 = \arctg \left( \frac{\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \sin \theta_2}{\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \eta} \right); \quad (2б)$$

$$\Delta k = kn_o \left( \sqrt{(\xi(\theta_1) - \eta)^2 + 2\eta \xi(\theta_1)(1 - \cos \theta_2)} - 1 \right), \quad (2в)$$

где  $\xi(\theta_1) = n_e / \sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_1 + n_e^2 \sin^2 \theta_1}$  — параметр, характеризующий угловую зависимость величины двулучепреломления кристалла.

Следует отметить, что в отличие от ранее полученных формул [4] выражения (2а)—(2в) описывают дифракцию в общем виде, а не только в полярной и азимутальной плоскостях. Эти выражения справедливы также для произвольной величины двулучепреломления  $\eta$ .

**Пространственно-спектральные искажения изображения.** Для анализа пространственно-спектральных искажений необходимо сравнить изображения, полученные на разных длинах волн  $\lambda$ , на входе и выходе системы фильтрации, содержащей АО-ячейку: см. рис. 3, где 1 — исследуемый объект; 2, 6 — входной и выходной объективы; 3, 5 — поляризаторы; 4 — АО-ячейка; 7 — изображение. Для этого необходимо найти для каждого спектрального компонента света  $\lambda$  отображение входного изображения  $I_i(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  на выходное изображение  $I_d(\Delta\psi_1, \Delta\psi_2)$ . Углы  $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_i^0$  и  $\Delta\psi_i = \psi_i - \psi_i^0$  удобно отсчитывать от углов падения  $\theta_i^0$  и дифракции  $\psi_i^0$  некоей волны, которой соответствуют центральные точки исследуемого объекта и его изображения и которая будет называться „центральной“. В случае коллинеарной

геометрии в качестве „центральной“ логично выбрать падающую волну, соответствующую условию коллинеарности  $\theta_i^0 = \gamma_i$  и распространяющуюся после дифракции под тем же углом  $\psi_i^0 = \gamma_i$ . Если направление распространения совпадает с осью симметрии ( $\gamma_i = 0$ ), такой выбор обеспечит симметричную картину искажений изображения.

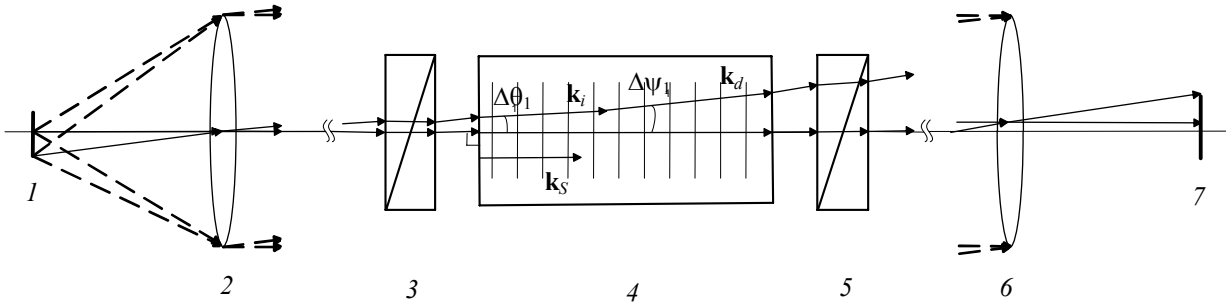


Рис. 3

Из выражений (2а) и (2б) следует, что закон трансформации изображения при коллинеарной АО-дифракции необыкновенно поляризованного света определяется следующим образом:

$$\Delta\psi_1(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2) = \text{arctg} \left( \frac{\xi(\Delta\theta_1) \sin\Delta\theta_1}{\sqrt{\xi^2(\Delta\theta_1) \cos^2\Delta\theta_1 + \eta^2 - 2\eta\xi(\Delta\theta_1) \cos\Delta\theta_1 \cos\Delta\theta_2}} \right), \quad (3a)$$

$$\Delta\psi_2(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2) = \text{arctg} \left( \frac{\xi(\Delta\theta_1) \cos\Delta\theta_1 \sin\Delta\theta_2}{\xi(\Delta\theta_1) \cos\Delta\theta_1 \cos\Delta\theta_2 - \eta} \right). \quad (3б)$$

Выражения (3а), (3б), полученные впервые, позволяют вычислять коэффициенты искажения изображения при коллинеарной АО-фильтрации (рис. 4) и выявлять причины искажений, что дает возможность оптимизировать характеристики АО-фильтров. На рис. 4, а представлена рассчитанная спектральная зависимость  $\Delta\psi_1(\Delta\theta_1) - \Delta\theta_1$  для коллинеарного АО-фильтра из SiO<sub>2</sub> (при  $\lambda=633$  нм,  $\Delta\theta_2 = 5^\circ$ ). Отклонение от оси абсцисс показывает величину монохроматических aberrаций, а спектральная зависимость отклонения (наклон кривых) — наличие хроматических aberrаций. Зависимость  $\Delta\psi_2(\Delta\theta_2) - \Delta\theta_2$  вследствие симметрии имеет идентичный вид. На рис. 4, б показан пример расчета (при  $\Delta\theta_1 = \Delta\theta_2 = 5^\circ$ ) для спектрального изображения объекта (выделен жирной линией), переданного через коллинеарный АО-фильтр.

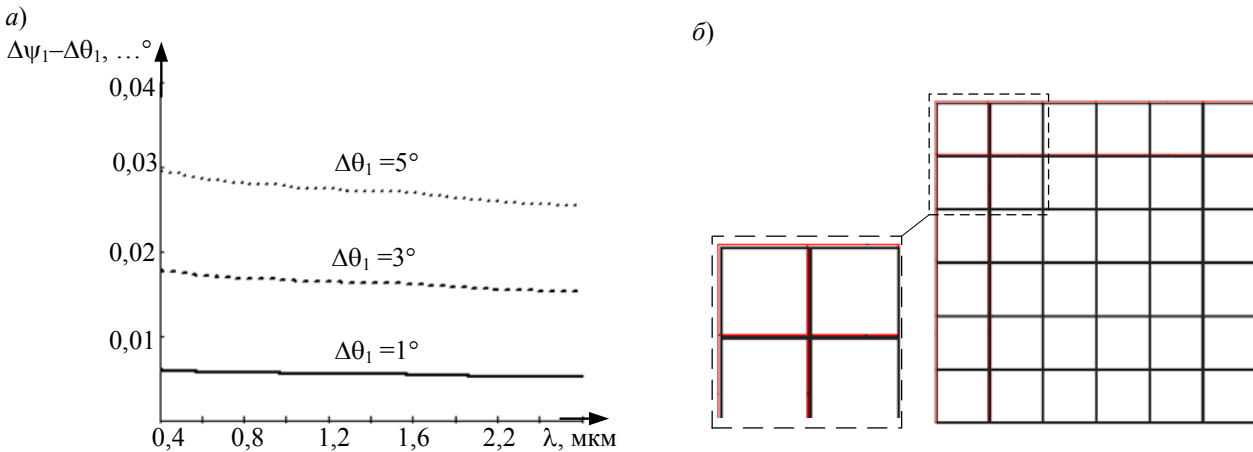


Рис. 4

Для приближенной количественной оценки пространственно-спектральных искажений, вносимых в изображение АО-фильтром, можно использовать разложение выражений (3а), (3б) по малым величинам отклонения  $\Delta\theta_i$  от „центрального“ направления:

$$\Delta\psi_i(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2) = \Delta\theta_i + b_{i1}\Delta\theta_1 + b_{i2}\Delta\theta_2 + c_{i11}\Delta\theta_1^2 + c_{i12}\Delta\theta_1\Delta\theta_2 + c_{i22}\Delta\theta_2^2. \quad (4)$$

Коэффициенты разложения имеют следующий физический смысл:  $b_{ij}$  — относительное (линейное) изменение масштаба изображения и его поворот ( $b_{12}$ ,  $b_{21}$ ),  $c_{ijk}$  — нелинейные (квадратичные) искажения. Спектральная зависимость всех коэффициентов от  $\eta$  и  $\xi$  описывает хроматизм искажений.

Расчет этих коэффициентов путем разложения выражений (3а), (3б) был проведен для коллинеарной геометрии АО-взаимодействия. Конкретные параметры расчета коэффициентов деформации изображения при прохождении через коллинеарный АО-фильтр ( $\text{SiO}_2$ ,  $\lambda = 0,4$  мкм,  $\delta\theta_1 = \delta\theta_2 = 2^\circ$ ) представлены в табл. 1. Вычисленные коэффициенты по знаку и величине хорошо согласуются со значениями, полученными в работе [4] в приближении малого двулучепреломления  $\eta \ll 1$ : отличия не превышают  $0,5\eta$ . Однако величины перекрестных членов  $b_{12}$ ,  $b_{21}$  и  $c_{i12}$ , необходимых для описания всего поля деформаций, в настоящей статье впервые вычислены аналитически в указанном приближении и численно.

Таблица 1

Расчет	Коэффициент деформации									
	в полярной плоскости					в азимутальной плоскости				
	$b_{11}$	$b_{12}$	$c_{111}$	$c_{112}$	$c_{122}$	$b_{21}$	$b_{22}$	$c_{211}$	$c_{212}$	$c_{222}$
Точный ( $\eta = 6 \cdot 10^{-3}$ )	$6 \cdot 10^{-3}$	$-8 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$
Приближенный ( $\eta \ll 1$ )	$\eta$	$-0,01\eta$	$-0,1\eta$	$-0,1\eta$	$-0,1\eta$	$0,01\eta$	$\eta$	$0,1\eta$	$0,1\eta$	$-0,1\eta$

Как видно из табл. 1, коэффициенты деформации изображений прямо пропорциональны  $\eta$ . Таким образом, с точки зрения минимизации искажений передаваемых изображений предпочтительнее выбирать акустооптические ячейки, изготовленные из материала с малым двулучепреломлением.

**Основные параметры.** Важнейшими параметрами АО-фильтров для передачи изображений являются спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda$  и угловая апертура  $2\Delta\theta_{\max}$ . Поскольку размеры области АО-взаимодействия в основном определяются размерами акустического пучка  $L_x \times L_y \times L_z$ , то допустимая волновая расстройка  $\Delta k$  по каждой из координат обратно пропорциональна соответствующему размеру:  $\Delta k_j \approx \beta / L_j$  ( $j = x, y, z$ ).

Спектральное разрешение  $\lambda/\Delta\lambda$  определяется шириной интервала длин волн  $\delta\lambda$ , в пределах которого наблюдается эффективная дифракция света. Этот интервал определяется из условия

$$|\Delta k(\Delta\lambda)| \leq \Delta k_{0,5} \approx \alpha/L, \tag{5}$$

где  $\alpha \approx 2,5 \dots 2,75$  — коэффициент, характеризующий функцию передачи по уровню 0,5 [7].

Из уравнений (2в) и (5), полагая в этих выражениях  $\lambda = \lambda + \Delta\lambda$ , получаем

$$\Delta\lambda = \frac{\alpha}{\pi L} \frac{\lambda^2}{\Delta n(\lambda)}. \tag{6}$$

Аналогичным образом угловая апертура  $2\Delta\theta_{\max}$  АО-фильтра определяется как угловой размер области, в которой

$$|\Delta k(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)| \leq \Delta k_{0,5}. \tag{7}$$

Эта величина позволяет оценить максимальное разрешение элементов изображения по обоим направлениям:  $N_i = 2\Delta\theta_{\max}/\delta\theta_{ид}$ , где  $\delta\theta_{ид} = 1,22(\lambda/A)$  — дифракционная расходимость, определяемая диаметром входной апертуры  $A$  АО-фильтра. Из выражений (2в) и (7) получим

$$2\Delta\theta_{\max} = 2\arccos \left( 1 - \frac{\left( \frac{\lambda}{2\pi L} \alpha \right)^2 + \frac{\lambda}{\pi L} \alpha n_o}{2n_e \Delta n} \right). \tag{8}$$

Полагая, как и в работе [7],  $\alpha \approx 0,8\pi$  (значение, получаемое в упрощенных моделях), из уравнений (6) и (8) получаем выражения, совпадающие с хорошо известными формулами [8]:

$$\Delta\lambda = \frac{0,8}{L} \frac{\lambda^2}{\Delta n(\lambda)}, \quad (9)$$

$$2\Delta\theta_{\max} \approx 2 \arccos(1 - 0,8\lambda/(L\Delta n)). \quad (10)$$

На рис. 5, а—в соответственно представлены построенные на базе формулы (2в) графики  $\Delta k(\lambda)$ ,  $\Delta k(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  и изолинии функции  $\Delta k(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$ ; также указано пороговое значение  $0,8\pi/L$  для коллинеарного АО-фильтра из  $\text{SiO}_2$  ( $\lambda = 400$  нм,  $L = 100$  мм,  $\theta_1 = \theta_2 = \gamma_1 = \gamma_2 = 0$ ). Построенные графики позволяют уже на этапе проектирования оценить угловое поле  $2\Delta\theta_{\max}$  и спектральное разрешение  $\Delta\lambda$  коллинеарного АО-фильтра.

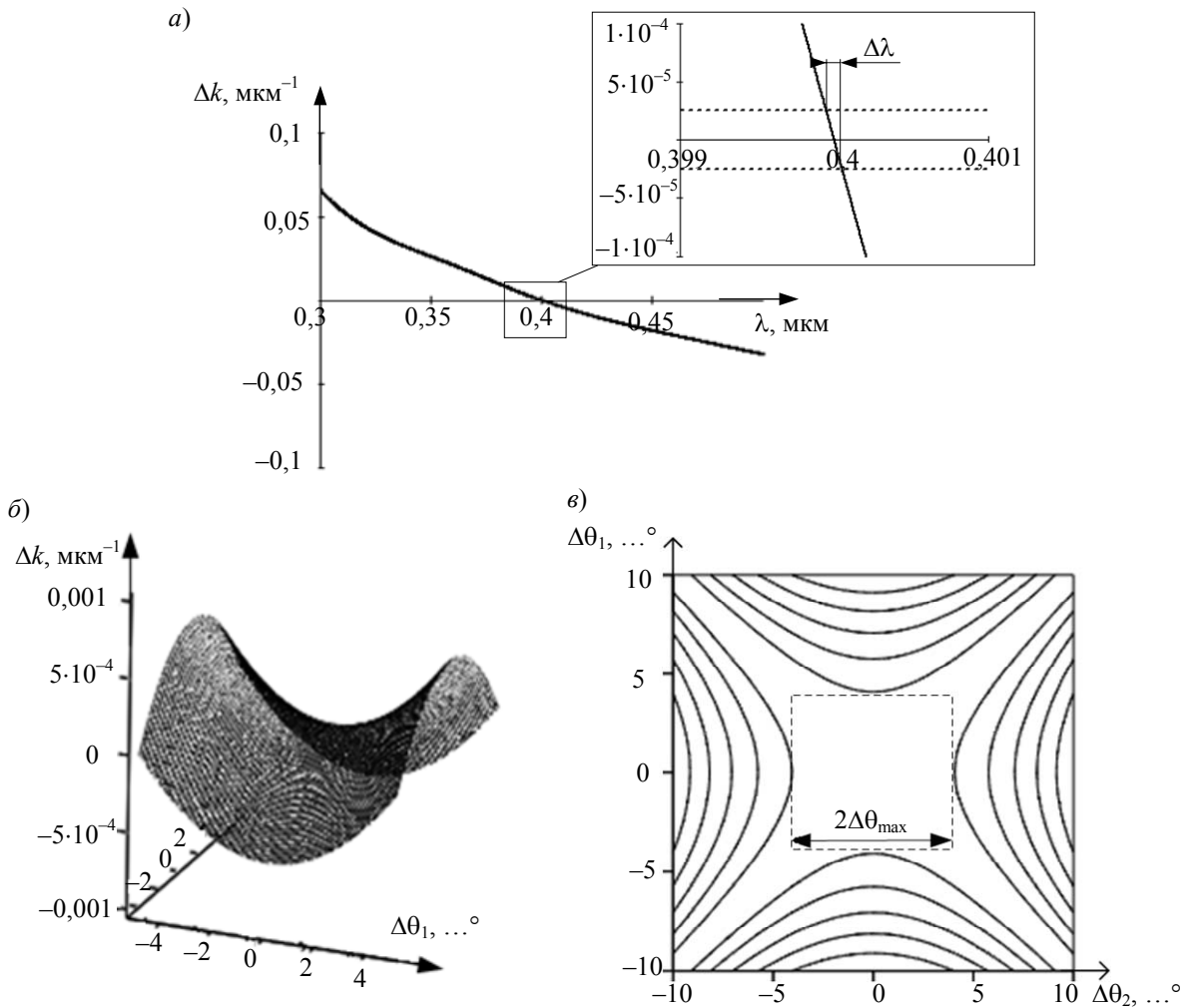


Рис. 5

На основе формул (6) и (8) был произведен расчет основных характеристик коллинеарных АО-фильтров. В табл. 2 приведены рассчитанные значения параметров для реального коллинеарного АО-фильтра, используемого на практике [9] ( $\text{SiO}_2$ ,  $\lambda = 0,633$  мкм,  $A = 6$  мм,  $L = 180$  мм).

Таблица 2

Параметр	Расчет	Эксперимент
Угловая апертура в кристалле $2\Delta\theta_{\max}$ , ...°	2,2	2
Угловая апертура в воздухе $2n_c\Delta\theta_{\max}$ , ...°	3,4	3,1
Разрешение $N$	298	270
Ширина спектрального синхронизма $\Delta\lambda$ , нм	0,22	0,20
Спектральное разрешение $(\lambda/\Delta\lambda)$	2900	3100

**Передаточная функция.** Выражение (2в), описывающее зависимость волновой расстройки  $\Delta k$ , позволяет построить передаточную функцию коллинеарного АО-фильтра (рис. 6) по интенсивности. Передаточная функция в одномерной модели дифракции определяется как [7]



$$T(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \lambda) = \Gamma^2 L^2 T_0 \text{sinc}^2 \left( L_x \sqrt{\Gamma^2 + (\Delta k(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \lambda)/2)^2} / \pi \right), \quad (11)$$

где  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$ ;  $\Gamma \approx (1/4) k_i (\delta\varepsilon/\varepsilon)$ ;  $\delta\varepsilon$  — амплитуда модуляции диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ .

На рис. 6 приведены построенные в соответствии с выражением (11) передаточные функции  $T(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$  коллинеарного АО-фильтра ( $\text{SiO}_2$ ,  $\lambda = 633$  нм,  $L = 100$  мм) при различных длинах волн  $\Lambda$  ультразвука. При точном ( $\Lambda = \Lambda_s = 69,6$  мкм) выполнении условия синхронизма (1) передаточная функция имеет вид креста (рис. 6, а), а даже при небольших отклонениях ( $\Lambda = 0,998 \Lambda_s$ ,  $\Lambda = \Lambda_s = 1,002 \Lambda_s$ ) от этого условия — вид двух дуг (рис. 6, б, в).

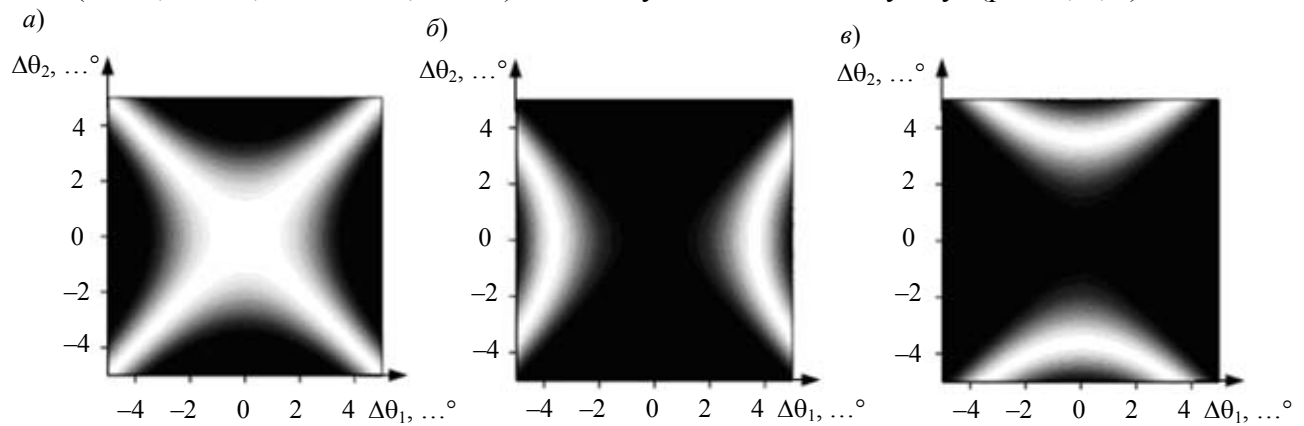


Рис. 6

Вид зависимостей  $T(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2)$ , а также полученных выражений для угловой апертуры  $2\Delta\theta_{\max}$  и спектральной ширины  $\Delta\lambda$  синхронизма коллинеарного АО-фильтра в приближении  $\eta \ll 1$  и малости углов  $\Delta\theta_1$  и  $\Delta\theta_2$  подтверждается расчетами и экспериментами других исследователей [3, 8].

**Заключение.** Полученные в настоящей статье формулы (3а) и (3б) позволяют в общем виде анализировать искажения, вносимые в изображение при коллинеарном АО-взаимодействии, а формулы (6) и (8) — оптимизировать параметры коллинеарных АО-фильтров. Следует отметить, что хотя все выражения и выводы получены для положительных одноосных кристаллов, они справедливы также и для отрицательных. Случай дифракции „о“-поляризованной световой волны может быть рассмотрен аналогичным изложенному в данной статье образом [10].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 09-02-12405.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harris S. E., Wallace S. W. Acousto-optic tunable filter // J. Opt. Soc. Amer. 1969. Vol. 59, N 6. P. 744—747.
2. Визен Ф. Л., Калинин Ю. К., Микаэлян Р. С. АО перестраиваемый фильтр на кристалле кварца // Тез. координац. совещания по акустооптике. М.: ВНИИФТРИ, 1975. С. 42—45.
3. Balakshy V., Kostyuk D. Acousto-optic image processing // Appl. Optics. 2009. Vol. 48, N 7/1. P. 24—32.
4. Pozhar V. E., Pustovoit V. I. Main features of image transmission through acousto-optical filter // Photonics and Optoelectronics. 1997. Vol. 4, N 2. P. 67—77.
5. Pozhar V. E., Machihin A. S. Computation of image distortion caused by wide angular acousto-optic interaction // Proc. of the X Intern. Conf. for Young Researchers WECOMF-2010. St. Petersburg, 2010. P. 23.
6. Мачихин А. С., Пожар В. Э. Передача изображений при широкоугольном акустооптическом взаимодействии // Квантовая электроника. 2010. № 40. С. 837—841.

7. Ананьев Е. Г., Пожар В. Э., Пустовойт В. И. Акустооптические методы измерения спектров оптического излучения // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62. С. 159—165.
8. Балакиши В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 279 с.
9. Ананьев Е. Г. О влиянии расходимости акустического пучка на характеристики коллинеарного акустооптического фильтра // Точные измерения в акустооптике и акустоэлектронике: Сб. науч. трудов. М.: ВНИИФТРИ, 1985. С. 31—35.
10. Мачихин А. С., Пожар В. Э. Влияние направления поляризации света на искажения изображений при акустооптической фильтрации // Сб. трудов 9-й Междунар. конф. „Прикладная оптика“. СПб, 2008. Т. 1, ч. 1. С. 232—235.

#### Сведения об авторах

- Александр Сергеевич Мачихин** — канд. физ.-мат. наук; Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, лаборатория акустооптической спектроскопии, Москва; E-mail: aalexanderr@mail.ru
- Витольд Эдуардович Пожар** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра оптико-электронных приборов научных исследований; E-mail: v\_pozhar@rambler.ru

Рекомендована  
НТЦ уникального приборостроения

Поступила в редакцию  
01.02.11 г.

УДК 535.317.2

С. В. ГАЙВОРОНСКИЙ, В. А. ЗВЕРЕВ

## АНАЛИЗ КОРРЕКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИЗ ТРЕХ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Предложен метод параметрического синтеза оптической системы из трех отражающих поверхностей, основанный на построении ее параметрической модели. Показано, что в рассматриваемой оптической системе коэффициент центрального экранирования по диаметру зрачка может принимать значения в диапазоне  $0,382 < K_3 < 0,634$ , что обуславливает ее применение при внеосевом ходе лучей, когда экранирование зрачка отсутствует.

**Ключевые слова:** оптическая система, отражающая поверхность, апертурная диафрагма, коэффициент экранирования, параметры, aberrации.

Любой вогнутый отражающий параболоид, как показано в работе [1], можно дополнить двухзеркальной системой, позволяющей устранить кому при сохранении коррекции сферической aberrации. Формируемая при этом апланатическая система состоит из трех отражающих поверхностей и не имеет промежуточного изображения: см. рис. 1, где  $S_1$  — главное зеркало,  $S_2$  — вторичное зеркало,  $S_3$  — зеркало. Для достижения максимальной величины углового поля изображаемого пространства осевая точка поверхности изображения должна располагаться в осевой точке вторичного зеркала или вблизи нее. В работе [2] показано, что задачу компенсации не только комы при сохранении коррекции сферической aberrации, но и астигматизма изображения, образованного оптической системой Пихта, можно решить и при сферической форме дополнительных отражающих поверхностей. В этой же работе на основе общей схемы, представленной на рис. 1, показана возможность коррекции четырех aberrаций — сферической aberrации, комы, астигматизма и кривизны поверхности изображения. Однако в этом случае, при приемлемом центральном экранировании световых пучков

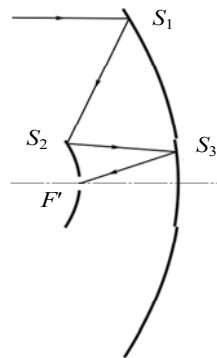


Рис. 1

лучей, плоскость изображения (плоскость приемника световой энергии) занимает конструктивно неудобное положение между второй и третьей отражающими поверхностями объектива.

В общем случае задачу параметрического синтеза оптической системы из трех отражающих поверхностей можно решить путем построения ее параметрической модели. Для этого, дополнив каждую поверхность сферической или несферической формы безаберрационной плоской поверхностью, образуем систему тонких зеркальных компонентов [3], обладающих оптической силой  $\varphi_i = (-1)^i \cdot 2/r_i$ , где  $r_i$  — радиус кривизны в осевой точке первой по ходу лучей отражающей поверхности компонента; при этом расстояние между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м компонентами  $d_i = (-1)^i d_{0i}$ , где  $d_{0i}$  — расстояние между  $i$ -й и  $(i+1)$ -й поверхностями в исходной системе. Будем считать, что в системе из трех компонентов  $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$ . Обозначим  $\varphi_3 = \varphi_k$ ,  $\varphi_2 = \varphi_0$ , а  $d_2 = d$ . Взаимосвязь параметров определим с помощью соответствующих коэффициентов в следующем виде:  $\varphi_1 = k_k \varphi_k$ ,  $\varphi_2 = k_0 \varphi_k$ ,  $d_1 = k_t d$ ,  $\varphi_k d = d_k$ ,  $s'_{F'} = k_s d$ .

Кривизна поверхности изображения, сформированного рассматриваемой оптической системой, определяется коэффициентом  $S_{IV} = -\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_3 = -\varphi_k(1 + k_k + k_0)$ . Положив  $S_{IV} = 0$ , находим, что  $k_0 = -1 - k_k$ . Применив при этом соотношения параксиальной оптики, получим уравнение [4]

$$d_k^3 - Ad_k^2 + Bd_k + C = 0, \quad (1)$$

где

$$A = \frac{1}{k_s} \left( 1 + \frac{k_s}{k_k k_t} \frac{1 + k_k^2 k_t}{1 + k_k} \right), \quad B = \frac{1 - k_k k_t}{k_s k_k k_t (1 + k_k)}, \quad C = \frac{1}{k_s k_k k_t (1 + k_k)}.$$

Уравнение (1) по сути определяет все многообразие оптических систем из трех тонких зеркальных компонентов. Конкретизация значений коэффициентов, входящих в уравнение, обуславливается требованиями к габаритным параметрам разрабатываемой оптической системы и к коррекции aberrаций сформированного ею изображения. В общем случае, решив кубическое уравнение (1) при выбранных значениях коэффициентов  $k_k$ ,  $k_t$  и  $k_s$ , находим величину  $d_k$ . В масштабе фокусного расстояния всей системы (при  $\varphi = 1$ ) оптическая сила  $\varphi_k$  характеризуется выражением

$$\varphi_k = \frac{1}{d_k} \frac{1}{1 + k_k^2 k_t - k_k k_t (1 + k_k) d_k}. \quad (2)$$

Определив величину  $\varphi_k$ , находим  $d = d_k / \varphi_k$ ,  $s'_{F'} = k_s d$ ,  $\varphi_1 = k_k \varphi_k$ ,  $\varphi_2 = -(1 + k_k) \varphi_k$ ,  $\varphi_3 = \varphi_k$ .

Конструктивно приемлемой можно считать оптическую систему при значениях коэффициентов  $k_k = k_t = k_s = 1$ . При этом коэффициенты уравнения (1) принимают значения:  $A=2$ ,  $B=0$ ,  $C=0,5$ , подставив которые в уравнение (1), получим  $d_k^3 - 2d_k^2 + 0,5 = 0$ .

Из трех решений уравнения (1) выбираем следующее:  $d_k = 0,597$ . Подставив соответствующие величины в выражение (2), находим, что  $\varphi_k = 2,078$ . В этом случае  $d = s'_{F'} = 0,287$ ,  $\varphi_1 = \varphi_3 = 2,078$ ,  $\varphi_2 = 4,156$ . Полученные значения соответствуют параметрам зеркального объектива, предложенного Рамзеем и воспроизведенного, по описанию в работе [5], Г. Г. Слюсаревым [6].

В центрированных оптических системах, содержащих отражающие поверхности сферической и несферической формы, при осесимметричном ходе световых пучков лучей

центральная часть этих пучков экранируется. Коэффициент центрального экранирования по диаметру входного зрачка определяется отношением

$$K_3 = \frac{h_2}{h_1} = h_2 = 1 - \varphi_1 d_1 = 1 - k_t \varphi_1 d. \quad (3)$$

В приведенном примере  $K_3 = 0,404$ .

Важным частным случаем трехкомпонентной зеркальной системы является система, в которой  $d_k = 1$ , а следовательно,  $d = 1/\varphi_k = f'_3 = s'_{f'}$ . Таким образом, в этом случае формируется телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений. При  $d_k = 1$  и  $k_s = k_t = 1$  уравнение (1) можно преобразовать к виду  $k_k^2 + k_k - 1 = 0$ .

Одно из двух решений этого уравнения дает значение  $k_k = 0,618$ . При этом из выражения (2) находим, что оптическая сила  $\varphi_k = 2,618$ , тогда  $\varphi_1 = 1,618$ ,  $\varphi_2 = -4,236$ ,  $\varphi_3 = 2,618$ ,  $d = 0,382$ . В этом случае  $K_3 = 0,382$ .

Из уравнения (3) следует, что коэффициент  $K_3 = 0$  при  $f' = d_1$  и  $K_3 = 1$  при  $\varphi_1 = 0$ . Таким образом, при изменении коэффициента центрального экранирования в интервале  $0 \leq K_3 \leq 1$  оптическая сила первого компонента изменяется в интервале  $0 \leq f'_1 \leq \infty$ . Отсюда следует, что выбор значения коэффициента  $K_3$  обуславливает выбор одного из множества сочетаний параметров объектива рассматриваемой конструкции. Однако для того чтобы при выбранном (или заданном) значении коэффициента  $K_3$  найти значения параметров системы, необходимы аналитические соотношения, определяющие требуемую взаимосвязь коэффициента  $K_3$  с параметрами системы.

Пусть  $h_i$  — расстояние от оптической оси до точки пересечения осевого виртуального (нулевого) луча с тонким компонентом, а  $\alpha_i$  — угол, образованный этим лучом с оптической осью. Тогда, применив формулы  $\alpha_{i+1} - \alpha_i = h_i \varphi_i$ ,  $h_{i+1} = h_i - \alpha_{i+1} d_i$ , при  $\alpha_1 = 0$  и  $h_1 = 1$  получим следующую систему уравнений:

$$\varphi_1 = \frac{1 - K_3}{k_t d}, \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \frac{K_3 - (k_s + \varphi_1) d}{K_3 d}, \quad (5)$$

$$\varphi_3 = \frac{1 - \varphi_1 - K_3 \varphi_2}{K_3 - (\varphi_1 + K_3 \varphi_2) d}. \quad (6)$$

Дополним полученную систему уравнений выражением

$$-\varphi_3 = S_{IV} + \varphi_1 + \varphi_2. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (4)–(6) методом Гаусса — методом исключения неизвестных, получаем уравнение относительно величины  $d$ :

$$k_s \frac{k_s - K_3 S_{IV}}{K_3} d^2 + \frac{k_s (1 - K_3)^2 - (1 + 2k_s) K_3 k_t}{K_3 k_t} d + K_3 = 0; \quad (8)$$

при  $S_{IV} = 0$

$$d^2 + \frac{k_s (1 - K_3)^2 - (1 + 2k_s) K_3 k_t}{k_s^2 k_t} d + \frac{K_3^2}{k_s^2} = 0, \quad (9)$$

при  $S_{IV} = 0$  и  $k_s = k_t = 1$

$$d^2 + (1 - 5K_3 + K_3^2)d + K_3^2 = 0. \quad (10)$$

Известно, что центральное экранирование световых пучков лучей приводит к снижению разрешающей способности сформированного изображения. Принято считать экранирование допустимым при  $K_3 \leq 0,3$ . Уравнение (10) имеет вещественные положительные решения лишь при  $K_3 \geq 0,382$ , что вносит соответствующие ограничения на применение оптической системы рассматриваемой конструкции. Однако, положив в основу принципиальную схему рассматриваемого объектива, можно построить центрированную или нецентрированную трехзеркальную систему при внеосевом ходе лучей, а следовательно, при внеосевом (кольцо на круге) изображении, как показано на рис. 2. При этом полученная система содержит внеосевые элементы первой и третьей отражающих поверхностей и осевой элемент второй поверхности [7, 8]. В любом случае для достижения хорошего качества изображения необходима, прежде всего, взаимная компенсация первичных aberrаций, вносимых в сформированное изображение каждой из отражающих поверхностей.

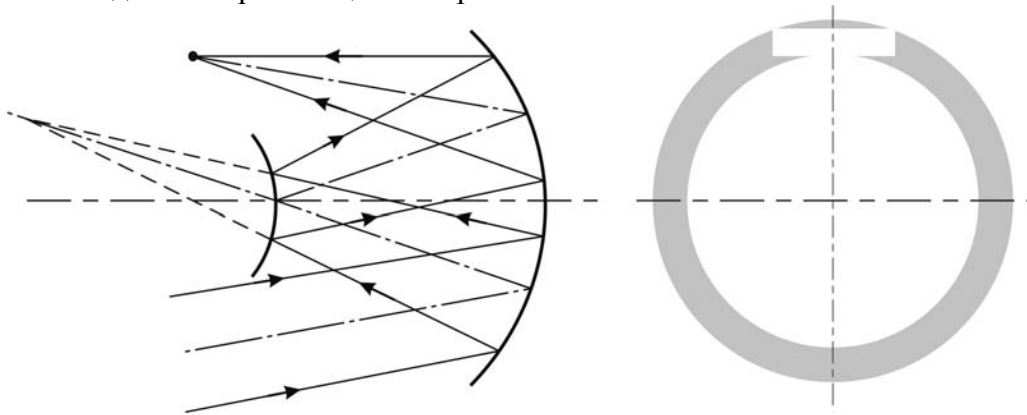


Рис. 2

Первичная сферическая aberrация, кома и астигматизм определяются соответственно коэффициентами  $S_I^*$ ,  $S_{II}^*$ ,  $S_{III}^*$ , причем [9]

$$S_I^* = B_0, \quad S_{II}^* = K_0 + qB_0, \quad S_{III}^* = C_0 + 2qK_0 + q^2B_0,$$

где

$$B_0 = \sum_{i=1}^m h_i Q_i; \quad K_0 = -\sum_{i=1}^m W_i + \sum_{i=2}^m h_i S_i Q_i; \quad C_0 = \sum_{i=1}^m \frac{n_i \alpha_{i+1} - n_{i+1} \alpha_i}{n_i n_{i+1} h_i} - 2 \sum_{i=2}^m S_i W_i + \sum_{i=2}^m h_i S_i^2 Q_i;$$

$$W_i = \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta(1/n_i)} \left( \Delta \frac{\alpha_i}{n_i} \right), \quad Q_i = P_i + T_i \sigma_i, \quad P_i = \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta(1/n_i)} W_i, \quad T_i = \frac{(\Delta n_i \alpha_i)^3}{(\Delta n_i)^2}, \quad S_i = \sum_{k=2}^{k=i} \frac{d_{k-1}}{k_{k-1} h_k n_k}.$$

В рассматриваемом случае

$$B_0 = P_1 + T_1 \sigma_1 + K_3 (P_2 + T_2 \sigma_2) + k_s d (P_3 + T_3 \sigma_3);$$

$$K_0 = -W_1 - W_2 - W_3 + K_3 S_2 (P_2 + T_2 \sigma_2) + k_s d S_3 (P_3 + T_3 \sigma_3);$$

$$C_0 = -2S_2 W_2 - 2S_3 W_3 + K_3 S_2^2 (P_2 + T_2 \sigma_2) + k_s d S_3^2 (P_3 + T_3 \sigma_3);$$

$$W_1 = \frac{1}{2} \varphi_1^2, \quad W_2 = \frac{1}{2} K_3 \varphi_2 (2\varphi_1 + K_3 \varphi_2), \quad W_3 = \frac{1}{2} k_s \varphi_3 d (2 - k_s \varphi_3 d);$$

$$P_1 = \frac{1}{4} \varphi_1^3, \quad P_2 = \frac{1}{4} K_3 \varphi_2 (2\varphi_1 + K_3 \varphi_2)^2, \quad P_3 = \frac{1}{4} k_s \varphi_3 d (2 - k_s \varphi_3 d)^2;$$

$$T_1 = \frac{1}{4} \varphi_1^3, \quad T_2 = \frac{1}{4} K_3^3 \varphi_2^3, \quad T_3 = \frac{1}{4} k_s^3 \varphi_3^3 d^3;$$

$$S_1 = 0, \quad S_2 = \frac{k_t}{K_3} d, \quad S_3 = \frac{1 + k_s k_t d}{k_s K_3}.$$

В рассматриваемой конструкции оптической системы оптическая сила первого компонента  $\varphi_1 > 0$ . Следовательно, в соответствии с формулой (4) значение коэффициента экранирования  $K_3$  должно удовлетворять условию:  $K_3 < 1$ . Оптическая сила второго компонента  $\varphi_2 < 0$ , следовательно, в соответствии с формулой (5) коэффициент  $K_3$  должен удовлетворять условию  $K_3 < (1 + k_t k_s d) / (1 + k_t)$ . При  $k_t = k_s = 1$  уравнение (10) можно преобразовать к виду:  $K_3^2 - 3K_3 + 1,5 = 0$ , отсюда следует, что значениям  $\varphi_1 > 0$  и  $\varphi_2 < 0$  удовлетворяет значение  $K_3 < 0,634$ . Таким образом, в рассматриваемой оптической системе коэффициент центрального экранирования по диаметру зрачка может принимать значения в диапазоне  $0,382 < K_3 < 0,634$ .

Для ряда значений коэффициента  $K_3$  из интервала  $0,4 \leq K_3 \leq 0,6$  при выбранных значениях коэффициентов  $k_s$  и  $k_t$  решаем уравнение (9), откуда находим величину  $d$ . Подставив значение  $d$  в формулы (4), (5) и (6), найдем остальные параметры рассматриваемой оптической системы. Далее, подставив значения параметров системы в выражения, определяющие коэффициенты  $B_0$ ,  $K_0$  и  $C_0$ , получим систему уравнений относительно коэффициентов деформации  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  отражающих поверхностей, т.е. относительно коррекционных параметров системы. Полученные уравнения определяют условия взаимной компенсации соответствующих aberrаций изображения при  $B_0 = 0$ ,  $K_0 = 0$  и  $C_0 = 0$ . Решив при этих условиях систему уравнений относительно величин  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , получим полный набор параметров оптической системы из трех отражающих поверхностей, формирующей изображение, свободное от первичных сферической aberrации, комы, астигматизма и кривизны поверхности (при  $S_{IV} = 0$ ).

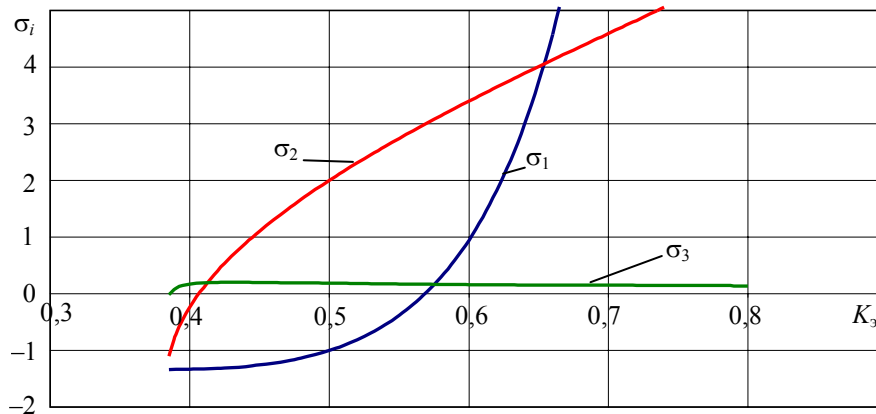


Рис. 3

На рис. 3 представлена зависимость коэффициентов деформации  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  от коэффициента экранирования  $K_3$  при  $k_t = k_s = 1$ . Как видно из графиков, при некоторых значениях коэффициента экранирования можно получить оптическую систему, в которой один из компонентов будет сферической формы. Так, например, при  $K_3 = 0,57$  главное зеркало будет иметь сферическую форму, а при  $K_3 = 0,404$  сферическим будет вторичное зеркало.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Picht J. Bestimmung eines aus einem beliebigen Paraboloidspiegel und einem Zwei—Spiegel—Zusatzsystem bestehenden Drei—Spiegel—System // Optik. 1951. В. 8. S. 85.
2. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. С. 312.

3. Зверев В. А., Шепелевич А. Н. Понятие тонкого компонента в системе отражающих поверхностей // Оптич. журн. 2006. Т. 73, № 12. С. 21—26.
4. Зверев В. А., Шепелевич А. Н. Параметрическая модель трехкомпонентной системы отражающих поверхностей // Там же. 2007. Т. 74, № 4. С. 47—50.
5. Rumsey N. I. A. Optical Instruments and Techniques. London, Oriel Press, 1970.
6. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
7. Грамматин А. П., Сычева А. А. Трехзеркальный объектив телескопа без экранирования // Оптич. журн. 2010. Т. 77, № 1. С. 24—27.
8. Pat. 4733955 US. Reflective Optical Triplet Having a Real Entrance Pupil / L. G. Cook. 1988.

**Сведения об авторах****Станислав Викторович Гайворонский**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;  
E-mail: gaivoronsky@mail.ru

**Виктор Алексеевич Зверев**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post\_vaz@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
07.12.11 г.

УДК 535.551

В. А. ТРОФИМОВ, Ю. Т. НАГИБИН, М. Л. ШВАНОВА

**БЕСКОНТАКТНЫЙ ПНЕВМООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ  
ВНУТРИГЛАЗНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Рассматривается разработанный бесконтактный метод измерения внутриглазного давления. Описана физико-математическая модель измерения искомого параметра при пневматическом воздействии на роговицу глаза.

**Ключевые слова:** внутриглазное давление, роговица глаза, тонометр, глаукома.

Диагностика опасного и широко распространенного заболевания органов зрения — глаукомы — является одной из важнейших задач офтальмологии. Эффективность лечения этой болезни в значительной степени зависит от своевременности ее обнаружения. На ранней стадии заболевания глаукома проявляется лишь повышением внутриглазного давления (ВГД), что обуславливает необходимость периодического измерения ВГД для людей, превысивших сорокалетний возраст.

Наиболее простыми и широко распространенными являются контактные методы измерения ВГД, в основу которых положен механический контакт мерительного инструмента с тканями глаза пациента. Такой контакт осуществим лишь при наличии анестезии, оказывающей нежелательное влияние на процесс зрительного восприятия. Существенный недостаток контактных методов заключается в том, что вес тонометра, используемого при выполнении измерений, повышает ВГД. Кроме того, при контактном методе может быть травмирован эпителий роговицы. На точность измерений ВГД влияет также опыт и квалификация оператора, производящего измерения. Перечисленные факторы и ряд других [1, 2] ограничивают

возможность организации диспансеризации населения. В этой связи актуальность разработки методов и приборов, свободных от наиболее очевидных несовершенств, не вызывает сомнений.

Известны бесконтактные апланационные тонометры, позволяющие измерять внутриглазное давление без физического контакта прибора с поверхностью роговицы глаза [3—6] (тонометры Гролмана и „Пульсар“). Эти приборы, безусловно, стали научным прорывом в технике измерения ВГД, но и им присущи существенные недостатки:

— при измерении ВГД с использованием названных приборов необходимо обеспечить полное уплощение роговицы глаза с помощью пневматического импульса, что может вызвать неприятные болевые ощущения у человека и даже травмировать глаз;

— наблюдаются, как отмечают сами авторы, значительные расхождения между результатами измерений высоких значений ВГД стандартным контактным методом [1] и бесконтактными методами [4, 5];

— затруднены измерения ВГД при дефектной роговице (помутнение, рубцы и т.д.), а также у пациентов со значительной близорукостью или дальнозоркостью [6, 7]; это связано с тем, что пациент в процессе проведения измерений должен с помощью сложной юстировочной системы четко увидеть специальную мишень, в противном случае пневматический импульс может воздействовать на роговицу по касательной, что приведет к завышению значения ВГД.

Таким образом, разработка бесконтактного метода измерения ВГД, позволяющего повысить точность измерений, снизить их травматичность и обеспечить возможность обследования пациентов с существенными дефектами зрения является важным элементом социальных программ диспансеризации.

Одним из способов совершенствования техники тонометрии ВГД может служить так называемый пневмооптический метод [8]. Представим роговицу глаза в виде тонкой сферической эластичной пленки, находящейся под действием сил внутреннего и внешнего давления, а также силы поверхностного натяжения. В этом случае будет справедливо уравнение Лапласа [9], определяющее связь радиуса  $R$  кривизны такой пленки (роговицы) с коэффициентом ее поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) и разностью давлений вблизи вогнутой ( $p$ ) и выпуклой ( $p_a$ ) поверхностей пленки (т. е. ВГД и атмосферного давления вблизи поверхности глаза):

$$p - p_a = \frac{2\sigma}{R}. \quad (1)$$

Пусть на роговицу глаза падает световой пучок под углом  $\varphi_0$  к оптической оси  $X$  глаза (рис. 1). В соответствии с геометрией схемы можно показать, что угол отражения  $\beta$  светового луча зависит от  $\varphi_0$ , радиуса кривизны роговицы  $R$  и расстояния  $y$  от точки падения пучка на роговицу до оптической оси глаза:

$$\beta = \varphi_0 + \frac{2y}{R}. \quad (2)$$

Пусть вследствие пневматического воздействия атмосферное давление  $p_a$  вблизи поверхности роговицы изменилось (увеличилось) на величину  $\Delta p_a$ , т. е.  $p_a = p_{a0} + \Delta p_a$ , где  $p_{a0}$  — атмосферное давление в отсутствие пневматического воздействия. Это приведет к соответствующему изменению радиуса кривизны роговицы на величину  $\Delta R$  (рис. 2).

При  $\varphi_0 = \text{const}$  из уравнения (2) следует, что малое изменение  $\Delta\beta$  равно

$$\Delta\beta = \frac{2}{R} \Delta y - 2y \frac{\Delta R}{R^2}.$$

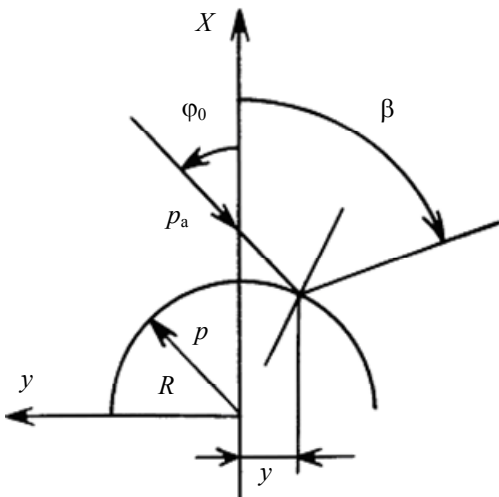


Рис. 1



Полагая ВГД неизменным, т.е. при  $p = \text{const}$ , из уравнения (1) получим

$$\frac{\Delta R}{R^2} = \frac{\Delta p_a}{2\sigma}.$$

Величину  $\Delta y$  можно определить по геометрии отражения луча (см. рис. 2), где  $d$  — радиус роговицы;  $S$  — величина смещения центра роговицы вследствие пневматического воздействия:

$$\Delta y = \frac{\varphi_0}{2} (d^2 - y^2) \frac{\Delta R}{R^2} \frac{1}{1 - \frac{\varphi_0}{R}}.$$

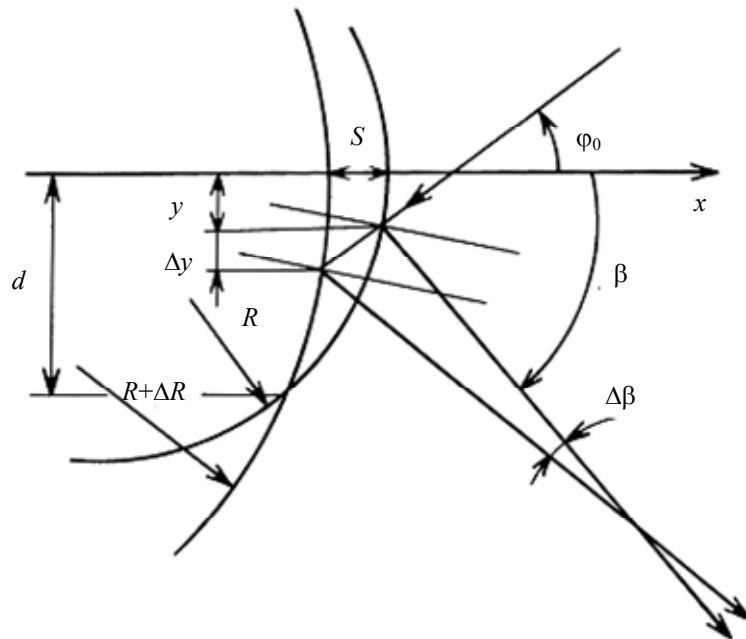


Рис. 2

Обозначим приведенное значение ВГД через  $P$ :  $P = p - p_{a0}$ . Выполнив соответствующие подстановки, после преобразований получим

$$\Delta\beta = -\frac{\Delta p_a}{\sigma} \left[ y - \frac{\varphi_0 (d^2 - y^2)}{4\sigma} p \frac{1}{1 - \frac{\varphi_0 y}{R}} \right].$$

При условии  $\varphi_0 y / R \ll 1$ , что практически выполнимо с учетом уравнения (1), получим

$$\Delta\beta \approx -\frac{\Delta p_a}{\sigma} \left[ y - \frac{\varphi_0 (d^2 - y^2)}{4\sigma} p \right], \quad (3)$$

откуда следует, что величина  $\Delta\beta / \Delta p_a$  квадратично зависит от величины  $y$  и линейно зависит от искомого значения  $P$ . Величина  $\Delta\beta$  достигает минимального значения при  $y = 0$ , что соответствует падению луча в центр роговицы. Из уравнения (3) видно также, что при  $\varphi_0 = 0$  величина  $\Delta\beta$  не будет зависеть от  $P$ . Следовательно, при проведении измерений предлагаемым пневмооптическим методом необходимым условием является  $\varphi_0 \neq 0$ , т.е. пучок света, падающий на роговицу, не должен быть параллелен оптической оси глаза. Кроме того, согласно уравнению (3), чем больше будет угол  $\varphi_0$ , тем значительнее  $\Delta\beta$  будет зависеть от  $P$ .

Идея пневмооптической тонометрии существенно отличается от известных попыток использования иных физических методов. Есть основание полагать, что предложенный в настоящей статье метод может послужить толчком к развитию этого направления в тонометрии ВГД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goldmann H.* Applanation tonometry. Glaucoma // Transact. of the 2nd Conf., 1956, Princeton. USA, NJ: Madison Printing Co Inc., 1957. P. 167—220.
2. *Нестеров А. П., Бунин А. Я., Кацнельсон А. А.* Внутриглазное давление. Паталогия и физиология. М.: Наука, 1974. 381с.
3. Pat. 3585849 US. Method and Apparatus for Measuring Intraocular Pressure/ *B. Grolman.* 1971. June 22.
4. *Forbes M., Piko G., Grolman B.* A noncontact applanation tonometer // Arch. Ophthalmol. 1974. Vol. 91, N 2. P. 134—140.
5. *Yucel A. A., Sturmer J. S., Gloor B.* Vergleichende tonometrie mit dem Keeler Lnft-Impyls non kontakttonometer Goldmann // Klin. Mbl. Augenheilk. 1990. N 197. S. 329—334.
6. *Graf M., Hoffrman O. F.* Reproducibility of NCT results comparasion with the Goldmann applanation tonometer // Klin. Mbl. Augenheilk. 1992. N 6. S. 678.
7. *Burman B.* Comparision between the NCT and Mackay-Marg tonometer // American J. of Optometry and Physiological Optics. 1974. N 1. P. 34—38.
8. Пат. 2067845 РФ. Бесконтактный способ измерения внутриглазного давления и бесконтактный тонометр / *В. А. Трофимов, А. Л. Дмитриев, Ю. Т. Нагибин* и др. // Бюлл. Открытия, изобретения. 1996. № 29.
9. *Фридрихсберг Д. А.* Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1984. 367 с.

**Сведения об авторах**

- Владимир Анатольевич Трофимов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;  
E-mail: troftu@mail.ru
- Юрий Тихонович Нагибин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;  
E-mail: nagibin77@mail.ru
- Мария Леонидовна Шванова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем;  
E-mail: shvanova@bk.ru

Рекомендована кафедрой  
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию  
11.01.11 г.

В. К. БАЛЯ, И. Ю. ДЕНИСЮК

## ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОСТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ГРАВЕРА

Рассмотрены возможности формирования с использованием лазерного гравера микронных структур и оптических микроэлементов, таких как решетки микропризм. Показаны источники физических ограничений при формировании оптической поверхности, определены предельно малые размеры структур, которые можно получить с использованием данного метода записи.

**Ключевые слова:** лазерная гравировка, микрооптика, решетки микропризм, абляция полимеров.

**Введение.** Лазерная фрезеровка — это технология, использующая лазерное излучение для абляции материалов, при этом материал либо расплавляется, возгорается, сублимируется, либо выдувается струей газа, при этом края структуры после обработки имеют качественную поверхность.

Лазерная фрезеровка (абляция) используется, например, для изготовления микромеханических элементов. Так, в работе [1] рассмотрены процессы существенного уменьшения вязкости полиметилметакрилата (ПММА) при нагревании и абляции, а также связанные с ними искажения формы получаемых элементов. Данная технология, кроме изготовления планарных элементов или элементов фиксированной высоты, пригодна и для получения 3-мерных структур заданной формы, например микролинз, посредством послойного дозированного снятия обрабатываемого полимера на заданную глубину путем абляции при воздействии лазерного излучения. Схема реализации данного процесса для создания матрицы микролинз приведена на рис. 1 в соответствии с работой [2]. В частности, в работе использовался эксимерный лазер с длиной волны 248 нм, обеспечивающий послойное снятие полимера. В результате задания многих последовательных проходов лазерного излучения возможно получение фактически любой желаемой формы 3D-элемента.

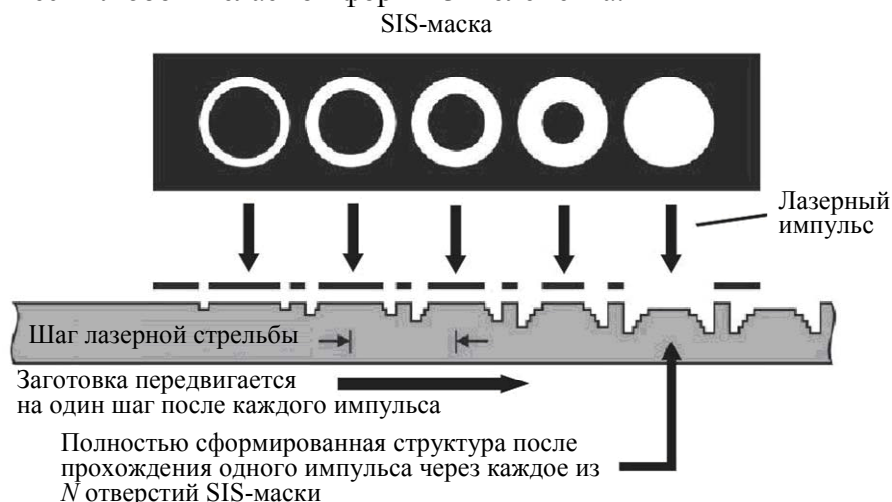


Рис. 1

Лазерный гравер в настоящее время является одним из наиболее доступных и эффективных аппаратов для получения 2- и 3-мерных микроструктур, однако возможности лазерного гравера, предназначенного для изготовления фотомасок и флексоформ для высокой печати (спецмодификация), применительно к записи микрооптических элементов практически не изучены.

Такие общепромышленные аппараты лазерной гравировки более просты, производительны и их разрешение составляет не более 2 мкм. Например, аппарат Laser Graver LG 10F15, использованный при исследованиях, описываемых в настоящей статье, обрабатывает полимер на глубину 20 мкм с разрешением 2,5 мкм при размере площади обработки 200×200 мм за 10 часов. Такая матрица достаточна для практических целей, например для изготовления штампа для эмбоссинга. Следовательно, этот аппарат позволяет изготавливать не только продукцию, предназначенную непосредственно для производства, но и лабораторные образцы структур микронных размеров для научных исследований.

Предполагается, что низкое разрешение лазерного гравера не позволяет изготавливать элементы микрооптики, поскольку создает слишком большую шероховатость поверхности. Однако с учетом особенностей конкретного лазерного гравера, а также свойств обрабатываемого материала оказалось возможным получение элементов со значительно меньшей шероховатостью поверхности.

**Условия эксперимента.** В ходе эксперимента использовался лазерный гравер Laser Graver LG 10F15, обеспечивающий формирование структур с разрешением до 2,5 мкм (10160 dpi). Было проведено исследование его предельных возможностей для достижения микронных разрешений, а также выполнен анализ зависимости формируемых структур от типа обрабатываемого материала и условий обработки.

Аппарат предназначен для обработки черной полимерной или металлизированной пленки методом абляции поверхностного слоя лучом Nd—YAG-непрерывного лазера с длиной волны 1,06 мкм. В данной работе эксперименты по формированию микроструктур проводились с использованием полиэфировой пленки с термочувствительным слоем на базе ПММА с наночастицами сажи, обеспечивающими поглощение лазерного излучения (Пленка термочувствительная ТУ 2379-027-00205156-96). Толщина испаряемого слоя 8 мкм.

Для создания изображения пленку фиксируют на барабане лазерного гравера. Инфракрасное лазерное излучение фокусируется на поверхности масочного слоя в круглое пятно диаметром около 2 мкм. В результате материал в области фокусировки пятна мгновенно нагревается, что приводит к его полному удалению. В процессе гравирования для создания изображения реализуется двухмерная развертка с модуляцией лазерного излучения в соответствии с компьютерным файлом изображения. Одна координата направлена вдоль окружности барабана, другая — вдоль его оси. Диаметр светового пучка лазерного излучения примерно равен его осевому смещению за один оборот барабана, что обеспечивает частичное перекрытие отдельных витков (называемых строками). Это позволяет сформировать окна с полностью снятым поверхностным слоем, так же как и заданное распределение точек изображения.

Для удаления участков пленки, подлежащих обработке, важно обеспечить разложение материала с испарением летучих продуктов деструкции, а не его сгорание или плавление, что обеспечивается выбором обрабатываемого полимера. Полная деструкция полимерного слоя с выходом летучих продуктов и отсутствием частичного подплавления соседних участков обрабатываемой поверхности происходит при воздействии лазерного импульса на близкий к ПММА акрилат с частичной поперечной шшивкой.

Использование ПММА обусловлено полной деструкцией облучаемого материала [1]. Этот процесс протекает следующим образом: при нагреве до 115 °С ПММА переходит в вязкотекучее состояние, переход в жидкость происходит при 200 °С (переход в жидкое состояние называем плавлением [3]), а при 360 °С начинается разложение, протекающее в два этапа — разрыв полимерной цепи по виниловой группе и испарение мономера [1]. При лазерной абляции ПММА быстро нагревается до температуры деструкции. При этом под быстрым нагревом понимается нагрев со скоростью, превышающей скорость перетекания обрабатываемого материала.

**Экспериментальные результаты.** При анализе микроструктур установлено, что основные наблюдаемые искажения формы их поверхности относительно заданной обусловлены двумя причинами:

— построчной записью структуры, в результате чего линии изображения, имеющие наклон относительно направления лазерного излучения, состоят из отдельных точек;

— эффектом нагрева материала, приводящим к увеличению скорости абляции нагретых участков при многократном проходе луча в пределах небольшой площади.

На рис. 2 приведены фотоизображения поверхности микроструктуры, полученной после абляции, характеризующие зависимость формы канавок от взаимного направления формируемой линии и лазерного излучения: *а* — формируемые линии перпендикулярны лазерному излучению, *б* — параллельны, *в* — расположены под углом  $45^\circ$ .

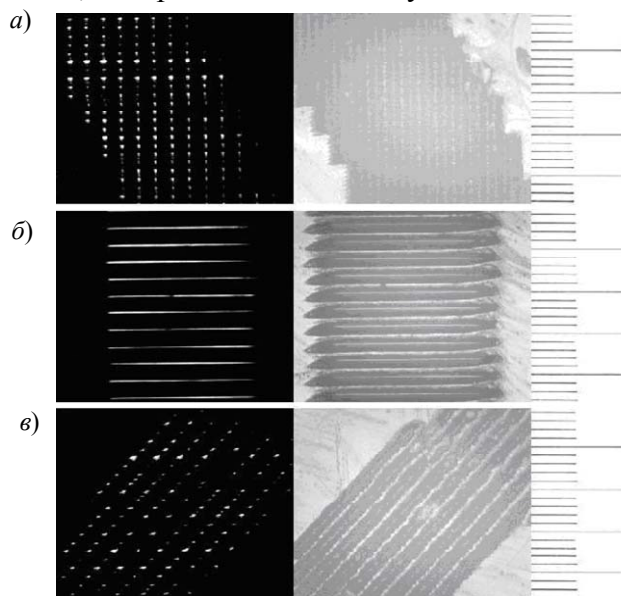


Рис. 2

Минимальная ширина формируемой линии обеспечивается при однократном проходе лазерного луча вдоль нее. При однократном проходе лазерного луча вдоль обрабатываемой линии в термопленке формируются канавки V-образной формы, на дне которых можно получить полосу шириной минимально 1,5 мкм. На рис. 3 представлены такие полосы: *а* — фотоизображение микроструктуры в проходящем свете — узкие полосы (1,5 мкм), *б* — в отраженном свете — V-образные канавки, на дне которых видны сквозные (прорезанные на всю глубину материала) полосы; на рис. 2, *в* показан микрометр. На врезке приведен рисунок сечения V-образной канавки:  $l = 30$  мкм,  $d = 1,5$  мкм,  $h = 8$  мкм (глубина канавки равна толщине обрабатываемого слоя).

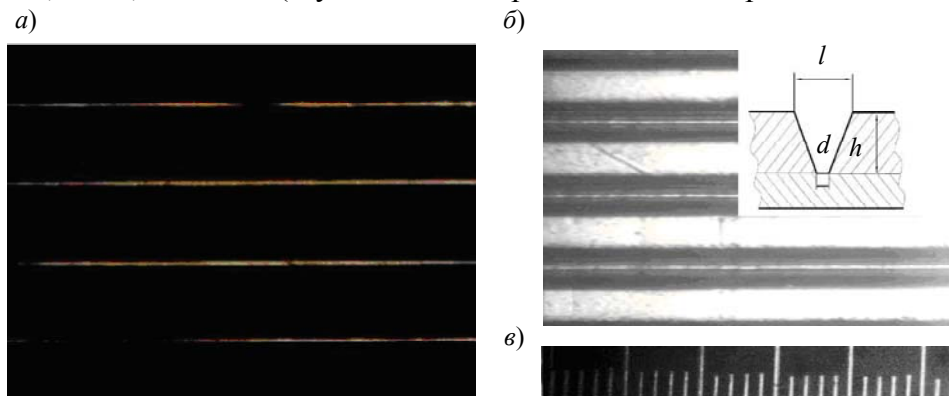


Рис. 3

Здесь необходимо отметить, что форма V-образной канавки определяется апертурой записывающего луча и положением фокуса объектива гравера относительно поверхности

обрабатываемого материала. Поэтому ровная боковая поверхность канавки формируется за счет выбора соответствующего апертурного угла фокусирующего объектива без послойного снятия материала поверхности (как это выполняется в работе [2], где использовался объектив с фиксированной апертурой  $1/2$ ).

Полученные канавки, имеющие ровные оплавленные боковые поверхности, можно использовать как мастер-матрицу для изготовления микропризм и микрозеркал.

При продольном расположении линии относительно направления излучения лазера (см. рис. 2, б) формируется наиболее ровная боковая поверхность канавки, имеющая оптическое качество, что обеспечивает получение микропризм с точной величиной угла блеска.

При ширине структуры, превышающей 1 пкс, т.е. когда лазерный луч проходит со смещением на один шаг (в рассматриваемом случае 2,5 мкм, что соответствует 1 пкс), формируемая канавка существенно расширяется — это можно объяснить, вероятно, тем, что повторный проход лазерного луча вблизи от области абляции вызывает существенное увеличение скорости абляции и канавка скачком увеличивается до 5 мкм.

При расположении формируемой линии перпендикулярно ходу луча (см. рис. 2, а) на пленке прожигаются отдельные точки на расстоянии 2,5 мкм, при этом каждая следующая точка — после полного оборота барабана. Отмеченное выше взаимовлияние близко расположенных канавок здесь не наблюдается, но поскольку формируемая линия состоит из отдельных точек, боковая поверхность микропризмы не столь гладкая, как в первом случае, и наблюдается высокое рассеяние света при отражении.

Посредством выбора мощности излучения лазера удастся обеспечить незначительное оплавление боковых поверхностей и получить оптическую поверхность, что подтверждается наблюдаемым углом блеска микропризм.

Формируемые при абляции канавки с фиксированным углом наклона боковых поверхностей также могут быть использованы для формирования периодических решеток микрооптических элементов.

Например, на рис. 4 представлены два ортогональных фотоизображения защитного элемента (для защиты документов от копирования), записанные на одной и той же поверхности и видимые под различными углами наблюдения (последовательно —  $0$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

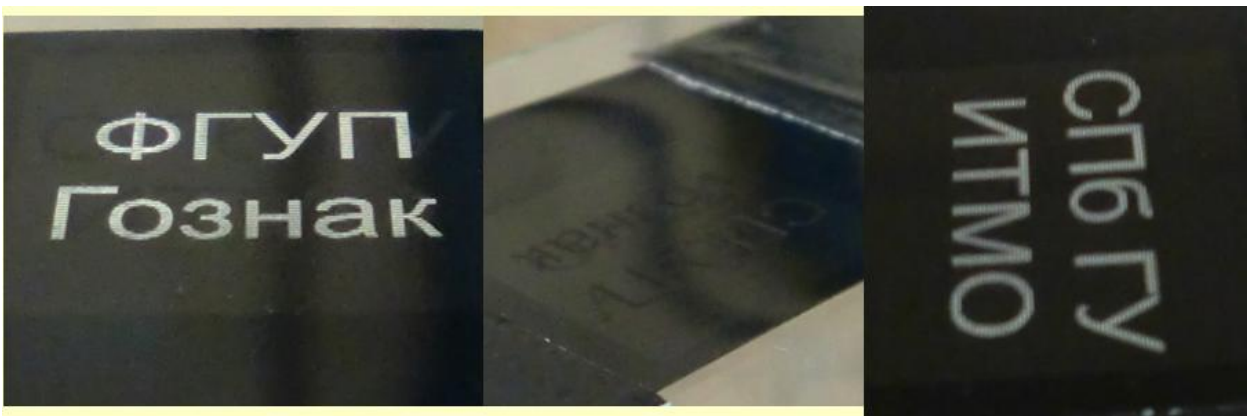


Рис. 4

Опишем принцип действия защитного элемента, представляющего собой решетки микропризм, повернутые под различными углами. Микропризмы, сформированные на поверхности материала методом абляции, объединены в группы. В каждой группе микропризмы имеют один и тот же угол блеска и одинаковое направление, соответствующее повороту на  $0$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ . Следовательно, поворачивая защитный элемент, наблюдатель увидит „вспыхивающие“ надписи при совпадении угла наблюдения с углом блеска микропризм.

На рис. 5 приведено микрофотоизображение рельефа поверхности защитного элемента, состоящего из участков разнонаправленных решеток микропризм (они имеют треугольную форму в сечении). Распределение элементов решетки по поверхности создает видимое с некоторого расстояния изображение, а от относительного размера элементов зависит яркость поверхности, что позволяет записывать, в том числе, и полутоновые изображения. На основе комбинации элементов решетки выполняется надпись, видимая под определенным углом. Поскольку ортогональные решетки размещаются в разных областях поверхности, они не накладываются, что позволяет записывать различные изображения. Фотографии изображений, сделанные под двумя ортогональными углами, показывают отсутствие взаимовлияния наложенных решеток (см. рис. 4).

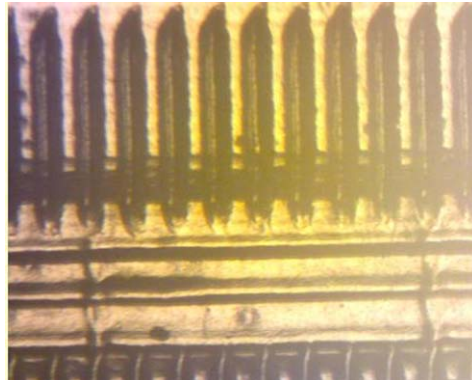


Рис. 5

**Выводы.** Проведенные эксперименты показывают возможность формирования элементов микрооптики с использованием лазерного гравера. Конечно, как и любой метод, лазерный гравер имеет ряд ограничений и особенностей, связанных как со свойствами обрабатываемых материалов, так и с методом записи. Минимальная полученная в ходе экспериментов ширина полосы, формируемой на дне канавки, — 1,5 мкм. Этот размер, так же как и шаг растра — 2,5 мкм (что лучше шага растра в 4 мкм при традиционной фотолитографии), пригоден для выполнения большинства практических задач, включая формирование различных микропризмных и микролинзовых пленочных элементов.

Работа выполнена при поддержке Рособразования, грант РПН 2.1.1.3937.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dajun Yuan, Suman Das.* Experimental and theoretical analysis of direct-write laser micromachining of polymethyl methacrylate by CO<sub>2</sub> laser ablation // *Appl. Physics.* 2007. Vol. 101. P. 024901-1- 024901-6.
2. *Pedder J. E. A., Holmes A. S., Boot H. J.* Pulsed laser ablation of polymers for display applications [Электронный ресурс]: [https://workspace.imperial.ac.uk/opticalandsemidev/public/andrew/C38\\_pulsed.pdf](https://workspace.imperial.ac.uk/opticalandsemidev/public/andrew/C38_pulsed.pdf).
3. Энциклопедия полимеров. Т. 2. Л-Полинозные волокна. М.: Сов. энциклопедия, 1974.

#### Сведения об авторах

- Вера Константиновна Баля** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; мл. науч. сотрудник; E-mail: Vera\_Balya@mail.ru
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
оптики квантоворазмерных систем

Поступила в редакцию  
05.09.11 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 621.373.526

Е. В. ЛАПОВОК, С. И. ХАНКОВ

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ ЕГО ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Приведено аналитическое описание нестационарных температур изотермического объекта выпуклой формы при его нагреве собственным источником тепловыделений в среде с постоянной температурой и обоснована невозможность аналитического описания процесса охлаждения.

*Ключевые слова:* лучистый теплообмен, нагрев, охлаждение, безразмерные параметры, аналитическое описание.

**Введение.** Известно, что процесс лучистого теплообмена является существенно нелинейным и только при установлении стационарного теплового режима может характеризоваться определенным значением коэффициента лучистого теплообмена [1—3]. Для нестационарного теплового режима возможность линеаризации уравнений лучистого теплообмена ограничена зависимостью коэффициента теплообмена от температуры. Актуальность получения аналитического решения с оценкой его погрешности определяется потребностями практики. Особо можно выделить проблемы исследований основных закономерностей формирования тепловых режимов космических объектов [4] и базируемых на космических аппаратах приборов [5, 6]. Для этих объектов теплообмен с внешней средой осуществляется исключительно излучением.

Цель исследований, описываемых в настоящей статье, — получение аналитических формул для расчетов нестационарных температур изотермических объектов и установление границ применимости формул, выявление условий различия или равенства темпов и скоростей нагрева и охлаждения, а также разработка методик оценки общей длительности переходных тепловых режимов объектов, находящихся в условиях теплообмена только излучением.

**Математическая модель лучистого теплообмена.** Рассмотрим объект из материала с высокой теплопроводностью, нагреваемый однородным источником тепловыделений постоянной мощности в окружающей среде с постоянной температурой. Уравнение нестационарного теплообмена объекта при отсутствии иных, кроме лучистых, механизмов теплообмена (конвекции и кондукции) имеет вид

$$c\gamma V \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon\sigma S(T^4 - T_{\text{ср}}^4) = P, \quad (1)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость материала объекта, Дж/кг·К;  $\gamma$  — его плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — объем объекта, м<sup>3</sup>;  $S$  — площадь поверхности объекта, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  — приведенная степень черноты;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>;  $T$  — температура объекта, К;  $T_{\text{ср}}$  — темпе-



ратура окружающей среды, К;  $\tau$  — время процесса нагрева или охлаждения;  $P$  — мощность источников тепла (объемных или поверхностных), Вт.

Приведем уравнение (1) к безразмерному виду, считая, что среда абсолютно черная (как космическое пространство):

$$\frac{d\theta}{dt} + \theta^4 = 1 + \theta_0; \quad (2)$$

$$\theta = \frac{T}{T_{\text{cp}}}; \quad \theta_0 = \frac{P}{qS}; \quad q = \varepsilon\sigma T_{\text{cp}}^4; \quad t = M\tau; \quad M = \frac{q}{c\gamma LT_{\text{cp}}}; \quad L = \frac{V}{S},$$

где  $\theta$  — относительная температура объекта;  $t$  — безразмерное время;  $q$  — имеет размерность удельного поверхностного потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $M$  — имеет размерность темпа, с<sup>-1</sup>, [1];  $L$  — характерный размер объекта, м.

Максимальная температура  $T_m$  объекта, соответствующая стационарному значению при включенных источниках тепла, определяется из уравнения (2) как

$$T_m = \theta_m T_{\text{cp}}, \quad \theta_m = \sqrt[4]{1 + \theta_0}. \quad (3)$$

Представим уравнение (2) в виде

$$\frac{dU}{dt} + \Omega U = \theta_0; \quad (4)$$

$$U = \theta - 1 = \frac{T - T_{\text{cp}}}{T_{\text{cp}}}, \quad \Omega = \frac{\theta^4 - 1}{\theta - 1} = (\theta + 1)(\theta^2 + 1) = (U + 2)(U^2 + 2U + 2).$$

В случае малых перегревов, когда  $T - T_{\text{cp}} \ll T_{\text{cp}}$ , а  $\theta \approx 1$ , величина  $\Omega$  изменяется незначительно. Тогда уравнение (4) может быть решено с малой погрешностью как линейное с постоянным значением  $\Omega = 4$ . В противном случае  $\Omega$  изменяется во времени и аналитическое решение уравнения (4) возможно только в некотором приближении. Необходимо найти приближенные аналитические решения для режимов нагрева и охлаждения и исследовать погрешности этих решений относительно нелинейного уравнения (4). Для получения приближенного решения следует линеаризовать уравнение (4), т.е. принять некоторое постоянное значение  $\Omega$ . Целесообразно принять значение, соответствующее максимальной температуре  $T_m$ :  $\Omega_m = \Omega(\theta_m)$ .

Для режима нагрева уравнение (4) при начальном условии  $U(t = 0) = 0$  или  $\theta(t = 0) = 1$  имеет решение, которое в наиболее удобном для анализа виде может быть представлено через  $\theta$ , а не через  $U$ :

$$\theta = 1 + (\theta_m - 1) [1 - \exp(-\Omega_m t)]. \quad (5)$$

Если по достижении стационарного теплового режима источники тепловыделений будут выключены, то начнется процесс охлаждения, в линейном приближении описываемый уравнением (4), но при  $\theta_0 = 0$  и с начальным условием  $\theta(t = 0) = \theta_m$ .

В этом случае можно получить аналитическое решение, описывающее изменение во времени температуры объекта в процессе его остывания в результате лучистого теплообмена с окружающей средой:

$$\theta = 1 + (\theta_m - 1) \exp(-\Omega_m t). \quad (6)$$

Заметим, что для режима охлаждения величины  $\theta_m$  и  $\Omega_m$  могут трактоваться как соответствующие максимальной температуре  $T_m$ , которая не обязательно отсчитывается от стационарной, а может соответствовать некоторой максимальной температуре процесса охлаждения. Вообще говоря, при охлаждении расчет нестационарной температуры можно проводить, начиная отсчет температуры  $T_m$  от любого момента времени в течение уже идущего процесса охлаждения, но не забывая при этом определять  $\Omega_m$  по выбранному значению  $\theta_m$ .

Для анализа границ применимости аналитических формул (5) и (6) были исследованы величины относительных погрешностей линейного приближения  $\delta = (\theta_c - \theta_a)/\theta_c$ , где  $\theta_c$  — относительные температуры, определенные из численного решения уравнения (2), а  $\theta_a$  — вычисленные по формулам (5) и (6).

На рис. 1 представлены зависимости максимальных значений  $\delta_m$  от  $\theta_m$  в течение всего времени нагрева (кривая 1) и охлаждения (кривая 2). Как видно из рисунка, вплоть до значений  $\theta_m = 1,5$  величина погрешности линейного приближения  $\delta_m$  не превышает 0,03 для режима нагрева и 0,05 для режима охлаждения, а при  $\theta_m < 1,2$  погрешности в обоих случаях меньше 0,01. Однако с увеличением  $\theta_m$  эти погрешности нарастают и особенно резко — для режима охлаждения. Ввиду больших различий погрешностей для двух режимов (примерно в 3 раза) их необходимо рассматривать по отдельности.

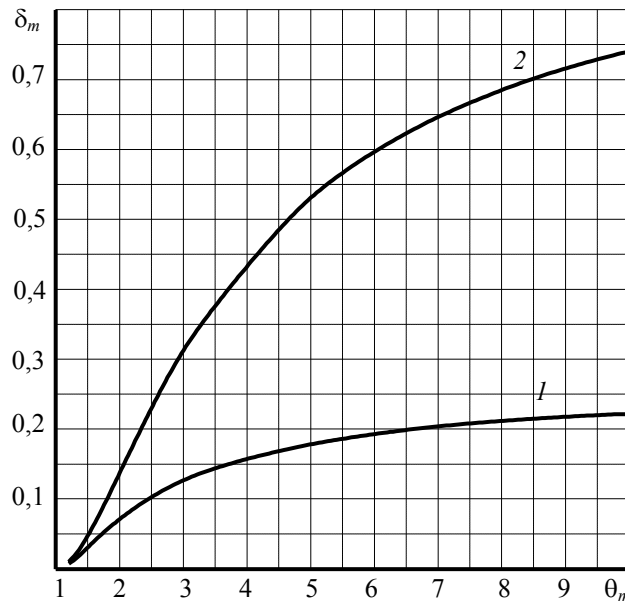


Рис. 1

**Режим нагрева.** Значение  $t_m$  (безразмерный момент времени  $t$ , при котором  $\delta$  достигает максимального значения) можно с погрешностью не более 0,05 в диапазоне  $1,2 < \theta_m < 10$  аппроксимировать формулой

$$t_m = \Omega_m^{-1}, \quad (7)$$

при этом с погрешностью до 0,1 (что незначительно влияет на конечные погрешности после введения поправок) можно записать

$$\delta_m = 0,23 \cdot \lg \theta_m. \quad (8)$$

Нормированная зависимость  $\tilde{\delta} = \delta/\delta_m$  от  $\tilde{t} = t/t_m$  приведена на рис. 2. Разброс значений в такой системе координат для разных  $\theta_m$  ничтожно мал и заметен только в начале и конце графика, где достигает 0,05, но в этих областях мало само значение  $\delta$ . Между линиями заключены все данные для  $1,5 \leq \theta_m \leq 10$ . Средняя линия в пределах погрешности разброса описывается аппроксимационной формулой

$$\tilde{\delta} = 2[E_1(1 - E_1) + E_2(1 - E_2)]; \quad (9)$$

$$E_1 = \exp(-b\tilde{t}); \quad E_2 = \exp(-b\tilde{t}^2); \quad b = 0,69 = -\ln(1/2).$$

Используя формулы (8) и (9) в качестве поправочных коэффициентов, получаем

$$\theta = \theta_a \frac{1}{1 - \delta}, \quad \delta = \tilde{\delta} \delta_m.$$

С учетом поправки погрешность расчета зависимости  $\theta(t)$  не превышает 0,03. Из уравнения (7) следует, что максимальное значение  $\tilde{\delta} = 1$  реализуется в момент безразмерного времени, соответствующий постоянной безразмерной термической инерции. Анализ рис. 2 показывает, что при  $\tilde{t} = 4$  (или при  $t = 4/\Omega_m$ ), когда фактически наступает стационарный тепловой режим, величина  $\tilde{\delta}$  не превышает 0,1. Поскольку при  $\theta_m \leq 10$ , как следует из выражения (8), величина  $\delta_m \leq 0,23$ , то к моменту  $t = 4/\Omega_m$  погрешность меньше 0,023. Таким образом, аналитическая методика позволяет быстро и точно оценить время установления стационарного теплового режима в процессе нагрева объекта.

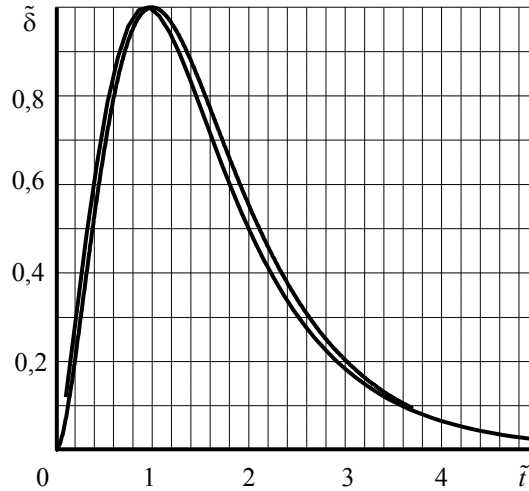


Рис. 2

**Режим охлаждения.** Режим охлаждения, в отличие от режима нагрева, плохо поддается аналитическому описанию. Анализ хода кривой 2 на рис. 1 показывает, что уже при  $\theta_m = 10$  погрешность линейного приближения достигает 0,75. Фактическое время установления стационарного режима при больших значениях  $\theta_m$  может на порядок и более превышать значения, вычисленные по формуле (6). Приемлемые погрешности оценок (до 0,15...0,2) реализуются только при малых значениях  $\theta_m$  (до  $\theta_m < 2...2,5$ ).

В режимах охлаждения, кроме того, плохо поддается обобщению приведенная на рис. 3 картина зависимостей относительных погрешностей аналитических расчетов от логарифма относительной временной координаты; здесь номера кривых соответствуют значениям  $\theta_m$ : 1 — 1,5; 2 — 3; 3 — 6; 4 — 10.

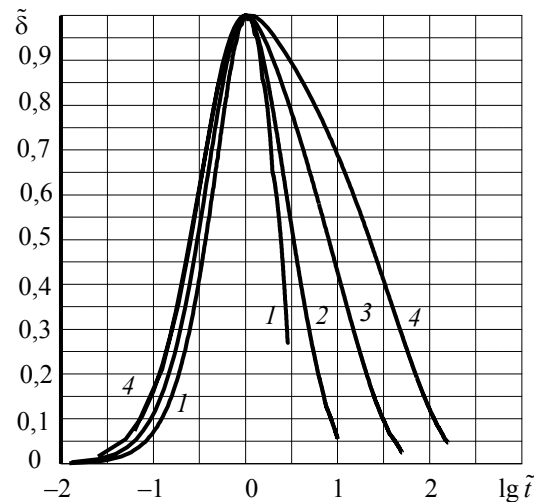


Рис. 3

Это принципиально ограничивает возможность достоверной оценки времени, необходимого для полного охлаждения объекта, без проведения расчетов численным методом.

**Выводы.** Установлено, что при нестационарном лучистом теплообмене наибольшие погрешности аналитического описания реализуются к моменту времени, соответствующему постоянной термической инерции. Выявленные различия в закономерностях процессов нагрева и охлаждения определяются тем, что при нагреве мгновенное значение темпа (в безразмерном виде — величина  $\Omega$ ) непрерывно нарастает во времени, а при охлаждении — убывает.

В режиме нагрева линейное приближение оказывается удачным, а результаты поддаются обобщениям. Введение поправки (9) позволяет достоверно оценивать нестационарные температуры в течение всего времени процесса нагрева. При малых значениях  $\theta_m$  можно смело использовать аналитические формулы без поправки как для режима нагрева, так и для режима охлаждения, при этом темп нагрева равен темпу охлаждения. Установленный критерий малости  $\theta_m \leq 1,5$ . Если этот критерий не выполняется, то для режима охлаждения понятие темпа теряет смысл.

Представляет интерес следующий вывод: если по окончании временного интервала, соответствующего условию  $\lg \tilde{t} < -1$  или  $\tilde{t} < 1$  (когда нормированная погрешность менее 0,15 — см. рис. 3), начинать новый отчет времени и принимать соответствующее ему новое значение  $\theta_m$ , то можно с удовлетворительной для практики погрешностью провести приближенный расчет процесса охлаждения, используя такие последовательные приближения. При этом точность расчета будет возрастать по мере приближения к стационарному тепловому режиму. Последним шагом в расчетах можно считать тот, при котором выполняется условие  $\theta_m \leq 1,5$ . Однако рассматриваемый подход не соответствует поставленной задаче единого аналитического описания, и в данном случае следует решать задачу численно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. Н. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С., Теплопередача. Учеб. для вузов. М.: Энергия, 1975. 488 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 600 с.
4. Каменев А. А., Лаповок Е. В., Скорородько С. Н., Ханков С. И. Методы расчета нестационарного теплового режима изотермических космических объектов // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 42, № 5, С. 802—809.
5. Абдусаматов Х. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа — солнечного лимбографа. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. политехн. ун-та, 2008. 195 с.
6. Абдусаматов Х. И., Богоявленский А. И., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Исследование термостабильности зеркального телескопа — солнечного лимбографа в режиме непрерывного наблюдения за Солнцем // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 5. С. 51—59.

#### Сведения об авторах

- Евгений Владимирович Лаповок** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики  
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
05.07.11 г.

Г. В. БИРЮЛИН, В. И. ЕГОРОВ, С. Ю. МУРОВ, И. В. НЕВСКИЙ

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

Рассматривается конструкция биметаллического (медь—алюминий) паяного радиатора, эффективно охлаждающего элементы электронной аппаратуры с высокой неравномерностью тепловых потоков. Представлена методика оптимизационного расчета конструктивных параметров радиатора.

**Ключевые слова:** *принудительное воздушное охлаждение, радиатор, конечно-элементный метод, оптимизационный расчет.*

Функционирование мощных электронных изделий малых размеров требует использования охлаждающих устройств, минимизация массы которых является важной и актуальной задачей. Для принудительного воздушного охлаждения применяются биметаллические ребристые радиаторы [1], что позволяет в областях с низкой плотностью теплового потока использовать металлы с малым удельным весом.

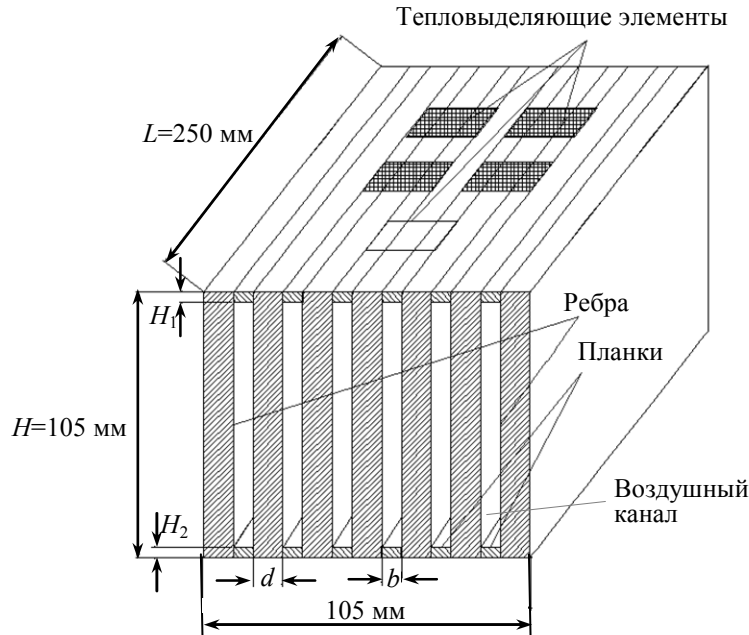
В современных электронных устройствах применяются изделия электронной техники с контактной площадью порядка  $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  и мощностью тепловыделений до 300 Вт. Площадь основания ребристых радиаторов, используемых для обеспечения требуемой температуры корпуса силового элемента, часто значительно превосходит контактную площадь элемента. В этом случае при большом значении коэффициента теплоотдачи ребренной поверхности локальным источником теплоты создается неравномерность температурного поля основания радиатора. В данных условиях проводить расчеты конструкции радиатора, основываясь на известных из литературы [2] значениях тепловых сопротивлений, недопустимо.

Плотности теплового потока в зоне расположения локального источника теплоты и в областях, удаленных от источника, существенно различаются. Поэтому в области, близкой к источнику теплоты, используют высокотеплопроводные материалы. На краях основания радиатора можно применить материал (сплав алюминия), имеющий меньшую плотность и теплопроводность по сравнению с медными сплавами.

Такое техническое решение можно реализовать, используя технологию создания паяных радиаторов, разработанную в БНТ „Прибой“ (Санкт-Петербург) [1]. Такие радиаторы состоят из спаянных между собой ребер и планок. Основание радиатора образуют планки и торцы ребер. Каждое ребро запаено в два параллельных основания. Толщина основания есть толщина планки. Как планки, так и ребра могут быть медными и алюминиевыми в различных сочетаниях, например, по краям — из сплава алюминия, а в центре — из меди.

Рассмотрим вариант оптимизации конструкции системы охлаждения электронного модуля в целях минимизации его веса. Для обеспечения требуемого температурного режима электронных компонентов используется принудительное воздушное охлаждение. Несущими элементами конструкции (см. рисунок) являются пластины, образующие каналы прямоугольного сечения. На входе и выходе каналов (длиной  $L = 0,25 \text{ м}$ ) закреплены вентиляторы. На двух противоположных пластинах (основаниях радиатора) размещены тепловыделяющие элементы. Ширина оснований фиксирована. На основании 1 расположены два транзистора мощностью по 175 Вт, отстоящие на расстояние 10 мм. Удельная мощность тепловыделений каждого из них составляет  $8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . Кроме того, на основании 1 размещены также три транзистора мощностью по 15 Вт. Размеры контактных площадок транзисторов  $24 \times 9 \text{ мм}$ . На основании 2 расположены три преобразователя мощностью по 45 Вт, общее тепловыделение которых составляет 140 Вт. Размеры контактных площадок преобразователей  $60 \times 70 \text{ мм}$ . При

температуре воздуха на входе в каналы  $t_{\text{вх}} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  необходимо обеспечить предельную температуру контактных площадок преобразователя ( $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и транзистора ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



Площадь оснований радиатора значительно превосходит площадь контакта локальных источников теплоты. Самые мощные источники теплоты находятся в центре основания, поэтому при расчетах появляется возможность применения алюминиевых ребер в крайних областях. В рассматриваемой конструкции радиатора толщина всех ребер одинакова, также одинакова и толщина всех планок.

Искомыми параметрами являются: толщины двух оснований, ребер и планок между ними, количество медных ребер и планок, количество алюминиевых ребер и планок.

Как показали предварительные оценки, плотность теплового потока на основании 2 в 50 раз меньше, чем на основании 1. Поэтому на начальном этапе расчетов используем сплав алюминия для всех планок основания 2 и сплав меди — для планок основания 1. Все ребра медные. Учитывая высокую плотность теплового потока, выбираем толщину ребра  $d = 1\text{ мм}$ . Начальная толщина обоих оснований  $8\text{ мм}$ .

Для вычисления коэффициента конвективного теплообмена ребер необходимо определить скорость воздуха в каналах между ними. В установившемся режиме потери давления в каналах радиатора ( $\Delta P_{\text{к}}$ ) компенсированы давлением, создаваемым вентиляторами ( $\Delta P_{\text{в}}$ ). Величина  $\Delta P_{\text{к}}$  соответствует точке пересечения двух кривых: напорной характеристики вентилятора  $\Delta P_{\text{в}}=f_1(G)$  и зависимости перепада давления в каналах от расхода воздуха  $G$  —  $\Delta P_{\text{к}}=f_2(G)$ :

$$\Delta P_{\text{к}} = 0,25\rho V^2 \left( 1 + \frac{48\nu L}{b^2 V} \right),$$

где  $b$  — ширина канала (зазор между ребрами),  $L$  — длина воздушного канала,  $V$  — скорость воздуха в канале,  $\rho$  — плотность воздуха,  $\nu$  — кинематическая вязкость воздуха,  $G=VA$  — расход воздуха во всех каналах,  $A$  — площадь проходного сечения.

При варьировании ширины канала  $b$  зависимость  $\Delta P_{\text{к}}$  изменяется, вследствие чего изменяются и значения  $V$  и  $G$ , результаты расчета которых для трех значений  $b$  при  $d = 1\text{ мм}$  приведены в табл. 1 (где  $n$  — количество ребер).

Таблица 1

$b, \text{ мм}$	$n$	$V, \text{ м/с}$	$G, \text{ м}^3/\text{ч}$
1	48	1,5	23
1,5	38	2,2	42
2	32	2,8	60

Для определения коэффициента теплообмена на поверхности ребра ( $\alpha_p$ ) при  $L > 40b$  используем формулы для „длинного канала“ [3]:

$$\alpha_p = 4,12\lambda_b/b,$$

где  $\lambda_b$  — теплопроводность воздуха.

Тогда тепловая проводимость ребра вычисляется как [4]

$$\sigma_p = L\sqrt{2\alpha_p\lambda_m d} \cdot \text{th} \left( H\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_m d}} \right),$$

а проводимость всех  $n$  ребер — как

$$\sigma_{pn} = nL\text{th} \left( H\sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_p d}} \right) \sqrt{2\alpha_p\lambda_p d},$$

где  $\lambda_m$  — теплопроводность медного ребра;  $H$  — высота ребра;  $\lambda_p$  принимает значения теплопроводности либо меди, либо алюминия.

Тепловая проводимость радиатора определяется выражением

$$\sigma_{\text{рад}} = W(1 - \exp(-\sigma_{pn}/W)),$$

где  $W = Gvc$  — водяной эквивалент, здесь  $c$  — удельная теплоемкость воздуха.

Перегрев оснований радиатора ( $\Delta t_{\text{осн}}$ ) относительно температуры воздуха на входе канала ( $t_{\text{вх}}$ ) определяется соотношением

$$\Delta t_{\text{осн}} = t_{\text{осн}} - t_{\text{вх}} = \Phi / \sigma_{\text{рад}},$$

где  $t_{\text{осн}}$  — температура оснований,  $\Phi$  — мощность теплового потока.

Результаты расчетов величин  $\sigma_p$  и  $\sigma_{pn}$ ,  $\sigma_{\text{рад}}$  и  $\Delta t_{\text{осн}}$  (при  $\Phi = 395$  Вт) приведены в табл. 2—4.

Таблица 2

$b$ , мм	$\sigma_p$ , Вт/К	
	Медь	Алюминий
1,5	1,84	1,43
2	1,56	1,23

Таблица 3

$b$ , мм	$n$	$\sigma_{pn}$ , Вт/К	
		Медь	Алюминий
1,5	38	69,9	54,3
2	32	49,9	39,4

Таблица 4

$b$ , мм	$\sigma_{pn}$ , Вт/К	$\sigma_{\text{рад}}$ , Вт/К	$\Delta t_{\text{осн}}$ , К
Медь			
1,5	69,9	12,4	32,2
2	49,9	16,7	24,0
Алюминий			
1,5	54,3	12,2	32,8
2	39,4	15,8	25,3

Наименьшее значение  $\Delta t_{\text{осн}}$  относительно  $t_{\text{вх}}$  составляет 24 К для радиатора с медными ребрами и шириной канала 2 мм. Такое значение перегрева получено при равномерно распределенной мощности локальных источников теплоты. Учет реального расположения локальных источников теплоты производился с помощью программ расчета трехмерных температурных полей.

Для оптимизации конструктивных параметров радиатора был использован метод конечных элементов. Создана модель радиатора с локальными источниками теплоты на основаниях и возможностью варьирования толщины оснований, количества и физических свойств ребер. Модель состоит из 50 000 конечных элементов. На поверхности ребра задано постоянное значение коэффициента теплообмена  $\alpha_p$ , тогда переменная температура воздуха в каналах рассчитывается по формуле

$$t_b(l, h) = t_{\text{вх}} + \int_0^l \Phi(l, h) dl / (cpG),$$

где  $l$  и  $h$  — координаты соответственно вдоль воздушного потока в канале и перпендикулярно ему.

Предварительный анализ показал, что температурное поле, создаваемое локальными источниками теплоты на двух основаниях, удовлетворяет принципу суперпозиции, поэтому расчеты для двух оснований были проведены отдельно. Сначала была осуществлена оптимизация толщины основания. Затем была выбрана оптимальная ширина канала, после чего исследованы возможности замены меди на алюминиевый сплав в крайних ребрах и планках. По результатам расчетов установлено, что температурное поле на основании 1 неравномерно: в центре основания максимальный перегрев составляет 28 К, а на краях — 10 К. Температурное поле ребра в зоне действия мощного локального источника также неравномерно: у основания 1 перегрев составляет 18 К, а вблизи основания 2 — 5 К. Таким образом, учет расположения локальных источников теплоты с использованием трехмерной модели позволяет более точно найти конструктивные параметры радиатора и определить области, в которых теплопроводность материалов может быть уменьшена.

В результате получены следующие оптимальные параметры конструкции: толщина основания 1 ( $H_1$  — см. рисунок) 10 мм; толщина основания 2 ( $H_2$ ) 5 мм; толщина ребер 1 мм, ширина канала 1,5 мм; количество медных ребер — 26, алюминиевых — 12; количество медных планок — 27, алюминиевых — 51. Температура воздуха в зоне мощных транзисторов не превышает 79 °С, а на входе в канал — 50 °С. При замене в крайних областях до 30 % ребер и планок перегрев на контактных площадках транзисторов увеличился на 2 К, что позволило уменьшить массу радиатора на 25 % по сравнению с радиатором с медными ребрами.

Рассмотренный вариант оптимизации конструкции системы охлаждения на примере паяного биметаллического радиатора позволяет получить значительный выигрыш в массе для схем с интенсивными локальными источниками теплоты, однако для выбора оптимальной конструкции требуется численное моделирование температурных полей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муров Ю. М. Роль базовых несущих конструкций в конкурентоспособности российского приборостроения // Сб. материалов VI отраслевой науч.-техн. конф. „Стратегия развития радиоэлектронного комплекса России“, 12—14 сент. 2007 г. Нижн. Новгород, 2007.
2. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. школа, 1984.
3. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 412 с.
4. Ройзен Л. И., Дулькин И. Н. Тепловой расчет ребренных поверхностей. М.: Энергия, 1977. 256 с.

#### Сведения об авторах

- Гавриил Владимирович Бирюлин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: gavriila@bk.ru
- Владимир Иванович Егоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru
- Святослав Юрьевич Муров** — ОАО Бюро новой техники „Прибой“, Санкт-Петербург; инженер
- Игорь Владимирович Невский** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: nevskigor@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики и  
энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
06.07.11 г.



О. А. КУЗНЕЦОВА

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ  
СТРУКТУРНО ИЗБЫТОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ АВИОНИКИ  
С УЧЕТОМ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ МЕЖДУ ВОССТАНОВЛЕНИЯМИ  
ПРИ ОТКАЗАХ**

Представлена методика оценки надежности при проектировании структурно избыточных комплексов авионики с учетом среднего времени между восстановлениями при их отказах. Приведен сравнительный анализ моделей расчета для резервных устройств со среднестатистическими показателями надежности.

*Ключевые слова:* надежность, резервирование, контролепригодность.

Требования, предъявляемые к надежности комплексов авионики, определяются, как правило, безопасностью их эксплуатации и стоимостью самих систем. Безопасность изделий авионики характеризуется способностью выполнять полетное задание без угрозы для жизни и здоровья людей. Несмотря на то что безопасность не входит в общее понятие надежности, однако при определенных условиях тесно связана с этим понятием. Последствия отказов авионики в полете могут спровоцировать серьезные разрушения и потери сверх предельно допустимых норм, поэтому обеспечение безотказной работы, и как следствие, безопасности полетов является неотъемлемой задачей при проектировании систем авионики.

Известные к настоящему времени исследования по оценке надежности [1—3] носят в основном теоретический характер, что применимо при разработке большой номенклатуры технических систем. Однако изделия авионики отличаются отдельными специфическими параметрами и условиями применения, которые недостаточно отражены в литературе.

Отличительной особенностью систем авионики является невозможность восстановления бортовой аппаратуры сразу же после отказа, так как отказ может иметь место в полете или в периоды между техническими обслуживаниями. Однако обслуживание, осуществляемое в регламентированные периоды, позволяет восстанавливать резерв при отсутствии отказа системы в целом [4]. Таким образом, классическая формула определения среднего времени наработки на отказ в данном случае не может быть применена.

В настоящей статье в качестве основного показателя надежности рассматривается вероятность  $P(t)$  безотказной работы бортовой системы. Полное восстановление системы и ее резерва выполняется в наземных условиях с периодичностью  $t_b$ , при этом восстановление осуществляется независимо от того, наступил ли полный отказ системы или вышло из строя только резервное устройство. Для анализа влияния периодичности восстановления системы, разработанной с применением резервирования, на вероятность ее безотказной работы построены графики (рис. 1), где для возможного сравнения представлена зависимость вероятности безотказной работы системы без профилактического восстановления (кривая 1); кривые 2 и 3 соответствуют вероятностям безотказной работы системы при большей и меньшей длительности между восстановлениями. Кривые 2 и 3 построены на основе предлагаемого ниже подхода.

В общем виде формулу прогнозирования вероятности безотказной работы для  $j$  полетов можно записать в виде рекуррентной функции:

$$P(t) = P_{j-1}(t)P_j(t), \quad (1)$$

где  $P_{j-1}(t)$  — вероятность безотказной работы в процессе предыдущих  $(j-1)$  полетов;  $P_j(t)$  — вероятность безотказной работы в ходе текущего  $j$ -го полета.

В случае когда длительность  $t_n$  всех полетов одинакова, и при условии, что полет выполняется при полностью восстановленном резерве системы ( $t_b = t_n$ ), вероятность  $P_{j-1}(t)$  представляет собой произведение вероятностей для всех  $(j-1)$  полетов, и функция вероятности  $P(t)$  принимает следующий вид:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{j-1} P_i(t_n)P(t) = P^{j-1}(t_n)P(t) \text{ при } j \geq 2. \quad (2)$$

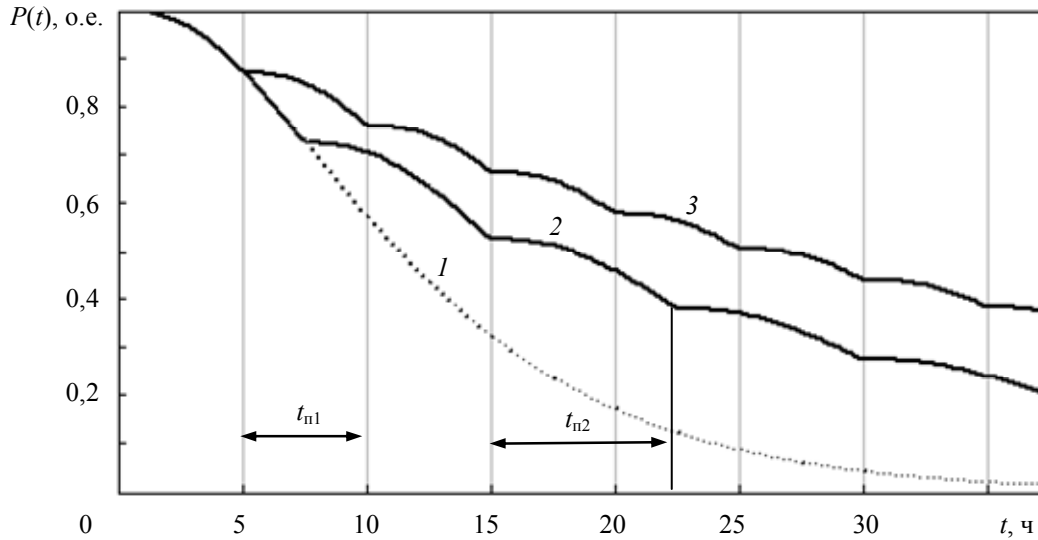


Рис. 1

Среднее время наработки на отказ вычисляется как интеграл от вероятности (площадь под кривой 2 или 3 на рис. 1):

$$T = \sum_{j=1}^{\infty} \int_0^{t_n} P^{j-1}(t_n)P(t) dt = \sum_{j=1}^{\infty} P^{j-1}(t_n) \int_0^{t_n} P(t) dt = \frac{\int_0^{t_n} P(t) dt}{1 - P(t_n)}. \quad (3)$$

Знаменатель в правой части формулы (3) характеризует вероятность  $Q(t_n)$  отказа системы за время полета. При оценке вероятности  $Q(t_n)$  должно учитываться возможное резервирование.

Часто используемое на практике структурное резервирование, как способ повышения безотказной работы комплексов авионики, требует точной оценки эффективности резервирования. Это связано не только с вопросами надежности, но и с экономическим аспектом разработок и эксплуатации.

В работе [5] представлена методика уточненной оценки безотказной работы систем резервирования и предложена математическая модель, отражающая возможности и надежность средств обнаружения отказов и переключающих устройств.

Рассмотрим в качестве примера расчет среднего времени наработки на отказ резервируемой группы устройств авионики, которая включает одно резервируемое и одно резервное устройства. Среднее время наработки на отказ входящих устройств  $T=3000$  ч. Показатель контролепригодности — полнота контроля — принят равным  $\omega=0,9$ .

Для сравнительного анализа к рассмотрению приняты три варианта восстановления резервируемой группы:

- а) с вероятностью восстановления после каждого полета —  $R_b$  (рис. 2, кривая а);
- б) с полным восстановлением после каждого полета при  $t_n=10$  ч (кривая б);
- в) без регламентированного восстановления (кривая в).

Для случая с неединичной вероятностью восстановления, в том числе вследствие нереализованного полного наземного контроля состава системы в целом, вероятность безотказной работы в ходе  $j$ -го полета определяется двумя слагаемыми: первое слагаемое определяет вероятность безотказной работы при условии, что в течение предыдущих полетов отказов не было, а если и были, то только в резервной части, и перед следующим полетом выполнялось полное восстановление с вероятностью  $R_B$ ; второе слагаемое определяется событиями, при которых после отказа резервного устройства полное восстановление не было выполнено ввиду различных возможных причин (например, отсутствия запасных устройств, недостатка времени и/или недостаточной глубины поиска мест отказов), и в результате последующий полет осуществлялся в отсутствие резерва:

$$P_j(t) = \left[ \prod_i^n P_i(t_{\Pi})^{j-1} + R_B B \left( \sum_k^m O_k \right) \right]^{j-1} P_p(t) + \left[ (1 - R_B) B \left( \sum_k^m O_k \right) \right]^{j-1} P_{\text{нр}}(t),$$

где  $\prod_i^n P_i(t_{\Pi})$  — вероятность безотказной работы системы, состоящей из  $n$  устройств;  $O_k$  — событие отказа резервного (резервных) элемента в  $k$ -й резервируемой группе;  $m$  — количество резервируемых групп;  $B \left( \sum_k^m O_k \right)$  — вероятность события, при котором за время полета произошел отказ в резервируемых группах при условии, что отказ системы в целом не произошел;  $P_p(t)$ ,  $P_{\text{нр}}(t)$  — вероятности безотказной работы системы с полным резервом и в отсутствие резерва соответственно.

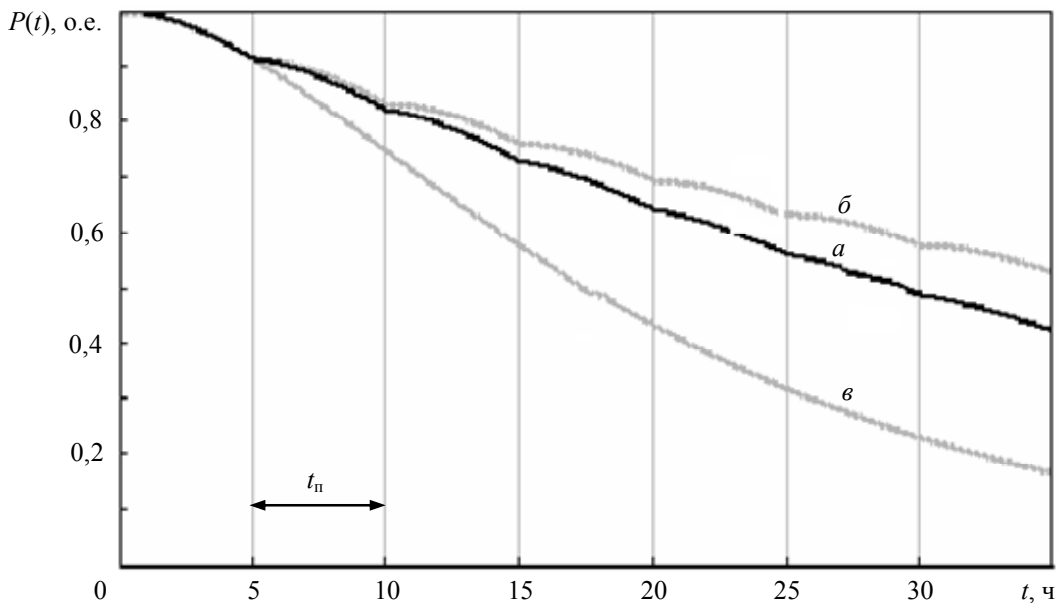


Рис. 2

Для рассматриваемого варианта „а“ вероятность безотказной работы системы определяется выражением

$$P(t) = \left( P_a^2 + 2P_a Q_a \omega R_B \right)^{j-1} P_p(t) + \begin{cases} 0 & \text{при } j = 1; \\ 2P_a Q_a \omega (1 - R_B) P_{\text{нр}}(t) & \text{при } j = 2; \\ 2P_a Q_a \omega (1 - R_B) \sum_{i=0}^k P_a^i \left( P_a^2 + 2P_a Q_a \omega R_B \right)^{k-1} P_{\text{нр}}(t), & j > 2, \end{cases} =$$

$$= W^{j-1} P_p(t) + \begin{cases} 0 & \text{при } j = 1; \\ P_a(t)V & \text{при } j = 2; \\ P_a(t)V \sum_{i=0}^k P_a^i W^{k-1}, & k = j-2 \text{ при } j > 2, \end{cases}$$

где

$$k=j-1, W = P_a^2 + 2P_a Q_a \omega R_B, V = 2P_a Q_a \omega (1 - R_B), P_p(t) = P_a^2(t) + 2P_a(t) Q_a(t) \omega;$$

$P_a = P_a(t_n)$  — вероятность безотказной работы для варианта „а“;  $Q_a = Q_a(t_n)$  — вероятность отказа системы для варианта „а“.

Среднее время наработки на отказ вычисляется как интеграл от вероятности безотказной работы:

$$T = \frac{\int_0^{t_n} [P_a^2(t) + 2P_a(t)Q_a(t)\omega] dt}{1-W} + \frac{V \int_0^{t_n} P_a(t) dt}{(1-P_a)(1-W)}.$$

При вероятности восстановления  $R_B = 1$  график зависимости вероятности безотказной работы для варианта „а“ совпадает с графиком „б“; при отсутствии восстановления ( $R_B = 0$ ) график для варианта „а“ совпадает с графиком для варианта „в“ (рис. 3).

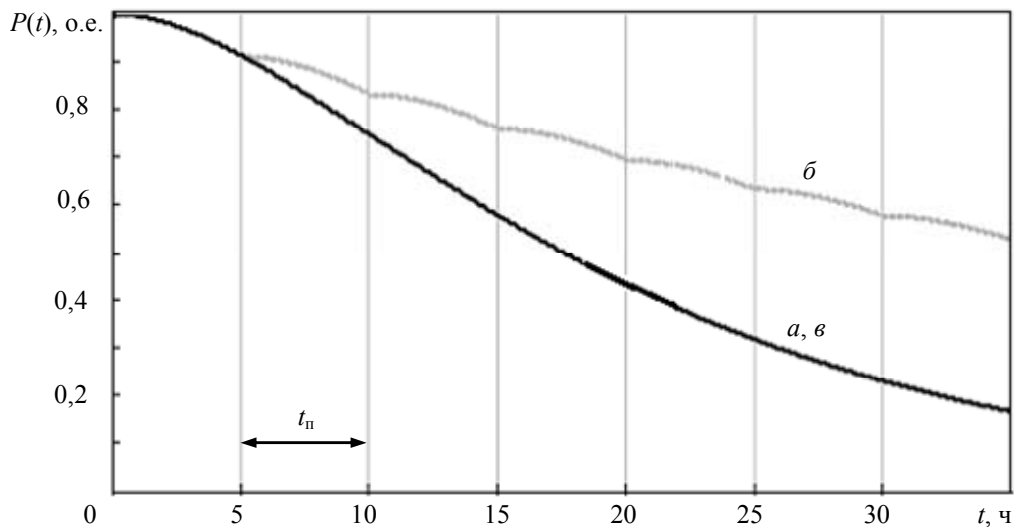


Рис. 3

По результатам расчета для рассматриваемых вариантов получены следующие значения наработок на отказ:

а)  $T_a = 8\,075$  ч (при вероятности восстановления  $R_B = 0,85$ );

б)  $T_b = 29\,213$  ч;

в)  $T_v = 4\,421$  ч.

Результаты проведенного анализа вариантов технического обслуживания позволяют сделать следующие выводы:

— техническое обслуживание резервируемой системы с полным ее восстановлением после каждого полета существенно повышает значение среднего времени наработки на отказ;

— применение классических формул для расчета вероятности безотказной работы резервируемых систем авионики с неполным восстановлением перед полетом ведет к завышению результатов (в рассмотренном примере более чем в 3 раза);

— понижая уровень резервирования (для повышения среднего времени наработки на отказ и повреждение), следует остановиться на уровне, выбор которого позволит в пределах

времени обслуживания обнаружить отказавшее входящее устройство с наибольшей вероятностью; целесообразно резервирование в комплексах авионики осуществлять с использованием легкоъемных блоков, нахождение отказов которых хорошо обеспечивается встроенными средствами контроля, что, в свою очередь, снижает время восстановления систем авионики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов В. Ю., Никитин В. Г., Иванов Ю. П. Надежность авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов: Учеб. пособие. СПб: СПбГУАП, 2004.
2. Половко А. М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964.
3. Козлов Б. А., Ушаков И. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975.
4. Кузнецова О. А., Гатчин Ю. А., Лобов В. В. Информационное сопровождение эксплуатации по техническому состоянию изделий авионики // Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Йошкар-Ола: Марийский гос. техн. ун-т, 2009. Ч. 2. С. 143—147.
5. Кузнецова О. А., Гатчин Ю. А., Лобов В. В. Оценка надежности структурно избыточных изделий при проектировании сложных технических систем // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. Вып. 1. С. 44—52.

#### *Сведения об авторе*

**Ольга Александровна Кузнецова** — ФГУП „ОКБ Электроавтоматика“, Санкт-Петербург; начальник отдела надежности; E-mail: kuzola@ya.ru

Рекомендована кафедрой  
проектирования компьютерных  
систем СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
08.02.10 г.

---

---

# ИСТОРИЯ ОПТИКИ

---

---

УДК 535.317:535.8

М. Г. Томилин

## ГЛАЗ И ЛИНЗА ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ТЫСЯЧЕЛЕТИЙ

Приведена краткая история развития оптических линз от простейшей, изготовленной из кварца и помещенной в глазнице скульптур властителей и сакральных животных в период архаических цивилизаций, до современной адаптивной линзы на жидком кристалле, имплантируемой в глаз человека при лечении катаракты. Изложены основные этапы развития линз на стадиях археологической оптики, создания читальных камней и изобретения очков.

**Ключевые слова:** археологическая оптика, линзы Шлимана, смарагд Нерона, линзы Висби, читальные камни, изобретение очков, адаптивные линзы на ЖК.

Утверждение, что развитие науки происходит по спирали, стало широко распространенным штампом. Однако ярких иллюстраций этому утверждению немного. В настоящей статье приводится иллюстрация подобной эволюции в оптике на примере развития оптической линзы, причем шаг такой спирали во времени составляет около пяти тысячелетий.

Первые свидетельства о древнейших линзах относятся к раскопкам памятников культуры архаичных цивилизаций Древнего Египта, Вавилона и Крита, относящихся к 3-му тысячелетию до н. э. Изготовленные из кристаллического кварца, а позже из стекла, оптические элементы в виде чечевицы\* помещались в глазницы скульптур фараонов, идолов и священных животных для придания им живого взгляда [1, 2]. На рис. 1 приведены скульптурные изображения жены фараона и сакрального быка с размещенными в глазнице фибулами, содержащими чечевицы (из собрания Каирского музея и Археологического музея Ираклиона).



Рис. 1

Среди археологических находок особое место занимают линзы — 50 кварцевых лентоидов (плосковыпуклых линз), отнесенных к 2200 г. до н. э., обнаруженные Г. Шлиманом

---

\* Латинское название чечевицы дало происхождение слову „lens“ (линза).

при раскопках легендарной Трои [3]. Хотя в начале своей истории линзы использовались в сакрально-декоративных целях, изготавливавшие их искусные мастера-камнерезы не могли не заметить удивительных оптических свойств таких линз. И на длительном пути развития искусства резьбы по камню их сакральные и оптические (увеличительные) функции оказались объединены. Подтверждением этому служат инталии античного периода — геммы с углубленным изображением, выполненным на плоской поверхности и со стороны сферической поверхности наблюдаемым с увеличением. На плоской стороне одной из инталий середины I в. н. э. (рис. 2, б) из собрания Государственного Эрмитажа, Санкт-Петербург [1], изображено мужское лицо — возможно, копия скульптуры Нерона в Риме. Со сферической стороны оно наблюдается с увеличением в 1,5 раза. Форма и размеры этой инталии сходны с кристаллическими лентоидами из коллекции Шлимана (рис. 2, а). Лентоиды напоминают заготовки для гемм. Если следовать этому предположению, то можно объяснить назначение и других линзоподобных находок Шлимана, которое долгое время оставалось неясным [1].

Первые линзы появились, возможно, в процессе эволюции украшений и амулетов и стремления древних мастеров увеличить их магическую силу оптическими средствами — увеличением изображения сакральных знаков и символов. Изготовление линз как чисто оптических элементов, по-видимому, началось позже, и было продиктовано уже иными потребностями.



Рис. 2

Перечень найденных археологами линз достаточно велик. Много плосковыпуклых линз обнаружено при раскопках Кносского дворца на Крите: в Археологическом музее Ираклиона экспонируются 23 линзы. В развалинах дворца Саргона II в ассирийской Ниневии обнаружена овальная линза с ободком IX—VII вв. до н. э., которую посчитали моноклем особы знатного рода (рис. 3, а) [4]. Многие из обнаруженных линз обладают высоким оптическим качеством. Примером служит относимая к 600 г. до н. э. плосковыпуклая линза из горного хрусталя диаметром 8 мм, найденная в Идеонской пещере на Крите в месте легендарного рождения Зевса (рис. 3, б).

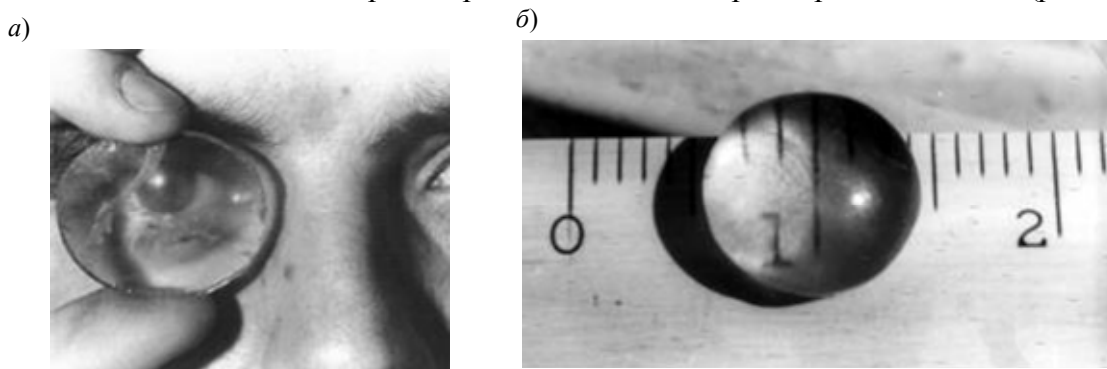


Рис. 3

Линзы из стекла появились значительно позже и дошли до нас в таком состоянии, что потеряли прозрачность и с трудом идентифицировались. Одна из первых находок была сделана в доме гравера в Помпеях, другая — в Лондоне. Особо отметим найденные в Эфесе, в

Малой Азии, плосковогнутые линзы, уменьшающие изображение без видимой дисторсии [2]. Комбинация плосковыпуклой и плосковогнутой линз могла быть известна древним мастерам. Но тогда это — телескоп! Если со временем удастся подтвердить эту гипотезу, то она перенесет дату изобретения телескопа на полтора тысячелетия назад.

Когда число обнаруженных археологами линз, относящихся к периоду от 2600 г. до н. э. до 500 г. н. э., превысило 300 образцов, стало ясно, что это не случайные единичные находки, а регулярные артефакты в регионах, где происходило развитие первых цивилизаций. Эти экспонаты получили название археологическая оптика [5]. „Линзы в науке играют такую же роль, как колесо в технике“, — считал известный профессор физики Лондонского университета С. Толанский [6].

Свойства линз концентрировать солнечные лучи издавна привлекали внимание древних. Вместо трудоемкой процедуры добывания огня трением или высеканием искры с помощью кремния был открыт гениальный по простоте способ зажигания огня с помощью линзы из горного хрусталя. Этот способ упоминается в мифе о титане Прометее, похитившем для людей огонь с Олимпа вопреки воли Зевса. Жрецы использовали „зажигательные стекла“ для лечебных прижиганий, например в святилище бога врачевания Асклепия в Эпидавре.

С развитием института собственности амулеты стали использовать как личные печати. Они несли знак владельца не только на документах, но и на ларцах, амфорах с вином и маслом, кладовых с ценностями и даже на дверях женской половины дома. Во избежание подделок печати изготавливались с мельчайшим рисунком. Минимальные детали изображений имели величину 0,033 мм, что вряд ли можно было осуществить без увеличительного стекла [7]. С другой стороны, Страбон, по свидетельству Цицерона, сумел поместить „Илиаду“ Гомера на пергаменте, помещавшемся в скорлупе ореха, а Калликрат вырезал из слоновой кости муравьев и другие столь мелкие существа, что никто не в состоянии был различить отдельные их части [8]. Однако, по мнению экспертов, все геммы в богатейшем собрании Британского музея могли быть изготовлены без помощи линзы.

Среди находок древних линз упоминаются таинственные сферы друидов, относящиеся ко 2-му тысячелетию до н. э. и вызывающие восхищение своим геометрическим совершенством. Эти магические шары из кварца, окутанные мистическими легендами, широко представлены в археологических собраниях, упоминаются во многих древних литературных источниках [9] и даже нашли свое отражение в живописи, примером чему может служить приведенный на рис. 4 фрагмент картины Э. Пойнтера „Предсказательница“, 1877 г. (Королевская Академия художеств, Лондон, Великобритания).



Рис. 4

Во времена Аристотеля предметом размышления не только врачей-офтальмологов, но также философов и оптиков были дефекты зрения. Упомянутый Плинием факт, что „импера-



тор Нерон смотрел на бои гладиаторов сквозь изумруд“, до сих пор вызывает горячие споры среди специалистов об оптическом назначении упомянутого смарагда. Так, развивающаяся с возрастом дальнозоркость нашла отражение даже в античной фреске (рис. 5; Помпеи, Италия, I в. до н. э.). На ней изображен монах, читающий свиток, который он держит на вытянутых руках, чтобы разобрать текст („не глаза слабы, а руки коротки“).



Рис. 5

До сих пор загадкой археологической оптики остается форма кристаллических линз, обнаруженных на месте поселения древних викингов XI в. в Готланде, Швеция [2]. Часть линз имела идеальный асферический профиль и современное оптическое качество. Самые крупные из десяти найденных линз, получивших по месту обнаружения название „линз Висби“, имели диаметр 50, 43, 37 и 27 мм. На рис. 6 приведено изображение асферической линзы викингов и ее габариты, XI в. (Национальный музей Стокгольма, Швеция). Представления философов и ученых о природе света и цвета, теории зрения, а также достижения в геометрической оптике, катоптрике и диоптрике были недостаточны для расчета и изготовления таких линз.

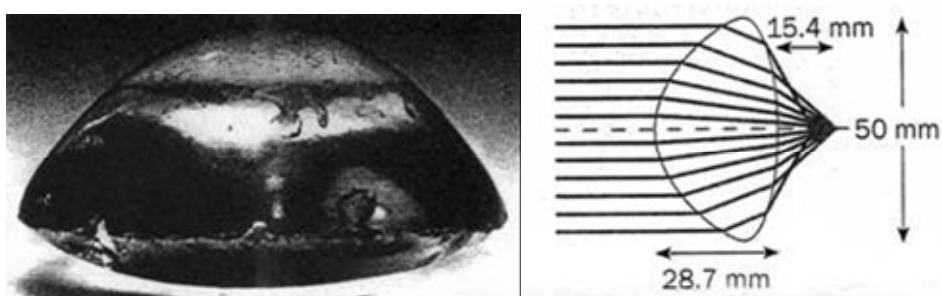


Рис. 6

Достигнутая компенсация сферических aberrаций и технология обработки линз требует более глубоких оптических знаний, чем те, которыми обладали в то время наши предки. Происхождение линз также неизвестно, хотя предполагается, что они были привезены с Востока как военные трофеи.

Средние века, долгое время имевшие несправедливо уничижительный эпитет „темные века“, оказались периодом высоких достижений в прикладной оптике, увенчанным изобретением в Европе очков. Этому выдающемуся изобретению предшествовали работы таких

блестящих ученых, как Альхазен, Роберт Гроссетест, Роджер Бэкон. На рис. 7 приведена схема, иллюстрирующая теорию Гроссетеста о фокусировке солнечных лучей сферической линзой, наполненной водой [10].

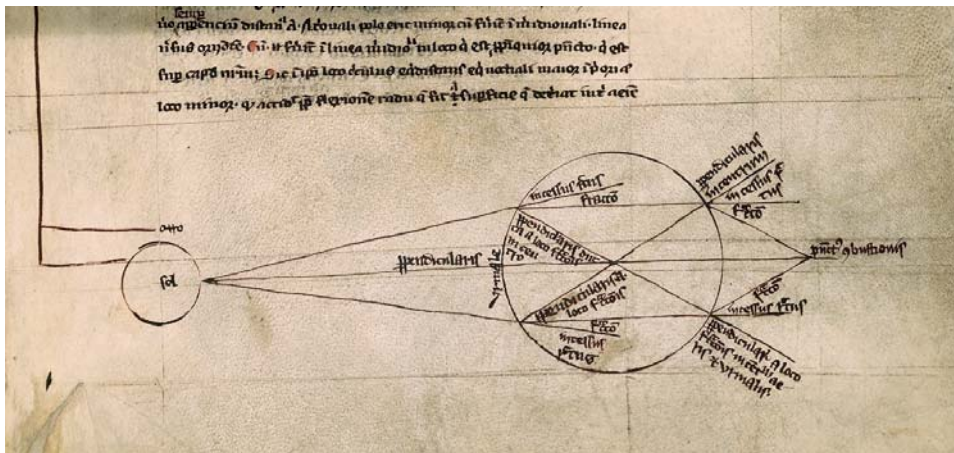


Рис. 7

Изобретению очков предшествовало и появление примерно в 1000 г. читальных камней. Они представляли собой сегменты стеклянной сферы, которые размещались на текстовом материале для увеличения изображения букв (рис. 8).



Рис. 8

Если распилить круглый прозрачный шар, изготовленный из кварца, берилла или стекла, пополам, то получатся два читальных камня: фактически это две плосковыпуклые увеличительные линзы. Они получили название очки “Brille”, поскольку по-немецки так назывались две отшлифованные линзы, изготовленные из берилла (Berill).

Методом проб и ошибок монахи установили, что чем больше радиус читальных камней, тем меньшее увеличение они дают. Плоская часть камня не обязательно должна быть серединой сферы. Читальные камни обладали положительной оптической силой: они сдвигали фокальную точку из положения за сетчаткой глаза на собственно сетчатку. Это позволяло монахам, страдающим старческой дальнозоркостью, читать, и, возможно, читальные камни были первым приспособлением для помощи слабовидящим. Читальные камни применяются сегодня в виде увеличительной лупы. Нельзя не поразиться тому удивительному пути к изобретению очков, по которому шел творческий гений человечества на протяжении нескольких тысячелетий.

История изобретения очков содержит много неясных и противоречивых свидетельств. Очки для корректировки дефектов зрения впервые появились, по-видимому, в Италии, во Флоренции или Венеции около 1280 г. Об исправлении старческого ослабления зрения с помощью стекол писал римский папа Иоанн XXI, известный под именем Петра Испанского. В 1289 г. некто из семьи Попозо в своем трактате оставил такую запись: „Я имею столь слабое зрение, объясняемое старостью, что без помощи стекол, называемых очками, не в

состоянии ни читать, ни писать. Они были изобретены недавно к счастью для пожилых людей, чье зрение стало слабым“. Многие историки считают, что первые очки были изготовлены монахами или ювелирами в период 1285—1289 гг. в Пизе или Венеции. Итальянские мастера при шлифовке стекол для контроля качества работы нередко подносили изделия своего труда близко к глазам, что, возможно, и привело к открытию увеличительного действия стекол особого профиля. *„Между тем, дело шло не о мелочи, а самом замечательном результате оптики за многие века ее существования не только в практическом смысле, но и в отношении теоретических перспектив. Если бы стал известен истинный изобретатель очков, имя его, несомненно, заняло бы одно из самых почетных мест в истории науки о свете“* (С. И. Вавилов) [11].

Сохранившиеся сведения об изобретении очков не позволяют однозначно назвать имя изобретателя. Их изобретение связано с началом варки хрустального стекла на острове Мурано близ Венеции. Венецианские стеклодувы, умевшие изготавливать стекла для читальных камней, позже создали линзы, которые в оправе помещались перед глазами наблюдателя вместо размещения на тексте. Там же началось и производство очков, имевших поначалу форму перевернутой буквы „V“ или моногля (рис. 9).

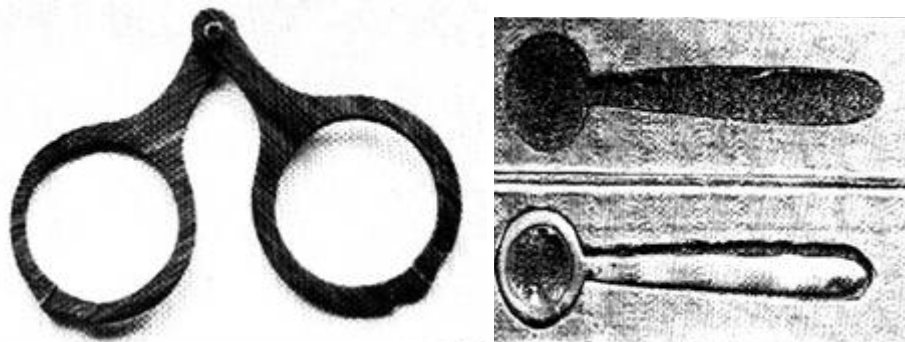


Рис. 9

Оптики Венеции признавали божественным изобретателем очков Св. Иеронима, жившего с 340 по 420 гг. На живописных картинах он изображен со львом, черепом и очками. В одной из хроник г. Пизы утверждается, что очки изобрел *„некто, не пожелавший открыть своей тайны“*. Леопольд дель Миллиоре, издавший в 1648 г. историю Флоренции, и историк Иоанн Винцент Фантони предполагают, что этот некто есть Сальвино Армати. На одном из надгробий церкви Санта-Мария Маджоре во Флоренции указано, что под ним покоится прах изобретателя очков Сальвино Армати, умершего в 1317 г. В академическом словаре Де-ла-Круска указывается, что изобретение было сделано в 1285 г. Эти данные как в отношении самого изобретателя, так и времени изобретения сходятся со сведениями, сообщаемыми другими хроникерами. Так, Франческо Реди, на основании хроник из библиотеки доминиканского монастыря Св. Екатерины в Пизе, сообщает о старце Алессандро делла Спине, умершем в 1313 г., который видел первые очки и слышал об их изобретении. Алессандро и сам начал изготавливать очки и *„с охотой передал их людям“*, тогда как изобретатель пожелал сохранить их в тайне. В другом сочинении 1299 г. упоминается об очках как об изобретении тогдашнего времени. Монах Джордано да Ривалто из того же монастыря Св. Екатерины, умерший в 1311 г., в записях от 23 февраля 1305 г. отмечает, что *„не прошло еще и двадцати лет со времени возникновения искусства изготовления очков, одного из самых полезных искусств на земле. Мне довелось встречаться и беседовать с человеком, который сделал это первым“*.

Итальянский ученый Карло Дати (1619—1676) сообщил много лет спустя, что он обнаружил отдельную запись в латинской хронике 1313 г. в монастыре в Пизе: *„в этом монастыре жил и умер монах нищенствующего ордена Алессандро делла Спина, обладавший замечательным характером и острым умом. И когда некто изготовил очки и отказался передать*

свое изобретение другим, то Алессандро сам изготовил их и поделился своим знанием с другими“. Возможно, что распространению очков мы обязаны именно этому монаху. Хотя доминиканский монах Алессандро делла Спина известен как человек, который повторно изобрел очки, имя действительного изобретателя очков так и осталось неизвестным. Не исключено, что этого изобретателя и вовсе не существовало. Просто увеличительное свойство плосковыпуклых стекол было случайно обнаружено стеклодельными мастерами. Что касается свидетельств историка из Флоренции Доменико Мани, то его упоминание о местном антикваре, который видел надгробный камень со словами: „Здесь покоится Сальвино д'Арматто Арматти из Флоренции, изобретатель очков. Да простит Бог его прегрешения. 1317 г.“, невозможно проверить, поскольку эта церковь была существенно перестроена в процессе реставрации. Д. Мани полагает, что Сальвино Арматти и был тем неизвестным изобретателем, с которым довелось общаться Алессандро делла Спине. Это мнение, однако, остается не бесспорным.

Суммируя все косвенные данные, можно прийти к выводу, что первые очки вошли в употребление в Италии в конце XIII в., причем это были выпуклые стекла для дальнозорких (occhiali). Отрицательные (вогнутые) стекла для коррекции близорукости появились не ранее XVI в. Последние исследования не изменили кардинально всего исторического контекста. В любом случае раньше 1286 г. очки появиться не могли. Самое раннее свидетельство содержится в записи проповеди отца Джордано Пизанского во Флоренции в 1306 г. Очевидно, что проповедник лично знал изобретателя. Первое установление о производстве очков было издано в 1300 г. в Венеции как руководство для работников с хрусталем и стеклом.

Трудности в установлении авторства этого изобретения имеют простое объяснение. Несмотря на существование большого количества теоретических трудов по оптике прикладная оптика развивалась слабо. Это было вызвано отсутствием связи между оптической наукой и практикой. „Действительно бесспорным достижением XIII в., — писал С. И. Вавилов, — явилось изобретение очков в Италии и постепенное распространение их. ... Обилие документальных данных показывает, что изобретение привлекло и обратило на себя внимание, хотя нет прямых сведений о первом изобретателе очков. Замечательно и вместе с тем печально, что ученые-оптики XIII в., много писавшие о преломляющих средах, по-видимому, не причастны к изобретению очков“ [11]. Более того, ученые-оптики, имевшие к тому времени большой объем накопленных знаний по отражающим и преломляющим средам, не только не участвовали в изобретении очков, но даже считали это изобретение вредным. Вот как они объясняли свою позицию: „Основная цель зрения — знать правду, линзы для очков дают возможность видеть предметы большими или меньшими, чем они есть в действительности. Через линзы можно увидеть предметы ближе или дальше, иной раз, кроме того, перевернутыми, деформированными и ошибочными. Следовательно, они даже не дают возможности видеть действительность. Поэтому, если вы не хотите быть введенными в заблуждение, не пользуйтесь линзами. Недавно изобретенные очки безнравственны (аморальны), — писал М. Гросс, викарий из графства Сомерсетшир, Великобритания, в XIII в., — поскольку они искажают естественное восприятие и являют предметы в ненатуральном и фальшивом свете“. „Высоколобые“ в оптическом обмане не участвуют [12]. Эта позиция объяснялась незнанием механизма и природы зрения.

Первые очки с дужками изготовили испанские мастера. Они прикрепили один конец шелковой ленты к оправе, а другой — в форме петли — надевали на уши. Испанские и итальянские миссионеры принесли с собой новую конструкцию очков в Китай. Китайские умельцы прикрепили к лентам металлические дужки, вместо того чтобы использовать петли. Потребность в очках резко возросла после изобретения книгопечатания. В России очки появились в конце XV в. Наиболее древний известный нам документ, упоминающий об очках на Руси, датирован 1636 г. Изобретение очков сыграло огромную роль в последующем изобретении телескопа и микроскопа, а также в общем распространении грамотности.

Поначалу продажей очков занимались торговцы. Сохранились гравюры (рис. 10, *а*) с изображением странствующих продавцов с большими ящиками, полными очков. Вокруг них толпились покупатели, тут же на базаре примерявшие очки. В Средневековье очки являлись символами учености и праведности. Людей, которым были присущи эти качества, художники изображали в очках, даже если они жили задолго до их изобретения. Очки придавали тем, кто их носил, респектабельность, а иногда и мистические оттенки. Самое раннее из известных живописных изображений очков встречается в работах итальянского мастера Томмазо да Модена (1325—1379), ученика Джотто. По заказу брата Фаллионе в 1352 г. он исполнил серию фресок с изображением членов ордена доминиканского монастыря Сан-Николо в Тревизо. На одной из фресок изображен кардинал Николас фон Роуэн, усердно читающий рукопись, держа увеличительное стекло в оправе перед собой (рис. 10, *б*). Как один из символов Средневековья можно рассматривать очки, закрепленные на рыцарском шлеме. Такой шлем, являющийся ныне примечательным экспонатом музея Тауэр в Лондоне, был подарен английскому королю Генриху VIII французским королем (рис. 10, *в*).



Рис. 10

Врачи долго относились к очкам отрицательно. Так, например, саксонский окулист Г. Бартиш, автор одного из первых руководств по глазным болезням, изданного в 1583 г., считал очки вредными для глаз. Лишь значительно позже благодаря работам Кеплера, Гельмгольца, Юнга и других ученых была выяснена сущность оптических дефектов глаз, подбор очков обрел научную основу, и им начали заниматься врачи. В 1784 г. Бенджамин Франклин изобрел бифокальные линзы. В 1827 г. Георг Айри использовал цилиндрические линзы для коррекции астигматизма.

Относительно контактных линз существует предположение, что они изображены на рисунках Леонардо да Винчи, датируемых 1508 г. В 1636 г. контактные линзы были предложены Рене Декартом. Первые нашедшие применение контактные линзы считаются изобретением физиолога Адольфа Флика (1887 г.), а их полимерная модификация была изготовлена Кевином Туохи в 1948 г. Эластичные контактные линзы получили распространение только в 1970-е гг.

В XXI в. наметился революционный прорыв в офтальмологии. Физиками-оптиками было предложено использовать адаптивную контактную линзу на основе жидких кристаллов (ЖК), имплантированную непосредственно в глаз. Это в перспективе позволяет компенсировать аберрации непосредственно в глазу и заменить искусственный хрусталик элементом с переменным фокусным расстоянием [13]. На рис. 11, *а*, *б* приведены макет (поперечное сечение) и фотоизображение адаптивной микролинзы с беспроводным управлением, восстанавливающей функции хрусталика после операций по удалению катаракты. На рисунке: 1 — стеклянные подложки, 2 — низкоомный токопроводящий слой, 3 — слой ЖК, 4 — контакт,

5 — высокоомный токопроводящий слой, 6 — диод, 7 — антенна. На пути создателей таких линз стоит еще много проблем, но разработанные физические принципы вселяют надежду на успех.

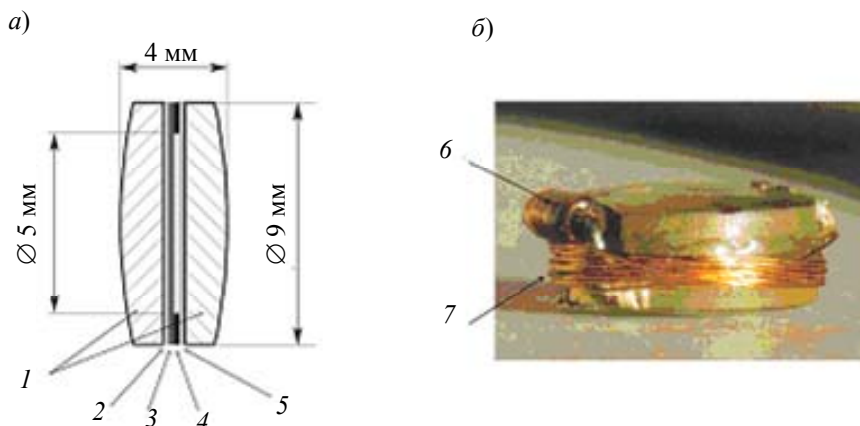


Рис. 11

Анализируя новые функциональные возможности адаптивных линз на ЖК, которые предполагается имплантировать непосредственно в глаз, нельзя не вспомнить о скульптурных изображениях фараонов и сакральных животных с помещенными в глазницы фибулами, содержащими чечевицы из кристаллического кварца. В этом можно увидеть развитие линзы по спирали как длительного процесса совершенствования от выполняющего декоративную функцию ювелирного изделия, располагаемого в глазнице почитаемых богов, царей и сакральных животных для придания их скульптурам эффекта живого взгляда, до современной микролинзы, используемой в новом качестве. В этом качестве линза выполняет уже не декоративную функцию, а имеет новое назначение — коррекцию дефектов зрения человека. При внешнем сходстве с древней чечевицей современный корректор дефектов зрения, располагаемый непосредственно в глазу человека, обладает адаптивными оптическими свойствами в реальном времени. Эта короткая история о длительном периоде эволюции линз для улучшения возможностей нашего зрения, насчитывающем пять тысячелетий, еще не окончена. Она продолжается...

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томилин М. Г., Неверов О. Я., Сайнс Дж. Первые линзы древних // Оптич. журн. 1997. Т. 64, № 11. С. 96—103.
2. Стафеев С. К., Томилин М. Г. Пять тысячелетий оптики: предыстория. СПб: Политехника, 2006. 304 с.
3. Сокровища Трои. Из раскопок Г. Шлимана: Каталог выставки. М.: Леонардо-Арт, 1996.
4. Temple R. The Crystal Sun. London: Century Books, 2000. 642 p.
5. Enoch J. M. Archeological optics // Intern. Trends in Appl. Optics: Intern. Soc. of Opt. Engin. Washington, DC, 2002. Vol. 5. P. 629—666.
6. Толанский С. Революция в оптике. М.: Мир, 1971. 210 с.
7. Sines G. Precision of engraving of Etruscan Archaic Greek gems // Archeomaterials. 1992. Vol. 6, N 1. P. 53—68.
8. Стафеев С. К., Томилин М. Г. Пять тысячелетий оптики: Античность. СПб: Изд-во „ФормаТ“, 2010. 526 с.
9. Керпелева С. Ю., Томилин М. Г. Оптические сферы: загадки древних технологий // Оптич. журн. 1999. Т. 6, № 1. С. 88—90.
10. Crombie A. C. Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science 1100—1700. Oxford: Clarendon Press. 1971. [Из книги Р. Бэкона "Opus Maius", iv. ii. 2, MS Roy. 7. F. viii, f. 25v.]
11. Вавилов С. И. Глаз и солнце. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 157 с.

12. Гуриков В. А. Первые в истории человечества попытки создания средств коррекции зрения // Мир оптики. 2000. № 1. С. 22.
13. Невская Г. Е., Томилин М. Г. Адаптивные линзы на основе жидких кристаллов // Оптич. журн. 2008. Т. 75, № 9. С. 35—48.

**Сведения об авторе**

**Максим Георгиевич Томилин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики; E-mail: mgtomilin@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
физики

Поступила в редакцию  
14.04.11 г.

---

---

# КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК [517.938 + 519.713 / .718]: 621.398

А. В. УШАКОВ, Е. С. ЯИЦКАЯ

## МОДИФИКАЦИЯ МАТРИЦ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫХ КОДОВ В ЗАДАЧЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СКРЫТНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

С помощью невырожденных матричных мультипликативных компонентов формируются банки образующих и проверочных матриц систематических помехозащищенных кодов.

*Ключевые слова:* помехозащищенный код, образующая и проверочная матрицы, матричный мультипликативный компонент, скрытность.

Рассматривается задача обеспечения скрытности передачи информации с помощью двоичных кодов, преобразование которых в функциональной среде „кодер—канал—декодер—коррекция“ осуществляется [1] в соответствии с векторно-матричными соотношениями

$$y = a\mathbf{G}; f = y \oplus \xi; E = f\mathbf{H}; \hat{\xi} = E\mathbf{H}^+; \hat{y} = f \oplus \hat{\xi},$$

где  $a, y, \xi, f, E, \hat{\xi}, \hat{y}$  — вектор-строки соответственно информационного ( $k$ ) кода, помехозащищенного ( $n, k$ ) кода (ПЗК), кода помехи в канальной среде (КС), искаженного в КС ПЗК, кода синдрома искажения, кода коррекции, откорректированного принятого из КС кода;  $\mathbf{G}$  —  $(k \times n)$ -образующая и  $\mathbf{H}$  —  $(n \times m)$ -проверочная матрицы ПЗК;  $n - k = m$  — число проверочных разрядов ПЗК.

**Утверждение 1.** Пара  $(\mathbf{G}, \mathbf{H})$  порождает ПЗК при необходимом условии

$$\mathbf{GH} = \mathbf{O}. \quad \square (1)$$

*Доказательство* утверждения строится на использовании системы соотношений

$$\begin{aligned} y = a\mathbf{G}; f = y \oplus \xi; E = f\mathbf{H} &= (y \oplus \xi)\mathbf{H} = (a\mathbf{G} \oplus \xi)\mathbf{H} = a\mathbf{GH} \oplus \xi\mathbf{H} \Big|_{\xi=0} = \\ &= a\mathbf{GH} \Big|_{\forall a} = \mathbf{O} \rightarrow \mathbf{GH} = \mathbf{O}. \quad \blacksquare \end{aligned}$$

**Утверждение 2.** Умножение матриц  $\mathbf{G}$  слева и  $\mathbf{H}$  справа соответственно на невырожденные произвольные  $(k \times k)$ -матрицу  $\mathbf{Q}$  и  $(m \times m)$ -матрицу  $\mathbf{P}$  порождают матрицы  $\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{QG}$  и  $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{HP}$ . При этом

$$\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{O}. \quad \square (2)$$

*Доказательство* строится на использовании условия (1) в цепочке равенств

$$\tilde{\mathbf{G}}\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{QGH}\mathbf{P} = \mathbf{Q}(\mathbf{GH})\mathbf{P} = \mathbf{Q}(\mathbf{O})\mathbf{P} = \mathbf{O}. \quad \blacksquare$$

Невырожденность матриц  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{P}$  обеспечивается выбором их в виде:



1) матриц перестановок, при этом мощности получаемых множеств матриц составят величины  $[\{\mathbf{Q}\}] = k!$ ,  $[\{\mathbf{P}\}] = m!$ ;

2)  $\mathbf{Q} = \mathbf{N}_{\mathbf{Q}}^{l_{\mathbf{Q}}}$ ,  $l_{\mathbf{Q}} = \overline{0, v_{\mathbf{Q}} - 1}$ , и  $\mathbf{P} = \mathbf{N}_{\mathbf{P}}^{l_{\mathbf{P}}}$ ,  $l_{\mathbf{P}} = \overline{0, v_{\mathbf{P}} - 1}$ , где  $(k \times k)$ -матрица  $\mathbf{N}_{\mathbf{Q}}$  и  $(m \times m)$ -матрица  $\mathbf{N}_{\mathbf{P}}$  имеют соответственно характеристическими многочленами неприводимые, принадлежащие максимальным показателям [2]  $v_{\mathbf{Q}} = \max \arg \{ \mathbf{N}_{\mathbf{Q}}^{v_{\mathbf{Q}}} = \mathbf{I} \} = 2^k - 1$  и  $v_{\mathbf{P}} = \max \arg \{ \mathbf{N}_{\mathbf{P}}^{v_{\mathbf{P}}} = \mathbf{I} \} = 2^m - 1$ , так что  $[\{\mathbf{Q}\}] = 2^k - 1$ ,  $[\{\mathbf{P}\}] = 2^m - 1$ .

Процедура максимизации значений  $[\{\mathbf{Q}\}]$  и  $[\{\mathbf{P}\}]$  может быть осуществлена с помощью данных приводимой ниже таблицы.

$k(m)$	1	2	3	4	5	7	11	15	26
$k!(m!)$	1	2	6	24	120	5040	3,99+7	1,31E+12	4,03E+26
$2^k - 1(2^m - 1)$	1	3	7	15	31	127	2047	3,28E+4	6,71E+7

Предложенные процедуры проиллюстрируем примером  $(n, k) = (7, 4)$  — ПЗК с образующим многочленом  $g(x) = x^3 + x + 1$ . Код характеризуется [2] матрицами

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Согласно данным таблицы матрицы  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{P}$  строим соответственно в форме матрицы перестановок и процедуры:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \mathbf{N}_{\mathbf{P}}^{l_{\mathbf{P}}} \Big|_{l_{\mathbf{P}}=4} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

так что образующая  $\tilde{\mathbf{G}}$  и проверочная  $\tilde{\mathbf{H}}$  матрицы получают представление

$$\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{Q}\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T.$$

При этом (см. таблицу)  $[\{\tilde{\mathbf{G}}, \tilde{\mathbf{H}}\}] = [\{\mathbf{Q}\}] \cdot [\{\mathbf{P}\}] = 7 \cdot 24 = 168$ .

**Основной результат.** Полученные банки  $\{\tilde{\mathbf{G}}\}$  и  $\{\tilde{\mathbf{H}}\}$  модифицированных образующих  $\tilde{\mathbf{G}}$  и проверочных  $\tilde{\mathbf{H}}$  матриц порождают мощность  $[\{\tilde{\mathbf{G}}, \tilde{\mathbf{H}}\}] = [\{\mathbf{Q}\}] \cdot [\{\mathbf{P}\}]$  возможных реализаций помехозащитных преобразований кодов, что позволяет обеспечить частичную скрытность процесса передачи информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушаков А. В., Яицкая Е. С. Рекуррентное систематическое помехозащитное преобразование кодов: возможности аппарата линейных двоичных динамических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 17—25.
2. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 600 с.

*Сведения об авторах*

- Анатолий Владимирович Ушаков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики;  
E-mail: ushakov-AVG@yandex.ru
- Елена Сергеевна Яицкая** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики;  
E-mail: yaitskayaes@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
07.10.11 г.

---

---

# ИНФОРМАЦИЯ

---

---

## СООБЩЕНИЕ О КОНКУРСЕ ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ СПЕЦИАЛИСТОВ, БАКАЛАВРОВ, МАГИСТРОВ „ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. ОПТОТЕХНИКА. ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА. ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ“ 2011 г.

16-й Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ (ВКР) специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика. Лазерная техника и лазерные технологии“ в 2011 г. проведен Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО) — базовым вузом по образованию в области приборостроения и опотехники. Конкурсы проводятся с 1996 г. по решению Совета учебно-методического объединения по образованию в области приборостроения и опотехники (далее — Совет УМО). Для координации организации и проведения студенческих олимпиад и конкурсов, в том числе данных конкурсов, в составе УМО создан Совет по студенческим олимпиадам и конкурсам. Совет собирается один-два раза в год и обсуждает методические, организационные и другие текущие вопросы проведения студенческих олимпиад и конкурсов, проводимых вузами России, реализующими учебные программы высшего профессионального образования в области приборостроения, опотехники, фотоники и оптоинформатики. Советом разработана и утверждена методика оценки ВКР, поступивших на конкурс.

Конкурс выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика. Лазерная техника и лазерные технологии“ 2011 г. проводился в соответствии с планом организации Всероссийской студенческой олимпиады 2011 г., в котором указаны сроки и регламент проведения мероприятий олимпиады. Состав оргкомитета, жюри и рабочей группы конкурса утверждены приказом ректора СПбНИУ ИТМО № 728-од от 22.11.2011 г. Этим же приказом утверждено Положение о конкурсе.

С 2006 г. конкурсы ВКР проводятся с использованием электронных средств связи (сети Интернет) на этапах получения и рецензирования работ.

В 2011 г. в рабочую группу конкурса выпускных квалификационных работ по опотехнике, фотонике и оптоинформатике, лазерной технике и лазерным технологиям поступило 59 работ из 13 вузов РФ. Участниками Всероссийского конкурса ВКР 2011 г. стали: Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ); Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ); Казанский государственный технический университет (КГТУ) им. А. Н. Туполева, филиал „Восток“; Казанский национальный исследовательский технический университет (КНИТУ) им. А. Н. Туполева;

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ); Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ); Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО); Северо-Западный государственный заочный технический университет (СЗТУ); Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА), Новосибирск; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР); Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс (Госуниверситет — УНПК), Орел; Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ), Курск.

Среди поступивших ВКР материалы 21 работы апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов. Авторами работ, представленных к награждению дипломами конкурса, выполнено 30 докладов на различных конференциях.

Авторы 45 работ использовали при их написании материалы научных статей и конференций.

Материалы сети Интернет использованы авторами при написании 31 работы.

Документы о практическом использовании результатов работ присутствуют в материалах 12 работ.

По результатам конкурса определены следующие победители:

- Попугаева Вероника Викторовна (ТУСУР) — I место среди работ бакалавров;
- Сергеев Максим Михайлович (СПбНИУ ИТМО) — II место среди работ бакалавров;
- Дегтярев Кирилл Сергеевич (ЮЗГУ) — III место среди работ бакалавров;
- Кулешова Екатерина Николаевна (СПбНИУ ИТМО) — I место среди работ магистров;
- Муслимов Эдуард Ринатович (КНИТУ им. А. Н. Туполева) — I место среди работ магистров;
- Копылова Татьяна Валерьевна (СПбНИУ ИТМО) — II место среди работ магистров;
- Иванов Николай Витальевич (ЮЗГУ) — диплом за комплексный подход к решению задачи;
- Павлов Олег Владимирович (ТПУ) — диплом за подробное представление технологии эксперимента;
- Прокуратов Денис Сергеевич (СПбГЭТУ) — диплом за вклад в сохранение культурного наследия;
- Ковалева Виктория Викторовна (СГГА) — диплом за качественное выполнение инженерных расчетов;
- Суродина Татьяна Сергеевна (СГГА) — диплом за отличное выполнение конструкторской документации;
- Абакумов Игорь Игоревич (СЗТУ) — диплом за подробное описание технического эксперимента;
- Лозовой Кирилл Александрович (ТГУ) — диплом за высокий научный уровень работы;
- Охорзина Алена Витальевна (ТПУ) — диплом за грамотное решение актуальной темы;
- Громов Артем Александрович (ВлГУ) — диплом за высокий уровень конструкторской разработки;
- Гнзидюх Сергей Вячеславович (Госуниверситет — УНПК) — диплом за комплексное решение поставленной задачи;

— Мухаметов Рустам Маратович (КГТУ „Восток“) — диплом за высокий уровень решения технологических вопросов разработки.

Награды представителям вузов вручены на заседании Совета УМО вместе с подарками, предоставленными спонсором конкурса — ЗАО НПФ „Уран“.

*Заместитель председателя Совета УМО,  
проректор по учебно-методической работе СПбНИУ ИТМО  
А. А. ШЕХОНИН*

*Председатель рабочей группы конкурса  
С. С. ГВОЗДЕВ*

*Член рабочей группы конкурса  
Е. В. ПОПОВА*

## SUMMARY

P. 3—7.

### AUDIO DATA ANALYSIS USING WAVELET FUNCTIONS

Applications of wavelet functions in digital sound processing are considered. Advantages of wavelet transforms over traditional analytical methods are demonstrated. Capabilities of wavelet-analysis in audio data filtration and compression are investigated.

**Key words:** analysis, sound, wavelet, compression, audio data.

#### *Data on authors*

- Eugeny V. Piunovsky* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology;  
E-mail: evgpiun@gmail.com
- Andrey A. Tropchenko* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology;  
E-mail: zayka\_98rus@mail.ru

P. 8—13.

### ARRANGEMENT OF MACHINE-MACHINE DATA EXCHANGE IN BACKUP COMPUTER COMPLEX

Reliability analysis of two-machine computer complex is carried out for various approaches to machine-machine data exchange arrangement. Advantages are demonstrated of the exchange on the base of double direct memory access.

**Keywords:** backup computer complex, fault tolerance, machine-machine exchange.

#### *Data on authors*

- Vladimir A. Bogatyrev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology;  
E-mail: Vladimir.bogatyrev@gmail.com
- Ivan Yu. Golubev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology;  
E-mail: www.golubev@mail.ru
- Vladimir F. Bezzubov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology

P. 14—18.

### DESIGN OF LADDER-TYPE RC-GENERATORS

Analytical expressions and algorithms are developed for calculation of quasi-resonant frequencies of ladder-type phasing RC-circuits of various configurations.

**Keywords:** generator, quasi-resonance, transformation function, chain structure, phasing circuit.

#### *Data on author*

- Artur I. Gulin* — Cand. Techn. Sci.; Ufa State Aviation Technical University, Department of Telecommunication Systems; E-mail: Gulin\_tks@ugatu.ac.ru

P. 19—26.

### DESIGN OF REDUCTION TRACT OF ACTIVE FREQUENCY SYNTHESIZER

Variants of construction of reduction tract of pulse-phase self-tuning frequency loop are considered. Amplification coefficients for noise accompanying input referent oscillation, which fall within the loop transparency band, are defined, and methods of the noise reduction are proposed.

**Keywords:** pulse-phase frequency self-tuning, reduction tract, finite automation, parasitic discrete spectral components.

#### *Data on author*

*Yury A. Nikitin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Branch of Radio Research and Development Institute; Senior Scientist; E-mail: yuriyan@list.ru

P. 27—30.

### MULTIELEMENT ELECTRICAL CAPACITOR CONVERTERS FOR FULL-FLOW MOISTURE MEASUREMENT OF CRUDE EMULSION

Description of construction of multielement electrical capacitor converters designed to improve accuracy and reliability of estimation of crude emulsion structure of a water oil emulsion in a wide range of water content in oil is presented.

**Keywords:** multi-electrode capacity transformer, sensor, capacity, moisture gauge, oil.

#### *Data on authors*

*Yury I. Steblev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Samara State Technical University, Department of Automation of Oil and Gas Production Complex; E-mail: steblev404@mail.ru

*Ekaterina S. Vashurkina* — Samara State Technical University, Department of Automation of Oil and Gas Production Complex; Senior Lecturer; E-mail: kat\_nef@mail.ru

P. 31—35.

### INVESTIGATION ON ENERGETIC SENSITIVITY OF OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS WITH POLYCHROMATIC OPTICAL EQUISIGNAL ZONE

Results of investigation of effective energetic sensitivity to shift of photo-receiving module in systems with polychromatic optical equisignal zone are presented. Application of the energetic sensitivity criterion for polychromatic optical equisignal zone systems is shown to be of particular efficiency for optimal choice of emitting, photosensitive, and optical components.

**Keywords:** optical-electronic system, polychromatic optical equisignal zone, spatial positioning.

#### *Data on authors*

*Anton A. Maraev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: antoshka87@gmail.com

*Igor A. Konyakhin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

*Alexander N. Timofeev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

**P. 36—42.****PECULIARITIES OF IMAGE TRANSMISSION AT COLLINEAR DIFFRACTION OF LIGHT ON ACOUSTIC WAVE**

The problem of image transmission by a light beam under collinear diffraction of the beam on acoustic wave in crystal is considered. The law of image transformation, the transfer function, and other characteristics of collinear acousto-optical filter are derived for the general case; approximation of weak birefringence is not used.

**Keywords:** acousto-optical filter, collinear diffraction, image distortion.

*Data on authors*

*Alexander S. Machikhin* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Scientific & Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Laboratory of Acousto-Optical Spectroscopy, Moscow;  
E-mail: aalexanderr@mail.ru

*Vitold E. Pozhar* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; N. F. Bauman Moscow State Technical University, Department of Opto-Electronic Devices Research; E-mail: v\_pozhar@rambler.ru

**P. 42—47.****THE CORRECTION PARAMETER ANALYSIS IN THREE-COMPONENT OPTICAL SYSTEM**

A method of parametric synthesis of three-component optical system based on theoretical parametrical model is described. The shielding factor for the system is shown to take values from 0.382 to 0.634, and thus the optical system may be applied in the case of off-axis ray path, when the system pupil is free of shielding.

**Key words:** optical system, reflector, reflecting surface, aperture diaphragm, shielding factor, parameters, aberrations.

*Data on authors*

*Stanislav V. Gayvoronsky* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;  
E-mail: gaivoronsky@mail.ru

*Viktor A. Zverev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: post\_vaz@rambler.ru

**P. 47—50.****A NONCONTACT PNEUMATIC-OPTICAL METHOD OF INTRAOCULAR PRESSURE MEASUREMENT**

A noncontact method for measuring intraocular pressure is developed. The method employs pneumatic impact on the corneas and is based on described physical and mathematical model of the effect.

**Key words:** intraocular pressure, corneas, tonometer, glaucoma.

*Data on authors*

*Vladimir A. Trofimov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;  
E-mail: troftu@mail.ru

*Yury T. Nagibin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;  
E-mail: nagibin77@mail.ru

*Maria L. Shvanova* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; E-mail: shvanova@bk.ru



**P. 51—55.**

**PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OPTICAL MICROSTRUCTURES WITH THE LASER ABLATION METHOD**

Peculiarities of application of laser engraving to micron-sized structure formation and production of optical microelements such as lattice micro-prism are investigated. Physical limitations on microstructure writing are discussed; examples of concrete elements production are presented.

**Keywords:** laser engraving, micro-optics, micro-prism array, ablation of polymers.

*Data on authors*

- Vera K. Balia** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; Junior Scientist;  
E-mail: Vera\_Balya@mail.ru
- Igor Yu. Denisiuk** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems;  
E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

**P. 56—60.**

**ANALYTICAL DESCRIPTION OF NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELD OF ISOTHERMAL OBJECT UNDER RADIANT HEAT EXCHANGE WITH ITS ENVIRONMENT**

An analytical description of transient temperature field of convex isothermal body heated by an inner source is obtained for the case of a constant temperature of surrounding medium. The description is shown to be inapplicable for cooling processes.

**Key words:** radiant heat transfer, heating, cooling, dimensionless parameters, analytical description.

*Data on authors*

- Eugeny V. Lapovok** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Sergey I. Khankov** — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring

**P. 61—64.**

**OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION OF COOLING SYSTEM FOR ELECTRONIC MODULE**

Construction of bimetallic (copper – aluminum) soldered radiator for effective cooling of electronic elements with high irregularity of thermal flux is considered. A method for optimization of the radiator design is presented.

**Keywords:** forced air cooling, radiator, finite element method, design optimization.

*Data on authors*

- Gavriil V. Biryulin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: gavriila@bk.ru
- Vladimir I. Egorov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru
- Svyatoslav Yu. Murov** — Public Corporation "BNT Priboy", St. Petersburg; Engineer
- Igor V. Nevsky** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: nevskigor@mail.ru

**P. 65—69.**

### **CONSIDERATION OF AVERAGE TIME BETWEEN RENEWALS IN PREDICTION OF FAILURE-FREE OPERATION TIME OF AVIONICS**

A method is proposed for estimation of reliability (failure-free operation time) of structurally redundant device entering an avionics technical system complex. Comparative analysis of calculation models used for redundant device with average statistical reliability indexes is presented.

**Key words:** reliability, redundancy, failure-free operation.

#### *Data on author*

*Olga A. Kuznetsova* — FGUP OKB "Elektroavtomatika", St. Petersburg; Department of Reliability; Head of the Department; E-mail: kuzola@ya.ru

**P. 70—79.**

### **EYE AND LENS THROUGH THE PRISM OF MILLENNIUMS**

A brief history of optical lens development is considered, starting from elementary device made of quartz and introduced into eye socket of sculpture of sovereign or sacred animal of archaic civilization, and up to modern adaptive liquid-crystal lens implanted in human eye for cataract treatment. Basic stages of lens development in the eras of archeological optics, reading stones manufacturing, and invention of spectacles are described.

**Keywords:** archeological optics, Shliman lenses, Nero smaragd, Visby lenses, spectacles invention, liquid-crystal adaptive lens.

#### *Data on author*

*Maxim G. Tomilin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physics; E-mail: mgtomilin@mail.ru

**P. 80—82.**

### **MATRIX MODIFICATION OF SYSTEMATIC NOISE-FREE CODES IN THE PROBLEM OF INFORMATION TRANSFER SECURITY ENSURING**

Check and form matrix of systematic noise-free codes banks are formed with the use of non-degenerate matrix multiplicative components.

**Key words:** noise-free code, generator and check matrices, matrix multiplicative component, security.

#### *Data on authors*

*Anatoly V. Ushakov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: ushakov-AVG@yandex.ru

*Elena S. Yaitskaya* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: yaitskayaes@mail.ru