

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Жарковский А. В., Лямкин А. А., Тревгода С. А. Алгоритмизация процесса обработки научно-технических текстов..... 3
- Рогов А. Е. Генетический алгоритм планирования работы группы радиотелескопов ..... 7

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Бахарева Н. Ф. Моделирование трафика в компьютерных сетях с помощью потоков событий..... 13
- Тозик В. Т. Математический аппарат для анализа структурных свойств сетей ..... 22

### ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

- Анодина-Андриевская Е. М., Марусина М. Я. Использование вейвлетного преобразования сигналов при выявлении диагностических признаков элементов приборов и механизмов ..... 31
- Ефремов Л. В. Оценка интервалов между калибровками с учетом запаса метрологической надежности средств измерений ..... 34

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Разработка модели распределения плотности токов при возбуждении ионосферы высокочастотным облучением ..... 41
- Зиятдинов С. И. Дискретный интегродифференцирующий фильтр с промежуточным сглаживанием отсчетов входного сигнала..... 47
- Головков В. А., Солк С. В. Одноэлементный термодетектор ..... 51

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Гаврилина О. А., Дубинин С. В. Реализация информационной модели оптической системы на этапах функционального проектирования и конструирования ..... 55
- Тымкул Л. В., Тымкул В. М. Компьютерное моделирование работы приборов ночного видения в произвольно поляризованном свете ..... 61

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Драгунов К. И., Олексенко И. Н., Филин Е. Н., Чернецкий Н. П., Шустов В. И. Влияние неравномерности солнечного нагрева на стабильность геометрических параметров калибровочного сетчатого сферического отражателя..... 66

### ИНФОРМАЦИЯ ..... 71

### SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)..... 75

### УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2010 г. .... 80

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<b>Zharkovsky A. V., Lyamkin A. A., Trevgoda S. A.</b> Algorithmization of Scientific and Technical Texts Processing .....	3
<b>Rogov A.E.</b> Genetic Algorithm of Radio Telescope Group Operation Planning .....	7

### COMPUTING TECHNIQUE

<b>Bakhareva N. F.</b> Traffic Modeling in Computer Network with the Use of Flow of Events .....	13
<b>Tozik V. T.</b> Mathematical Apparatus for Analysis of Structural Properties of Networks .....	22

### FINE MECHANICS DEVICES

<b>Anodina-Andrievskaya E. M., Marusina M. Ya.</b> Application of Wavelet Transformation of Signals for Revealing of Diagnostic Indicators of Instrument Elements and Mechanisms .....	31
<b>Efremov L. V.</b> Estimation of Intervals Between Calibrations with the Account for Metrological Robustness of Measuring Means .....	34

### ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

<b>Grishentsev A. Yu., Korobeinikov A. G.</b> Development of Current Density Distribution in Ionosphere under High-Frequency Radiation .....	41
<b>Ziatdinov S. I.</b> Discreet Integro-Differentiative Filter with Intermediate Smoothing of Input Signal Counts ....	47
<b>Golovkov V. A., Solk S. V.</b> One-Element Thermodetector .....	51

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

<b>Gavrilina O. A., Dubinin S. V.</b> Information Model Realization for Optical System under Functional Design and Construction .....	55
<b>Tymkul L. V., Tymkul V. M.</b> Computer Modeling of Night Vision Instrument Operation at Arbitrary Polarized Light .....	61

### HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

<b>Dragunov K. I., Oleksenko I. N., Filin E. N., Chernetsky N. P., Shustov V. I.</b> Effects of Solar Heat Irregularity on Stability of Geometric Parameters of Calibration Spherical Grid Reflector .....	66
--	----

<b>INFORMATION</b> .....	71
--------------------------	----

<b>SUMMARY</b> .....	75
----------------------	----

<b>THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2010</b> .....	80
---	----

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

А. В. ЖАРКОВСКИЙ, А. А. ЛЯМКИН, С. А. ТРЕВГОДА

## АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕКСТОВ

Рассматриваются алгоритмы автоматизации процесса обработки научно-технических текстов. Предложен критерий корректности структуры текста, формализованы характеристики и ограничения на корректные структуры. Приведена структура системы автоматизации реферирования научно-технического текста.

*Ключевые слова:* алгоритм, формализация, предикат, система автоматизации, реферирование, обработка информации.

Развитие информационных технологий и значительный рост оборота электронной документации на предприятиях различного уровня выдвигает задачи создания методов обработки большого потока текстовой информации, в частности, методов сжатия текстовых документов — рефератов или аннотаций — с целью минимизации времени на их анализ.

Попытки решения проблемы автоматического реферирования текста предпринимались многими исследователями как за рубежом, так и в России. Многочисленные подходы к ее решению достаточно четко подразделяются на два направления [1]:

- 1) извлечение из исходного текста всех релевантных предложений (экстракция);
- 2) генерация реферата с использованием методов искусственного интеллекта (абстракция).

Второе направление связано с развитием методов искусственного интеллекта и в настоящее время представлено экспериментальными исследованиями, но до его широкой реализации еще далеко. Исследования в рамках первого направления в области автоматического реферирования базируются, главным образом, на статистических методах, которые относятся к „поверхностным“, они рассматривают текст как набор линейно упорядоченных слов, словосочетаний и предложений и не учитывают особенностей структуры текста. Как показала практика, различные статистические методы анализа текста недостаточно эффективны. Дальнейшее усложнение их математического аппарата без привлечения параметров структуры текста не позволит заметно повысить качество подобных систем.

В данном случае рассматривается подход к автоматизации обработки научно-технических текстов на русском языке, основанный на учете их структуры. Этот подход базируется на использовании теории риторической структуры текста (ТРС), которая рассматривает текст в виде древовидной структуры, узлы которой связаны между собой функциональными отношениями [2]. Единицами (узлами) структуры являются элементарные текстовые элементы (ЭТЭ), представляющие собой части предложения.

Анализ основных положений ТРС показал, что ее непосредственное применение для построения модели автоматического реферирования текста невозможно из-за нечеткого

формализованного описания структуры текста, критериев отличия корректной структуры от некорректной и алгоритмов построения такой структуры [1].

Научно-техническим текстам присущи логичность, аргументированность, наличие опорных слов и словосочетаний (ключевых фраз), которые являются единицами структурно-смысловой организации фрагментов текста. Это позволяет выделить подмножество функциональных отношений, а также ключевых фраз, которые позволяют провести формализацию описания структуры текста. Такая формализация включает в себя:

- определение критерия корректности структуры текста;
- описание характеристик структуры текста;
- описание ограничений на корректные структуры.

Критерий „корректность структуры текста“ формулируется следующим образом: если функциональное отношение  $R$  лежит между двумя элементами текстовой структуры, то оно лежит, по крайней мере, между двумя ключевыми ЭТЭ-потомками этих элементов.

На следующем этапе формализации определяются характеристики структуры текста: статус, тип и множество ключевых потомков, которые связаны с каждым узлом. Статус отражает роль данного узла в функциональном отношении, тип содержит функциональное отношение, соединяющее прямых потомков, множество ключевых узлов содержит потомков, играющих роль „ядра“ в функциональном отношении. Данные характеристики дают достаточное количество информации для описания текстовой структуры и использования этой информации в алгоритмах. Формальное описание характеристик структуры текста для текстового фрагмента  $[l, h]$  представлено ниже.

Параметр  $S(l, h, status)$  показывает статус фрагмента  $[l, h]$ , где  $status$  — роль элементов функционального отношения — может иметь значения  $NUCLEUS$ (ЯДРО),  $SATELLITE$ (САТЕЛЛИТ) или  $NONE$ (НЕ ОПРЕДЕЛЕН),  $l$  — левый индекс ЭТЭ,  $h$  — правый индекс ЭТЭ.

Тип  $T(l, h, relation\_name)$  показывает имя функционального отношения, которое лежит между его прямыми потомками, где  $relation\_name$  — функциональное отношение.

Параметр  $P(l, h, unit\_name)$  показывает имя ключевого ЭТЭ среди своих прямых потомков, где  $unit\_name$  — название или индекс ЭТЭ.

Совокупность ограничений на корректные структуры текста представляется в виде следующих предикатов.

1) Для каждого фрагмента текста  $[l, h]$  параметр узла структуры  $S$  имеет домен значений  $NUCLEUS, SATELLITE, NONE$  :

$$[(1 \leq h \leq N) \wedge (1 \leq l \leq h)] \rightarrow \{[l = h \rightarrow (S(l, h, NUCLEUS) \vee S(l, h, SATELLITE))] \wedge [l \neq h \rightarrow (S(l, h, NUCLEUS) \vee S(l, h, SATELLITE) \vee S(l, h, NONE))]\}.$$

2) Статус любого фрагмента текста уникален:

$$[(1 \leq h \leq N) \wedge (1 \leq l \leq h)] \rightarrow [(S(l, h, status_1) \wedge S(l, h, status_2)) \rightarrow status_1 = status_2].$$

3) По крайней мере, одно функциональное отношение лежит между двумя смежными фрагментами текста:

$$[(1 \leq h \leq N) \wedge (1 \leq l \leq h)] \rightarrow [(T(l, h, name_1) \wedge T(l, h, name_2)) \rightarrow name_1 = name_2].$$

4) Фрагменты текста не накладываются друг на друга:

$$[(1 \leq h_1 \leq N) \wedge (1 \leq l_1 \leq h_1) \wedge (1 \leq h_2 \leq N) \wedge (1 \leq l_2 \leq h_2) \wedge (l_1 < l_2) \wedge (h_1 < h_2) \wedge (l_2 \leq h_1)] \rightarrow [\neg S(l_1, h_1, NONE) \rightarrow S(l_2, h_2, NONE)].$$

5) Фрагмент текста со статусом  $NONE$  не включается в результирующее дерево, описывающее структуру текста:

$$[(1 \leq h \leq N) \wedge (1 \leq l \leq h)] \rightarrow [(S(l, h, NONE) \wedge P(l, h, NONE) \wedge T(l, h, NONE)) \rightarrow (\neg S(l, h, NONE) \wedge \neg P(l, h, NONE) \rightarrow \neg T(l, h, NONE))].$$

б) Существует главный фрагмент текста, корень дерева, который покрывает весь текст:  
 $(\neg S(l, N, NONE) \wedge \neg P(l, N, NONE) \rightarrow \neg T(l, N, NONE))$ .

Введенные ограничения необходимы для исключения некорректных структур из алгоритма автоматического построения структуры текста. В соответствии с приведенной формализацией общий алгоритм автоматического реферирования включает в себя четыре основных этапа:

- 1) определение функциональных отношений в тексте;
- 2) построение структуры текста на основе набора функциональных отношений;
- 3) ранжирование листьев (элементов) древовидной структуры текста по важности;
- 4) формирование аннотации по ранжированному списку ЭТЭ.

Рассмотрим подробнее каждый из этих этапов. Определение функциональных отношений в тексте включает в себя следующие действия:

- разбиение текста на параграфы и предложения и определение ключевых фраз в тексте;
- определение границ ЭТЭ;
- определение функциональных отношений между фрагментами текста (параграфами, предложениями и ЭТЭ);
- определение отношений между фрагментами текста для элементов, еще не связанных функциональным отношением.

Построение структуры текста состоит из следующих шагов:

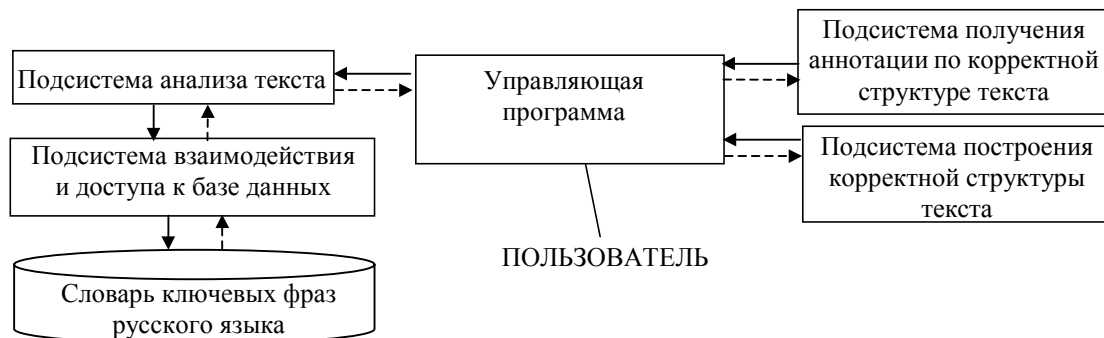
- построение деревьев для каждого из уровней текста (параграф, предложение, часть предложения);
- нахождение оптимальной структуры дерева для каждого из уровней фрагментов текста;
- объединение найденных деревьев в одно общее дерево.

Этап ранжирования единиц структуры текста по важности необходим для выбора самых значимых элементов текста при формировании аннотации требуемого объема.

Наиболее простой способ определения важности ЭТЭ — это подсчет весовых коэффициентов для каждого ЭТЭ на основе анализа высоты дерева относительно того узла, где впервые встретился данный ЭТЭ во множестве ключевых ЭТЭ-потомков. Чем больше значение коэффициента, тем важнее этот ЭТЭ.

На этапе формирования аннотации рассчитывается количество ЭТЭ в соответствии с заданным объемом аннотации и производится выборка этого количества ЭТЭ из начала отсортированного списка.

Структура системы автоматического реферирования, реализующей разработанные алгоритмы, представлена на рисунке.



При разработке программной системы, реализующей предложенный алгоритм, используются общие принципы системного проектирования и объектно-ориентированного программирования. Взаимосвязь подсистем обеспечивает управляющая программа. Процесс начинается с передачи управления подсистеме анализа текста, которая, используя словарь

ключевых фраз, полученный в результате анализа корпуса научно-технических текстов русского языка, разбивает текст на части (параграфы, предложения, части предложений) и определяет функциональные отношения между этими частями.

Далее управление передается подсистеме построения корректной структуры текста, которая по результатам разбиения текста на части строит результирующее дерево, покрывающее весь текст. На заключительном этапе работает подсистема формирования аннотации заданного размера.

Разработанная система автоматического реферирования реализована на языке Java. Словарь ключевых фраз хранится в базе данных MySQL.

Проведенные исследования показали, что качество аннотаций, полученных с помощью системы, реализующей предложенный алгоритм, значительно выше по сравнению с аннотациями, полученными с помощью традиционных статистических методов, при этом система имеет достаточно хорошее быстродействие, что служит основанием для ее практического использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marcu D.* The theory and practice of discourse parsing and summarization. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2000. 245 p.
2. *Inderjeet M.* Automatic summarization (Natural Language Processing). John Benjamins Publishing Company, 2001. 285 p.

#### *Сведения об авторах*

- Аркадий Викторович Жарковский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, заместитель проректора по научной работе; E-mail: av.jarkov@yandex.ru
- Александр Анатольевич Лямкин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: alex-ljamkin@yandex.ru
- Сергей Александрович Тревгода** — Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления, младший научный сотрудник; E-mail: troftu@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
систем автоматического управления

Поступила в редакцию  
09.03.10 г.

А. Е. РОГОВ

## ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГРУППЫ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ

Предложен метод планирования работы группы радиотелескопов при проведении эксперимента с использованием радиоинтерферометрии и со сверхдлинными базами, позволяющий представить задачу планирования как задачу дискретной оптимизации. Показана NP-полнота указанной задачи и предложен эволюционный метод ее решения.

**Ключевые слова:** генетический алгоритм, планирование эксперимента, радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами.

**Введение.** В настоящее время радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) является одним из наиболее востребованных методов радиоастрономии. Во время проведения эксперимента РСДБ радиотелескопы по заранее составленной программе одновременно наблюдают один и тот же космический объект. Время наблюдения может составлять всего несколько минут, при этом общее количество наблюдаемых во время эксперимента объектов — несколько десятков. Как правило, общее время наблюдения непосредственно космических объектов в 2—3 раза меньше общего времени проведения эксперимента, поскольку используемые в эксперименте радиотелескопы обладают сравнительно низкой скоростью углового перемещения. В некоторых случаях для перемещения зеркала радиотелескопа от одного космического объекта к другому может потребоваться несколько минут. Снизить трудоемкость разработки программы эксперимента и увеличить количество осматриваемых объектов без увеличения продолжительности эксперимента можно путем рационального планирования экспериментов РСДБ.

**Постановка задачи.** Задача планирования эксперимента РСДБ может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо найти последовательность выполнения заданий  $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_k]$  ( $i = \overline{1, n}$ ), такую что:

$$\sum_{i=1}^k c_i \tau_i \rightarrow \max, k < n, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k d_{(i-1)i}(t_{i-1}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $T$  — плановое время работы сети РСДБ;  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  — набор заданий, подлежащих выполнению;  $[\tau_i]$  — продолжительность выполнения  $i$ -го задания;  $[c_i]$  — приоритет (степень важности) задания,  $c_i \in \{0, 1\}$ ,  $t_i = t_{i-1} + d_{(i-1)i}(t_{i-1}) + \tau_i$  — время выполнения последовательности заданий;

$$\|d_{ij}(t)\| = \begin{bmatrix} 0 & d_{01}(t) & d_{02}(t) & \dots & d_{0n}(t) \\ d_{10}(t) & 0 & d_{12}(t) & \dots & d_{1n}(t) \\ d_{20}(t) & d_{21}(t) & 0 & \dots & d_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n0}(t) & d_{n1}(t) & d_{n2}(t) & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

— время перехода радиотелескопов, участвующих в эксперименте, от одного космического объекта к другому;  $d_{0i}(t)$  — время перехода радиотелескопов, участвующих в эксперименте,

из некоторых начальных положений (положение парковки) к первому наблюдаемому космическому объекту;  $d_{i0}(t)$  — время парковки радиотелескопов после окончания эксперимента при условии

$$t_k + d_{k0}(t_{k-1}) \leq T. \quad (3)$$

В простейшем случае, когда все заявки обладают одинаковым приоритетом, задача сводится к попытке выполнить в определенный интервал времени максимальное количество заявок. Оптимизация процесса при этом достигается за счет сокращения суммарного времени перенацеливания радиотелескопов, таким образом повышается степень полезного использования уникальных и дорогостоящих инструментов наблюдения.

По критерию (1) данная задача является вариантом задачи „о ранце“ [1, 2], а по критерию (2) — нестационарной задачей „коммивояжера“ [3]. Обе задачи относятся к классу NP-полных задач.

Как правило, во время эксперимента некоторые объекты необходимо наблюдать неоднократно. В этом случае в список под разными номерами следует несколько раз вставить наблюдение одного и того же космического объекта. При этом в  $d_{ij}(t)$  следует запретить непосредственный переход между объектами с этими номерами, установив на соответствующих позициях значение „бесконечность“.

Кроме того, эксперимент РСДБ может продолжаться несколько суток с перерывами на техническое обслуживание и отдых для персонала по 8—12 часов в сутки. В этом случае  $T = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_m$ . Соответственно по окончании очередного рабочего интервала  $T_i$  выполняется парковка всех радиотелескопов, а в начале следующего  $T_{i+1}$  интервала наблюдений переход осуществляется не из положения предыдущего космического объекта, а из положения парковки. Это относительно легко учесть путем соответствующей модификации условия (3).

При необходимости обеспечить наблюдение какого-то космического объекта ровно один раз в сутки в течение всего периода наблюдений, следует использовать динамический приоритет  $c_i = c_i(t)$ . Первая в сутки заявка на наблюдение указанного объекта будет иметь высокий приоритет, остальные — низкий. Возможны и более сложные случаи назначения динамического приоритета, например, когда необходимо провести наблюдение объекта два раза в сутки, один раз утром, другой — вечером. В этом случае приоритет у одной заявки должен быть высоким в начале суток, а затем убывать с течением времени, например, линейно, а у другой, наоборот, линейно возрастать от какого-либо исходного низкого значения.

**Определение минимального времени перехода от объекта к объекту с учетом ограничений.** Для двухосного азимутально-угломестного подвеса радиотелескопов, участвующих в эксперименте, время перехода от объекта к объекту можно определить следующим образом:

$$d_{ij}(t) = \max \left( \Delta t_{A1}(t), \Delta t_{h1}(t), t_{j1}^B - t, \dots, \Delta t_{Al}(t), \Delta t_{hl}(t), t_{jl}^B - t \right),$$

где  $l$  — количество радиотелескопов, участвующих в эксперименте;  $\Delta t_{Ak}$ ,  $\Delta t_{hk}$  — время перехода от  $i$ -го объекта к  $j$ -му соответственно по азимуту и углу места  $k$ -го радиотелескопа;  $t_{jk}^B$  — время ближайшего восхода  $j$ -го объекта в точке расположения  $k$ -го радиотелескопа (выбирается так, чтобы  $t_{jk}^B - t > 0$  если объект за горизонтом и  $t_{jk}^B - t < 0$  — если над горизонтом).

Введем следующие обозначения:  $\varphi_i(t)$  — конечный угол наведения некоторого радиотелескопа на  $i$ -й космический объект;  $V_i(t)$  — конечная скорость движения некоторого радиотелескопа при наведении на  $i$ -й объект;  $\varphi_j(t')$  — начальный угол наведения на  $j$ -й объект;  $V_j(t')$  — начальная скорость наведения на  $j$ -й объект.

На рис. 1 отражено время перехода от  $i$ -го объекта к  $j$ -му с учетом времени разгона  $\Delta t_p$  и торможения  $\Delta t_T$ :



$$\Delta t(t) = \frac{\varphi_j(t') - \varphi_i(t)}{V} + \frac{(V - V_i(t))^2}{2aV} + \frac{(V - V_j(t'))^2}{2aV}, \quad (4)$$

где  $a$  — максимальное ускорение радиотелескопа.

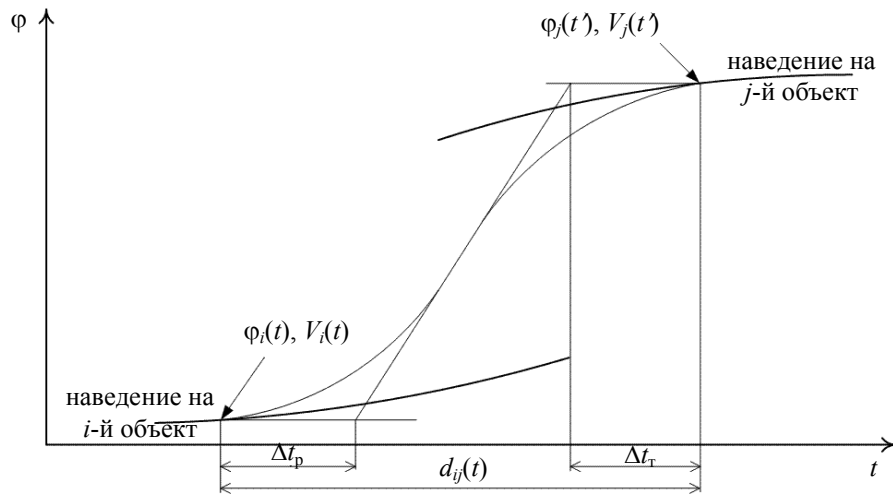


Рис. 1

Знак ускорения и скорости определяется из условий

$$\frac{\varphi_j(t') - \varphi_i(t)}{V} > 0; \quad aV > 0.$$

Максимальную скорость  $V$  радиотелескопа во время перехода в соотношении (4) можно определить в виде

$$V_{12} = V_j(t') \pm \sqrt{(\varphi_j(t') - \varphi_i(t))a + \frac{(V_j(t') - V_i(t))^2}{2}}. \quad (5)$$

Одно из значений  $V_1$  или  $V_2$  в (5) выбирается из условий

$$\frac{\varphi_j(t') - \varphi_i(t)}{V} > 0; \quad \frac{V - V_i(t)}{a} > 0; \quad \frac{V - V_j(t')}{a} > 0.$$

Если скорость  $V$  выше переборочной (максимальной) скорости радиотелескопа по соответствующей координате  $V_{\max}$ , то в (4) вместо  $V$  следует подставить  $V_{\max}$ .

Как правило, диапазон рабочих углов радиотелескопа допускает сопровождение космического объекта по азимуту несколькими разными способами, при этом  $A_{i1}(t) = A_i(t)$ ;  $A_{i2,i3}(t) = A_i(t) \pm 360^\circ$ ;  $A_{i4,i5}(t) = A_i(t) \pm 720^\circ$  и т.д. Поэтому целесообразно при расчете  $\Delta t_A(t)$  из всех допустимых значений выбрать наименьшее, т.е.  $\Delta t_A(t) = \min(\Delta t_{A1}(t), \Delta t_{A2}(t), \dots, \Delta t_{AS}(t))$ . Допустимым считается значение, удовлетворяющее условию

$$A_{\min} \leq A_{ik}(t) \leq A_{\max}; \quad t \in [t_{i0}, t_{ik}],$$

где  $A_{\min}$  и  $A_{\max}$  — минимальное и максимальное рабочее значение азимута некоторого радиотелескопа соответственно;  $t_{i0}$  — время начала наведения радиотелескопа на  $i$ -й объект;  $t_{ik}$  — время окончания наведения радиотелескопа на  $i$ -й объект.

Таким образом, зависимость времени перехода радиотелескопов от одного объекта к другому определяется движением небесной сферы и собственным движением космических объектов, вследствие чего с течением времени угловое расстояние между объектами в системе координат, связанной с подвесом каждого из радиотелескопов, изменяется. Кроме того,

проведенные исследования показали, что для большинства пар космических объектов время перехода  $d_{ij}(t)$  от объекта к объекту существенно зависит от времени  $t$  и имеет большой разброс значений. Пример зависимости продолжительности перехода  $t$  от времени суток представлен на рис. 2.

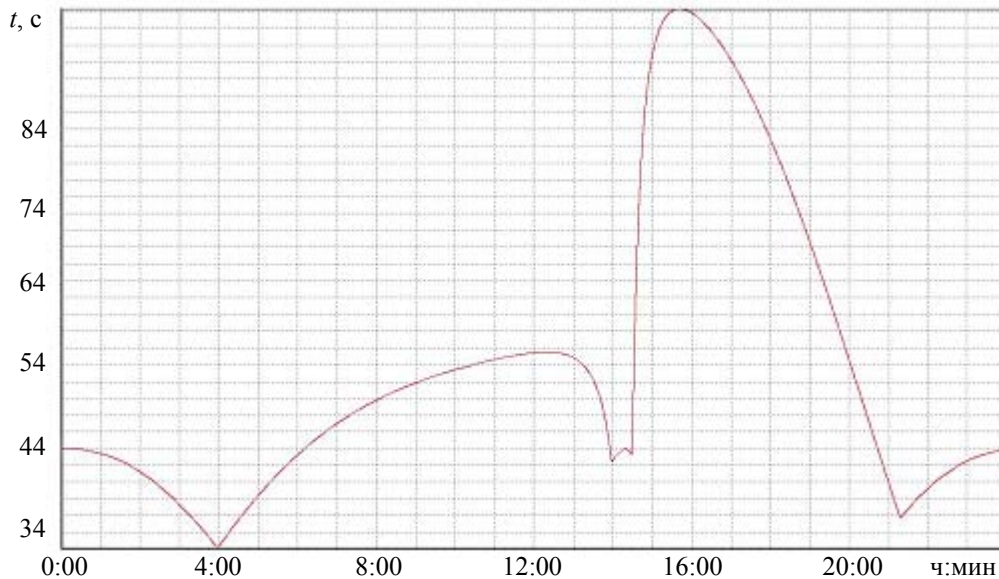


Рис. 2

**Генетический алгоритм для решения задачи.** Генетические алгоритмы [4] являются одним из высокоэффективных методов поиска оптимальных решений для различных задач науки и техники.

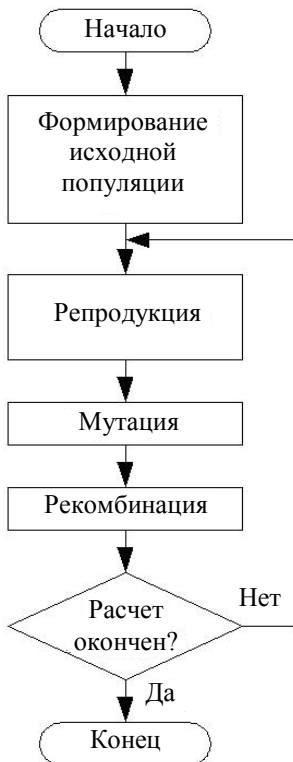


Рис. 3

От других методов оптимизации генетические алгоритмы отличаются тем, что:

- оперируют в основном не параметрами задачи, а закодированным множеством параметров, переход к реальным параметрам осуществляется только при подсчете целевой функции;

- осуществляют поиск не путем оптимизации одного решения, а путем использования нескольких альтернативных вариантов на заданном множестве решений;

- для оценки качества решений используют целевую функцию, а не ее различные приращения;

- применяют не детерминированные, а вероятностные правила анализа оптимизационных задач.

Для описания генетических алгоритмов, как правило, используются генетические операторы, которые по аналогии с алгоритмическими операторами являются конструкциями, представляющими один шаг из последовательности работы генетического алгоритма. Основными генетическими операторами являются операторы репродукции, мутации и рекомбинации. Обобщенный генетический алгоритм, в терминах генетических операторов, представлен на рис. 3.

Алгоритм решения задачи планирования эксперимента РСДБ сводится к следующему. Оператор репродукции представляет собой комбинацию операторов селекции и кроссинговера (скрещивания). Первый выбирает подходящие пары родителей для воспроизводства новых решений, а второй из выбранной

пары решений-родителей воспроизводит решение-потомка. Выбрана следующая реализация оператора селекции: первое решение-родитель выбирается из списка, а второе — случайным образом, т.е. каждое решение в популяции используется для воспроизводства как минимум один раз. Выбор одного и того же родителя для репродукции исключен.

Правило реализации оператора кроссинговера определяется правилом кодирования хромосом. Для решения задачи оптимального планирования работы радиотелескопа выбран простейший способ кодирования — хромосома, т.е. список номеров объектов в порядке их отслеживания радиотелескопами. Однако из-за наличия ограничений на возможные комбинации генов (ни один объект в решении не должен повторяться дважды) использование простейших генетических операторов приводит к появлению большого количества нереальных решений. Поэтому выбран модифицированный упорядоченный оператор кроссинговера (рис. 4), с помощью которого относительно просто можно получить только допустимые решения.

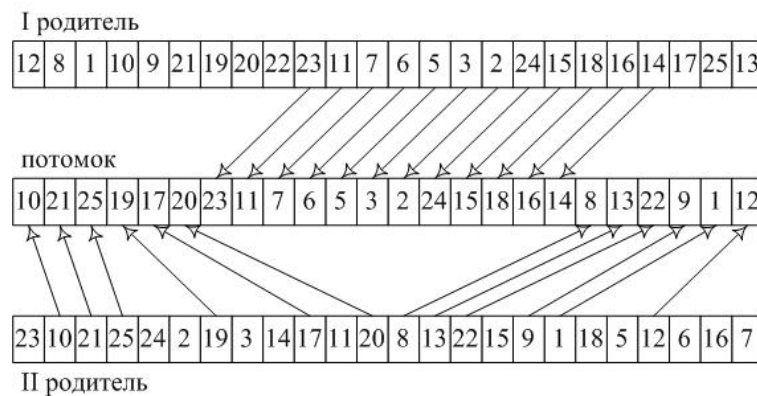


Рис. 4

При использовании упорядоченного оператора кроссинговера у первого родителя случайным образом выбираются две разрезающие точки, отстоящие друг от друга на половину длины хромосомы, после чего средний сегмент первого родителя, расположенный между разрезающими точками, передается потомку со случайным сдвигом влево или вправо. Остальные позиции берутся у второго родителя в упорядоченном виде слева направо, исключая элементы первого родителя. Сдвиг выбранной части хромосомы первого родителя обеспечивает эффективное изменение времени соответствующих переходов между объектами, что в силу нестационарности может значительно изменить их длину в ту или иную сторону. При классической постановке задачи выполнение сдвига не приводит к повышению эффективности работы алгоритма.

Оператор мутации реализован следующим образом: в решении случайным образом выбирается последовательность вершин и перемещается на случайное число позиций влево или вправо. Полученное таким образом новое решение добавляется к популяции. Всего мутации подвергаются 10 % случайно выбранных решений в популяции.

Оператор рекомбинации в данном алгоритме является модифицированным оператором редукции. Его действие заключается в устранении повторяющихся решений из популяции, а затем — в сокращении популяции до исходных пределов. При этом все лучшие решения сохраняются.

Критерием окончания расчета служит достижение нужного количества поколений. Обычно размер популяции и количество поколений до окончания счета зависят от размерности задачи. В данном случае размер популяции был выбран равным  $8N$ , где  $N$  — количество заявок, а количество поколений —  $10N$ .

Значение целевой функции рассчитывается по формуле:

$$f = m \left( \frac{\sum_{i=1}^k c_i}{k} \right) + n \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^k d_{(i-1)i}(t_{i-1})}{t_k + d_{k0}(t_k)} \right), m = n = 1.$$

Для проверки эффективности этого алгоритма была разработана программа, написанная на языке Pascal, в среде Delphi 7.0. Программа выполнялась на ПЭВМ, оснащенной процессором AMD Athlon 2500+ с 1 Гб оперативной памяти под управлением ОС Windows XP. Результаты ее работы показывают, что планирование суточного эксперимента при пятнадцатиминутном времени наблюдения объекта может быть осуществлено за  $\approx 45$  мин. Таким образом, можно сделать вывод, что использование разработанного генетического алгоритма для решения задачи планирования эксперимента РСДБ является достаточно эффективным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кофман А. Введение в прикладную комбинаторику. М.: Наука, 1975.
2. Канцедал С. А. Дискретная математика. М.: Форум—Интра-М, 2007.
3. Рогов А. Е. Генетический алгоритм оперативного планирования работы космического радиотелескопа // Естественные и технические науки. 2008. № 2. С. 406—413.
4. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003.

#### *Сведения об авторе*

**Алексей Евгеньевич Рогов**

— канд. техн. наук; Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения, Москва; начальник сектора;  
E-mail: niikp@list.ru

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию  
15.03.10 г.

Н. Ф. БАХАРЕВА

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАФИКА В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ ПОТОКОВ СОБЫТИЙ

На основе математических моделей агрегирования и разрежения потоков событий получены уравнения равновесия потоков, которые описываются на уровне двух первых моментов распределений времени между событиями в них. Полученные уравнения позволяют декомпозировать сетевые модели на отдельные узлы и рассчитывать их характеристики.

*Ключевые слова:* характеристики распределения потоков, математическое мультиплексирование и демультимплексирование потоков, аппроксимация законов распределений и потоков, уравнения равновесия потоков в сетевых моделях.

**Введение.** Задача анализа производительности сети заключается в определении всех основных узловых и сетевых характеристик. Для ее решения модель задачи должна быть предварительно декомпозирована на отдельные узлы с последующим вычислением характеристик входных и выходных потоков в каждом узле. Далее могут быть вычислены узловые и сетевые характеристики.

В настоящее время не существует аналитических методов для точного определения характеристик потоков в сетевых моделях при произвольных законах распределения времени поступления и обслуживания.

**Постановка задачи и подход к ее решению.** Пусть имеется открытая сетевая модель с матрицей вероятности передач  $\mathbf{P}=\{p_{ij}\}$ ,  $i, j = 1, \dots, n$ , где  $p_{ij}$  — вероятность того, что заявка, покидающая узел  $S_i$ , поступит в узел  $S_j$ . Для начала пусть узел представляет собой одноканальную (многоканальную с равновозможным доступом) систему  $GI/G/1$  с бесконечной очередью. Для этой системы определены числовые характеристики случайного времени обслуживания:  $\bar{\tau}_{\mu_i}$  — среднее значение времени обслуживания,  $D_{\mu_i}$  — его дисперсия. Для внешнего потока задана совокупность средних значений  $\bar{\tau}_{0_i}$  и дисперсий  $D_{0_i}$  времени между соседними заявками  $\mu$  рекуррентного потока, входящего в узел  $S_i$ . В последующем узел может быть представлен как система массового обслуживания (СМО) с конечной очередью с потерями, а также с конечной очередью без потерь.

Для декомпозиции такой модели на уровне средних значений и дисперсий времени поступления и обслуживания заявок не существует точных методов. Во многих случаях (см., например, работы [1, 2]) пользуются только уравнениями равновесия потоков с учетом их интенсивности  $\lambda_i$ . Такой подход при произвольных потоках в сети массового обслуживания означает описание случайного потока событий только его средним значением, т.е. математическим ожиданием без учета моментов высшего порядка. Как известно, случайный процесс на практике чаще всего определяется такими характеристиками, как математическое ожидание,

дисперсия и ковариационная функция. Поэтому учет дисперсий (вторых моментов распределений) интервалов времени существенно может улучшить результаты расчетов. Описание потоков на уровне двух первых моментов распределения интервалов времени означает их аппроксимацию непрерывным диффузионным процессом с соответствующими характеристиками [1, 3, 4] либо аппроксимацию законов их распределения известными функциями.

Решением системы уравнений равновесия потоков относительно интенсивности  $\lambda_i$  потоков на входе и выходе каждой системы массового обслуживания сети определяем средние значения интервалов времени между соседними заявками  $\bar{\tau} = \lambda_i^{-1}$  для каждого потока в сети:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} + \sum_{j=1}^n p_{ji} \lambda_j, i = 1, \dots, n, \tag{1}$$

где  $\lambda_{0i}$  — интенсивность потока в  $i$ -й узел.

Из уравнений (1) следует, что на вход  $i$ -го узла в общем случае поступает агрегированный поток (знак суммы) из разреженных потоков (произведение интенсивности на вероятность переходов) с выходов других узлов. В связи с этим подробнее рассмотрим математические операции агрегирования (мультиплексирования) двух потоков и их разрежения (демультиплексирования). При этом в качестве математической модели потока рассматриваем случайный поток событий на оси времени.

**Математическая модель мультиплексирования потоков.** Предварительно докажем следующее утверждение.

**Утверждение 1.** Функция распределения интервала времени  $\tau_\Sigma$  результирующего потока при мультиплексировании двух потоков с интенсивностью  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  определяется интегральным соотношением:

$$F_{\tau_\Sigma}(t) = 1 - \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left\{ [1 - F_{\tau_1}(t)] \int_t^\infty [1 - F_{\tau_2}(u)] du + [1 - F_{\tau_2}(t)] \int_t^\infty [1 - F_{\tau_1}(u)] du \right\}, \tag{2}$$

где  $F_{\tau_j}(t)$  — функция распределения интервалов времени между событиями в потоке  $j$  ( $j=1, 2$ ).

*Доказательство.* На рис. 1, 2 приведены схемы математического мультиплексирования двух потоков ( $\Pi$ ), т.е. получения результирующего потока.

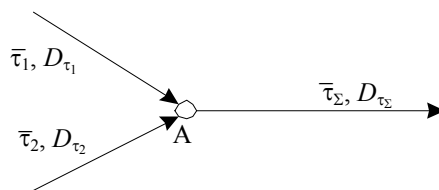


Рис. 1

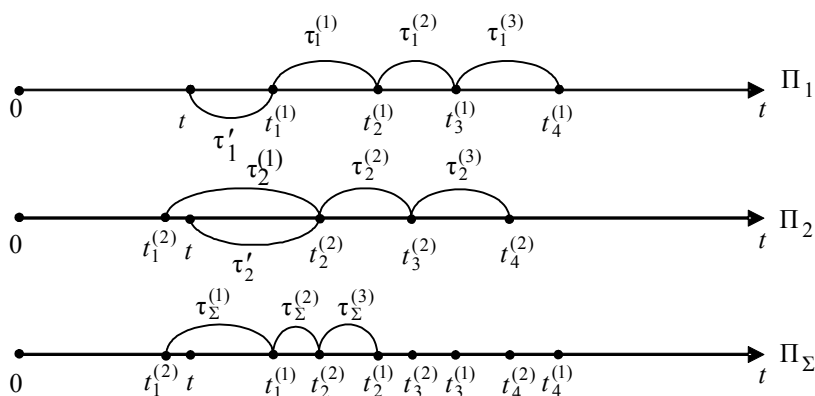


Рис. 2

Введем в рассмотрение следующие события:  $A$  — за время  $t$  в суммарном потоке не появится очередное событие ( $\tau_\Sigma > t$ );  $A_j$  — непоявление события в  $j$ -м потоке за время  $t$  ( $\tau_j > t$ ),  $j=1, 2$ . Кроме того, рассмотрим *остаточное время*  $\tau'_j$  ( $j=1, 2$ ), т.е. время от момента  $t$  до возникновения очередного события в потоке  $j$  (рис. 2). Для непоявления события ( $A/A_1$ ) достаточно вместо условия  $\tau_2 > t$  выполнения условия  $\tau'_2 > t$ . Аналогично для непоявления события ( $A/A_2$ ) достаточно выполнения условия  $\tau'_1 > t$ . Тогда интересующее нас событие  $A$ , т.е.  $\tau_\Sigma > t$ , распадается на два несовместных события.

1. Остаточное время  $\tau'_2$  больше  $t$  ( $\tau'_2 > t$ ) при условии непоявления очередного события в потоке  $\Pi_1$  за время  $(0, t)$ , т.е. при  $\tau_1 > t$ . Вероятность этого равна  $p(\tau'_2 > t)p(\tau_1 > t)\lambda_1/\lambda_\Sigma$ . Этот случай показан на рис. 2.

2. Остаточное время  $\tau'_1$  больше  $t$  ( $\tau'_1 > t$ ) при условии непоявления очередного события в потоке  $\Pi_2$  за время  $(0, t)$ , т.е. при  $\tau_2 > t$ . Вероятность этого равна  $p(\tau'_1 > t)p(\tau_2 > t)\lambda_2/\lambda_\Sigma$ .

Из математической теории надежности известно [5], что функция распределения для остаточного времени  $\xi$  жизни элемента, т.е. вероятность безотказной работы элемента на интервале времени  $(t, t + \tau)$ , до очередного отказа определяется как

$$p(\xi > \tau) = \frac{1}{T_0} \int_\tau^\infty [1 - F_\tau(t)] dt,$$

где  $T_0 = 1/\lambda$  — среднее время жизни элемента. Применительно к нашему случаю это будет вероятность

$$p(\tau'_j > t) = \lambda_j \int_t^\infty [1 - F_{\tau_j}(u)] du.$$

Тогда интересующая нас вероятность события  $p(\tau_\Sigma > t)$  по формуле полной вероятности может быть записана в виде

$$p(\tau_\Sigma > t) = p(\tau_1 > t)p(\tau'_2 > t)\lambda_1/\lambda_\Sigma + p(\tau_2 > t)p(\tau'_1 > t)\lambda_2/\lambda_\Sigma, \quad (3)$$

где  $\lambda_\Sigma = \lambda_1 + \lambda_2$ , а  $\lambda_j/\lambda_\Sigma$  представляет собой долю  $j$ -го потока в результирующем. Утверждение 1 доказано.

Теперь, используя функцию распределения (2), можно определить среднее значение  $\tau_\Sigma$  и дисперсию его распределения. Как известно из [5], средние значения интервалов между событиями в потоках равны:  $\bar{\tau}_1 = g_1(0)$ ,  $\bar{\tau}_2 = g_2(0)$ :

$$g_1(t) = \int_t^\infty [1 - F_1(u)] du \quad g_2(t) = \int_t^\infty [1 - F_2(u)] du. \quad (4)$$

Функции  $g_1(0)$ ,  $g_2(0)$  равны соответствующим средним значениям интервалов времени в потоках. Несложно показать, что функция плотности распределения вероятности будет следующей:

$$f_{\tau_\Sigma}(t) = F'_{\tau_\Sigma}(t) = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_\Sigma} [g_1(t)g_2(t)]''.$$

Математическое ожидание, т.е. среднее значение интервала между событиями в результирующем потоке, будет следующим:

$$\bar{\tau}_\Sigma = \int_0^\infty t f_{\tau_\Sigma}(t) dt = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty t [g_1(t)g_2(t)]'' dt = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_\Sigma} t [g_1(t)g_2(t)]' \Big|_0^\infty - \int_0^\infty [g_1(t)g_2(t)]' dt = \frac{1}{\lambda_\Sigma}, \quad (5)$$

что подтверждает справедливость выражения (2).

Определим теперь второй начальный момент распределения интервала  $\tau_\Sigma$  для вычисления дисперсии этой случайной величины:

$$M(\tau_\Sigma^2) = \int_0^\infty t^2 f_\Sigma(t) dt = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty t^2 [g_1(t) g_2(t)]'' dt = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty g_1(t) g_2(t) dt. \quad (6)$$

Тогда дисперсия времени между событиями в результирующем потоке

$$D(\tau_\Sigma) = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty g_1(t) g_2(t) dt - \frac{1}{\lambda_\Sigma^2}. \quad (7)$$

Из выражения (7) вытекают два важных следствия.

1. Под интегралом в выражении (6) стоит произведение двух функций, таким образом, в общем случае дисперсию величины  $\tau_\Sigma$  — интервала времени между событиями результирующего потока — нельзя выразить в виде элементарной функции от дисперсий и математических ожиданий составляющих (кроме случая пуассоновских потоков). Таким образом, дисперсия и моменты высших порядков распределения величины  $\tau_\Sigma$  в этом случае неразложимы.

2. Этот интеграл можно вычислить только при конкретных функциях распределения  $F_j(t)$ . Тогда, в условиях неполной информации о потоках, остается единственно возможный путь для его вычисления через элементарные функции — это аппроксимация функций распределения  $F_{\tau_i}(t)$ ,  $i=1, 2$ , на уровне двух первых моментов распределения интервалов времени. Таким образом, будем считать, что исходные потоки в сетевых моделях определены на уровне средних значений  $\bar{\tau}_j$  и дисперсий  $D_{\tau_j}$  распределения интервалов, и функции распределения  $F_j(t)$  будем аппроксимировать по отдельности при  $c_{\lambda_j} \leq 1$  и  $c_{\lambda_j} > 1$  ( $j=1, 2$ ).

В качестве примера возьмем два экспоненциально распределенных потока с параметрами  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :  $F_1(t) = 1 - e^{-\lambda_1 t}$ ,  $F_2(t) = 1 - e^{-\lambda_2 t}$ . Тогда по формуле (5) дисперсия величины  $\tau_\Sigma$  будет следующей:  $D_{\tau_\Sigma} = 1/\lambda_\Sigma^2$ . Это означает, что при мультиплексировании потоков, распределенных по экспоненциальному закону, снова получается пуассоновский поток.

**Определение неизвестных параметров аппроксимирующих функций распределения.** В качестве функции распределения в случае  $c_{\lambda_j} < 1$  рассмотрим смещенное экспоненциальное распределение, а в случае  $c_{\lambda_j} > 1$  — гиперэкспоненциальное.

Функция распределения в первом случае

$$F_j(t) = \begin{cases} 0, & t \leq \tau_{j1}, \\ 1 - \exp\{-(t - \tau_{j1})/\tau_{j2}\}, & t \geq \tau_{j1}, \end{cases} \quad (8)$$

а во втором

$$F_j^*(t) = 1 - p_j \exp(-2p_j t/\tau_j) - (1 - p_j) \exp[-2(1 - p_j)t/\tau_j]. \quad (9)$$

Теперь возникает задача определения неизвестных параметров соотношений (8) и (9). Для этого определяем функции  $g_j(t)$ ,  $j=1, 2$ , из выражений (4) через функции (8) и (9), в зависимости от величин  $c_{\lambda_j}$ .

Если при этом один поток будет иметь коэффициент вариации меньше единицы, а другой — больше единицы, то в таком случае функции  $g_j(t)$ , очевидно, будут скомбинированы из выражений (8) и (9). Параметры искомым аппроксимирующих функций распределения (8) и (9) подберем, используя метод моментов, приравняв первые два их момента к соответствующим моментам  $\bar{\tau}_j$  и  $D_{\tau_j}$  распределения исходных потоков. Математическое ожидание



и дисперсия случайной величины, распределенной по закону (8), соответственно равны:  $\bar{\tau}_j^* = \tau_{j1} + \tau_{j2}$ ,  $D_{\tau_j}^* = \tau_{j2}^2$  ( $j=1,2$ ). Используя метод моментов, найдем параметры функции распределения (8):

$$\tau_{j1} = \bar{\tau}_j - \sqrt{D_{\tau_j}}, \quad \tau_{j2} = \sqrt{D_{\tau_j}}. \quad (10)$$

Те же операции аналогичным образом проделаем с функцией распределения (8). Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по этому закону, соответственно равны:  $\bar{\tau}_j^* = \tau_j$ ,  $D_{\tau_j}^* = \tau_j^2[1/2p_j + 1/2(1-p_j)] - \tau_j^2$ . Теперь методом моментов найдем параметры этого распределения:

$$\tau_j = \bar{\tau}_j, \quad (11)$$

$$p_j = 1/2 \pm \sqrt{1/4 - \bar{\tau}_j^2 / [2(D_{\tau_j} + \bar{\tau}_j^2)]}. \quad (12)$$

Таким образом, параметры функций распределения  $F_j^*(t)$ , аппроксимирующих законы распределения  $F_j(t)$ , составляющих результирующего потока, полностью определены для всех случаев  $c_{\lambda_j} \leq 1$  и  $c_{\lambda_j} > 1$ . Тогда, подставив функции  $g_j(t)$ ,  $j=1, 2$ , с однозначно определенными их параметрами в выражение (7), и после вычисления всех интегралов можем определить дисперсию интервала времени мультиплексированного потока.

**Расчет дисперсии распределения величины  $\tau_\Sigma$ .** В формулу (6) подставим функции (4) с найденными ранее параметрами распределения (10). Тогда в случае  $\tau_{11} < \tau_{21}$  имеем

$$M(\tau_\Sigma^2) = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty g_1(t) g_2(t) dt = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \left\{ \int_0^{\tau_{11}} (\tau_{11} + \tau_{12} - t)(\tau_{21} + \tau_{22} - t) dt + \int_{\tau_{11}}^{\tau_{21}} \tau_{12}(\tau_{21} + \tau_{22} - t) \exp[-(t - \tau_{11})/\tau_{12}] dt + \int_{\tau_{21}}^\infty \tau_{12} \tau_{22} \exp[-(t - \tau_{11})/\tau_{12} - (t - \tau_{21})/\tau_{22}] dt \right\}. \quad (13)$$

В случае  $\tau_{11} > \tau_{21}$

$$M(\tau_\Sigma^2) = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \left\{ \int_0^{\tau_{21}} (\tau_{11} + \tau_{12} - t)(\tau_{21} + \tau_{22} - t) dt + \int_{\tau_{21}}^{\tau_{11}} \tau_{22}(\tau_{11} + \tau_{12} - t) \exp[-(t - \tau_{21})/\tau_{22}] dt + \int_{\tau_{11}}^\infty \tau_{12} \tau_{22} \exp[-(t - \tau_{11})/\tau_{12} - (t - \tau_{21})/\tau_{22}] dt \right\}. \quad (14)$$

В случае равенства значений  $\tau_{11} = \tau_{21}$  второй интеграл в выражениях (13) и (14) будет равен нулю. Обозначив интегралы в правых частях выражений (13) и (14) через  $I_1, I_2, I_3$ , запишем выражение для искомой дисперсии:

$$D(\tau_\Sigma) = M(\tau_\Sigma^2) - \frac{1}{\lambda_\Sigma^2} = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} (I_1 + I_2 + I_3) - \frac{1}{\lambda_\Sigma^2}. \quad (15)$$

Теперь те же операции выполним для случая гиперэкспоненциального распределения составляющих. Для этого функции  $g_j(t)$ , определяемые выражением (4) при законе распределения (9) с параметрами распределения (11) и (12), подставим в (7) и получим дисперсию

величины  $\tau_\Sigma$  при гиперэкспоненциальном распределении составляющих результирующего потока:

$$M(\tau_\Sigma^2) = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty g_1(t) g_2(t) dt = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \frac{\tau_1 \tau_2}{4} \left\{ \int_0^\infty \exp \left[ -2 \left( \frac{p_1}{\tau_1} + \frac{p_2}{\tau_2} \right) t \right] dt + \int_0^\infty \exp \left[ -2 \frac{p_1}{\tau_1} \left( \frac{2(1-p_2)}{\tau_2} \right) t \right] dt + \int_0^\infty \exp \left[ -2 \left( \frac{2(1-p_1)}{\tau_1} + \frac{p_2}{\tau_2} \right) t \right] dt + \int_0^\infty \exp \left[ -2 \left( \frac{2(1-p_1)}{\tau_1} + \frac{2(1-p_2)}{\tau_2} \right) t \right] dt \right\}. \quad (16)$$

Обозначив интегралы в правой части (16) через  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , запишем выражение для дисперсии:

$$D_{\tau_\Sigma} = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} (I_1' + I_2' + I_3' + I_4') - \frac{1}{\lambda_\Sigma^2}. \quad (17)$$

Теперь рассмотрим последний случай, когда одна составляющая результирующего потока имеет коэффициент вариации  $c_{\lambda_j} < 1$ , а вторая —  $c_{\lambda_j} > 1$ . Не умаляя общности, в качестве функции  $g_1(t)$  возьмем соотношение (8), а в качестве функции  $g_2(t)$  — (9) с известными уже параметрами. Тогда, подставив эти функции в (7), получим

$$M(\tau_\Sigma^2) = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} \int_0^\infty g_1(t) g_2(t) dt = \int_0^{\tau_{11}} \{ (\tau_{11} + \tau_{12} - t) [\exp(-2p_2 t / \tau_2) + \exp(-2(1-p_2)t / \tau_2)] (\tau_2 / 2) \} dt + \int_{\tau_{11}}^\infty \{ \tau_{12} \exp[-(t - \tau_{11}) / \tau_{12}] [\exp(-2p_2 t / \tau_2) + \exp(-2(1-p_2)t / \tau_2)] (\tau_2 / 2) \} dt. \quad (18)$$

Отсюда, обозначив интегралы в правой части (18) через  $I_1''$  и  $I_2''$ , запишем выражение для искомой дисперсии

$$D_{\tau_\Sigma} = 2 \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_\Sigma} (I_1'' + I_2'') - \frac{1}{\lambda_\Sigma^2}. \quad (19)$$

Таким образом, используя полученные соотношения (15), (17) и (19), в зависимости от коэффициентов вариаций составляющих потока, можно определить дисперсию результирующего потока указанным способом.

Исследование точности полученных формул с помощью имитационного моделирования на широком классе законов распределения показало, что формулы (15) и (17) обеспечивают приемлемые результаты. В то же время точность аппроксимации выражением (19) хуже, чем с использованием полученной в [5] формулы:

$$D_{\tau_\Sigma} = (\lambda_1 / \lambda_\Sigma)^3 D_{\tau_1} + (\lambda_2 / \lambda_\Sigma)^3 D_{\tau_2}. \quad (20)$$

В табл. 1 приведены некоторые результаты сравнения формул (17), (19) и (20) с имитационным моделированием (генерировалось 10 000 случайных интервалов в каждом потоке). В таблице  $\bar{\tau}$  и  $D_\tau$  — теоретические моменты,  $\bar{\tau}^*$  и  $S_\tau^2$  — соответствующие статистические оценки, строка № 1 — законы распределения — равномерные (0,1),  $c_{\lambda_j} < 1$ , использована формула (18); 2 — законы распределения — равномерный (0,1) и экспоненциальный с  $\lambda=2$ , использована формула (18); 3 — законы распределения — экспоненциальные с  $\lambda=2$ , использована формула  $D_{\tau_\Sigma} = 1/\lambda_\Sigma^2$ ; 4 — законы распределения — гиперэкспоненциальный с функцией плотности

$f(t) = (2p^2 / \tau) \exp\{-2pt / \tau\} + [2(1 - p)^2 / \tau] \exp\{-2(1 - p)t / \tau\}$ , где  $p=0,8873$ ,  $\tau=1,0$ ,  $c_{\lambda_1} = 2$ , и равномерный  $(0,2)$ ,  $c_{\lambda_2} < 1$ , использована формула (19); 5 — законы распределения — гиперэкспоненциальные с функцией плотности  $f(t) = (2p^2 / \tau) \exp\{-2pt / \tau\} + [2(1 - p)^2 / \tau] \exp\{-2(1 - p)t / \tau\}$ , где  $p=0,8873$ ;  $\tau=1,0$ ;  $c_{\lambda_j} = 2$ , использована формула (20); 6 — законы распределения — Вейбулла с функцией плотности  $f(t) = \beta^{-\alpha} t^{\alpha-1} e^{-t/\beta} / \Gamma(\alpha)$  с  $\alpha = 0,5427$ ;  $\beta = 1$ ;  $c_{\lambda_j} = 2$ , использована формула (20). Как видно из табл. 1, все результаты, кроме первого случая с равномерными законами, укладываются в статистическую погрешность 5 %.

Таблица 1

№	$\bar{\tau}_1 / \bar{\tau}_1^*$	$D_{\tau_1} / S_{\tau_1}^2$	$\bar{\tau}_2 / \bar{\tau}_2^*$	$D_{\tau_2} / S_{\tau_2}^2$	$\bar{\tau}_\Sigma / \bar{\tau}_\Sigma^*$	$D_{\tau_\Sigma} / S_{\tau_\Sigma}^2$
1	0,500/0,499	0,083/0,083	0,5/0,5	0,083/0,083	0,25/0,25	0,021/0,037
2	0,500/0,499	0,083/0,084	0,500/0,497	0,250/0,247	0,250/0,248	0,042/0,046
3	0,5/0,5	0,250/0,251	0,500/0,499	0,250/0,249	0,250/0,253	0,0625/0,0628
4	1,000/1,001	4,000/3,996	1,000/0,996	0,333/0,333	0,5/0,5	0,204/0,246
5	1,000/1,023	4,000/4,026	1,000/1,011	4,000/4,012	0,500/0,502	1,000/1,013
6	1,738/1,720	12,09/12,20	1,738/1,730	12,09/12,42	0,869/0,867	3,02/2,86

**Математическая операция разрежения потока и вывод уравнений равновесия потоков в сетевых моделях.** Рассмотрим теперь задачу вероятностного разрежения (просеивания) потоков.

**Утверждение 2.** Пусть имеется точка демультиплексирования потока (точка В на рис. 3), в которой заявки с вероятностью  $p$  уходят из потока („просеянный“ поток  $\Pi_2$  на рис. 3). Назовем эту операцию с потоком  $p$ -преобразованием. Тогда среднее значение и дисперсия времени между соседними событиями в „просеянном“ потоке

$$\bar{\tau}_p = \bar{\tau} / p, \tag{21}$$

$$D_{\tau_p} = D_\tau / p + \bar{\tau}^2 (1 - p) / p^2. \tag{22}$$

*Доказательство.* Представим поток событий с параметрами  $(\bar{\tau}, D_\tau)$ , где  $\bar{\tau}, D_\tau$  — среднее значение и дисперсия времени между соседними событиями, как последовательность случайных точек  $\{t_i\}$  на оси времени. Случайные интервалы времени между ними обозначим соответственно через  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$ . При разрежении  $\Pi_1$  случайный интервал времени в  $\Pi_2$  —  $\tau_p$  равен:  $\tau_1$  — с вероятностью  $p$ ;  $(\tau_1 + \tau_2)$  — с вероятностью  $pq$ ;  $(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)$  — с вероятностью  $pq^2, \dots, (\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_i)$  — с вероятностью  $pq^{i-1}$  и т.д.

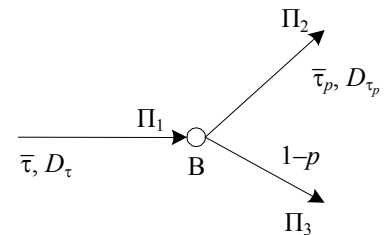


Рис. 3

Здесь вероятность  $q=1 - p$ . Заметим, что  $p$ -преобразование потока является его разрежением по случайному закону, в отличие от детерминированного „просеивания“ при получении потока Эрланга из простейшего потока.

Определим математическое ожидание величины  $\tau_p$  с учетом того факта, что поток рекуррентный, т.е.  $M(\tau_i) = M(\tau)$ ,  $M(\tau_i^2) = M(\tau^2)$ :

$$\begin{aligned} M(\tau_p) &= M(\tau) p \sum_{i=1}^{\infty} i q^{i-1} = p M(\tau) \frac{d}{dq} (q + q^2 + q^3 + \dots) = p M(\tau) \frac{d}{dq} \frac{q}{1 - q} = \\ &= p M(\tau) \frac{1}{(1 - q)^2} = M(\tau) / p. \end{aligned}$$

Для определения дисперсии  $D_{\tau_p}$  вычислим второй начальный момент  $M(\tau_p^2)$ :

$$\begin{aligned} M(\tau_p^2) &= p \sum_{k=1}^{\infty} \left[ kM(\tau^2) + (k^2 - k)(M(\tau))^2 \right] q^{k-1} = p \sum_{k=1}^{\infty} [kD_{\tau} + k^2(M(\tau))^2] q^{k-1} = \\ &= pD_{\tau} \sum_{k=1}^{\infty} kq^{k-1} + p(M(\tau))^2 \sum_{k=1}^{\infty} k^2 q^{k-1} = D_{\tau} / p + (1+q)(M(\tau))^2 / p^2. \end{aligned}$$

Из полученных соотношений для  $M(\tau^2)$  и  $M(\tau_p)$  следует справедливость выражений (21) и (22). Утверждение 2 доказано.

**Следствие.** Полученное из формул (21) и (22) выражение для квадрата коэффициента вариации просеянного потока  $c_p^2 = pc^2 + q$  позволяет судить о характере распределения этого потока. Как видно из последнего выражения, разрежение ( $p$ -преобразование) исходного потока существенно влияет на его закон распределения. При этом для пуассоновского потока его свойство сохраняется.

**Замечание.** Для проверки справедливости выражений (21) и (22) также использовалось имитационное моделирование. Случайные интервалы генерировались по экспоненциальному, равномерному и нормальному законам распределения (число испытаний 10 000). Результаты имитационного моделирования, приведенные в табл. 2, полностью подтверждают справедливость утверждения 2 для любых законов распределения: строка № 1 — закон распределения — экспоненциальный с  $\lambda=2$ ,  $p=0,2$ ,  $q=0,8$ ; 2 — закон распределения — экспоненциальный с  $\lambda=0,5$ ,  $p=0,2$ ,  $q=0,8$ ; 3 — закон распределения — равномерный с  $a=1$ ,  $b=3$ ,  $p=0,2$ ,  $q=0,8$ ; 4 — закон распределения — нормальный с  $m_{\tau}=2$ ,  $\sigma_{\tau}=0,5$ ,  $p=0,2$ ,  $q=0,8$ ; 5 — закон распределения — Вейбулла с  $\alpha = 0,5427$ ,  $\beta = 1$ , коэффициент вариации  $c_{\lambda} = 2$ ,  $p=0,2$ ,  $q=0,8$ ; 6 — закон распределения — Вейбулла с  $\alpha = 0,3487$ ,  $\beta = 1$ , коэффициент вариации  $c_{\lambda} = 4$ ,  $p=0,2$ ,  $q=0,8$ . Следовательно, формулы (21) и (22) в отличие от формул вычисления дисперсии результирующего потока, являются точными. Относительная погрешность моделирования здесь также не превышает 5 %.

Таблица 2

№	$\bar{\tau} / \bar{\tau}^*$	$D_{\tau} / S_{\tau}^2$	$\bar{\tau}_p / \bar{\tau}_p^*$	$D_{\tau_p} / S_{\tau_p}^2$	$\bar{\tau}_q / \bar{\tau}_q^*$	$D_{\tau_q} / S_{\tau_q}^2$
1	0,500/0,498	0,250/0,249	2,500/2,491	6,250/6,121	0,625/0,622	0,390/0,389
2	2,00/2,01	4,00/4,01	10,00/9,96	100,00/99,33	2,50/2,51	6,250/6,308
3	2,000/2,001	0,333/0,333	10,00/9,99	81,67/84,23	2,50/2,51	1,666/1,703
4	2,000/1,993	0,250/0,249	10,00/9,98	80,25/80,59	2,500/2,497	38,75/38,26
5	1,740/1,754	12,09/11,88	8,69/8,55	120,85/121,34	2,170/2,207	16,05/15,88
6	5,095/5,240	415,25/422,09	25,48/25,90	2595,4/2670,8	6,37/6,54	527,17/546,51

**Определение дисперсии распределения интервалов между событиями в выходных потоках узлов.** Прежде чем перейти к выводу уравнений равновесия потоков относительно их дисперсий, вернемся к структуре узла сетевой модели (рис. 1), из которой видно, что на вход  $i$ -го узла в общем случае поступает агрегированный поток из разреженных потоков с выходов других узлов. Для этого необходимо знать дисперсии распределения интервалов между событиями в выходных потоках. Для этого воспользуемся результатами [4].

**Утверждение 3.** Пусть  $\bar{\tau}_{\text{вых}}, D_{\text{вых}}, \bar{\tau}_{\mu}, D_{\mu}$  — соответственно средние значения и дисперсии времени между заявками в выходном потоке из СМО  $GI/G/1/\infty$  и обслуживания. Тогда справедливы следующие аналитические выражения для определения  $\bar{\tau}_{\text{вых}}, D_{\text{вых}}$ :

$$\bar{\tau}_{\text{вых}} = \bar{\tau}_{\mu} + p'_0 \bar{\tau}'_{\lambda}, \quad (23)$$

$$D_{\text{вых}} = D_{\mu} + p'_0 D'_{\lambda} + p'_0 (1 - p'_0) (\bar{\tau}'_{\lambda})^2, \quad (24)$$

где  $p'_0$  — вероятность того, что обслуженная заявка оставляет СМО пустой,  $\bar{\tau}'_{\lambda}$  и  $D'_{\lambda}$  — среднее значение и дисперсия остаточного времени  $\tau'_{\lambda}$ , в течение которого СМО ожидает поступления непосредственно следующей заявки, т.е. времени простоя СМО.

Теперь, по аналогии с уравнениями равновесия потоков на уровне их средних значений (1), можно записать уравнения равновесия относительно их дисперсий:

$$D_{i\text{вх}} = D(\Pi_{0i} (\Pi_1 \times \dots \times (\Pi_{n-1} \Pi_n))) . \quad (25)$$

Здесь  $D(\Pi_{j-1} \Pi_j)$  — дисперсия попарно мультиплексируемых выходных потоков  $\Pi_{j-1}$  и  $\Pi_j$  от  $(j-1)$ -го и  $j$ -го узлов, поступающих на вход  $i$ -го узла после их  $p$ -преобразования с дисперсиями (см. формулу (22)):

$$D_{\Pi_j} = \frac{1}{p_{ji}} (D_{j\text{вых}} + \frac{1 - p_{ji}}{p_{ji} \lambda_j^2}), \quad i, j=1, 2, \dots, n. \quad (26)$$

Вычислить эти дисперсии можно с помощью соотношений (15), (17) и (20) в зависимости от значений коэффициентов вариаций составляющих. В уравнениях (25) параметр  $D_{0i} = D(\Pi_{0i})$  означает дисперсию времени в потоке  $\Pi_{0i}$  от внешнего источника, поступающего на вход  $i$ -го узла. Тогда решение уравнений (1), (25) совместно (26) и (24) позволяет декомпозировать сетевую модель на отдельные узлы на уровне двух первых моментов распределения потоков для последующего расчета их характеристик.

Полученные математические результаты по математическому мультиплексированию двух различных потоков реализованы в виде процедуры `Multipl (el1, el2, dv1, dv2, dmu, er)`, где входные параметры `el1, el2, dv1, dv2` — соответственно интенсивность  $\lambda_1, \lambda_2$  и дисперсия  $D_{\tau_1}, D_{\tau_2}$  двух агрегируемых потоков. Выходные параметры `dmu, er` — соответственно дисперсия результирующего потока  $D_{\tau_{\Sigma}}$  и код ошибки. Данная процедура входит в программную систему. Алгоритм работы программной системы анализа производительности компьютерных сетей на основе аппроксимационного подхода включает следующие этапы.

1. Сеть массового обслуживания считаем экспоненциальной и, решив систему уравнений (1), определяем интенсивность потоков на входе и выходе каждого узла. Следовательно, будут определены средние значения и дисперсии интервалов времени в потоках на входе и выходе каждого узла.

2. Используем метод двумерной диффузионной аппроксимации процессов функционирования систем массового обслуживания и уточняем дисперсии входных и выходных потоков по формуле (25) совместно с соотношениями (24) и (26).

3. Определяем все основные узловые и сетевые характеристики.

**Заключение.** В классической литературе по теории массового обслуживания недостаточно внимания уделено вычислению моментных характеристик мультиплексированных (агрегированных) и демультиплексированных (разреженных) потоков. Например, в монографии [6] приводятся формулы для дисперсии результирующего потока в случае предельного пуассоновского потока, а разреженного — в случае потоков Пальма. Следует заметить, что приведенные в настоящей работе результаты справедливы для любых стационарных потоков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Пер. с англ.; под ред. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1979. 597 с.
2. Вишневецкий В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. М.: Техносфера, 2003. 512 с.
3. Гнеденко Б.В. и др. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
4. Кругликов В. К., Тарасов В. Н. Анализ и расчет сетей массового обслуживания с использованием двумерной диффузионной аппроксимации // Автоматика и телемеханика. 1983. № 8. С. 74—83.
5. Бахарева Н. Ф., Тарасов В. Н. Организация интерактивной системы вероятностного моделирования стохастических систем // Изв. Самарского научного центра РАН. 2003. № 1. С. 119—126.
6. Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1969. 324 с.

*Сведения об авторе*

**Надежда Федоровна Бахарева** — канд. техн. наук, доцент; Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, кафедра программного обеспечения и управления в технических системах, Самара;  
E-mail: vt@ist.psati.ru

Рекомендована кафедрой  
программного обеспечения и  
управления в технических системах

Поступила в редакцию  
20.01.10 г.

УДК 519.1

В. Т. ТОЗИК

## МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ СЕТЕЙ

Предложен математический аппарат для анализа свойств сетевых структур. В основу положена модель сети, базирующаяся на алгебре кубических комплексов. Это позволяет предложить эффективную с точки зрения трудоемкости процедуру определения полного множества простых цепей в двухполюсных структурно сложных сетях.

**Ключевые слова:** *двухполюсная сеть, простая цепь, структурная функция, алгебра кубических комплексов.*

**Введение.** Задачи структурного анализа сетей возникают во многих приложениях теории графов: это и поиск кратчайших путей, и построение маршрутов сетевых перевозок с минимальной стоимостью, и анализ надежности информационно-вычислительных сетей, и распределение информационных потоков для последующей многопроцессорной обработки в вычислительных сетях. В основе решения многих вышеперечисленных задач лежат процедуры поиска полного множества простых цепей (и/или разрезов) в двухполюсных сетях. Эти задачи имеют экспоненциально возрастающую трудоемкость решения при использовании методов перебора.

В основу предлагаемого математического аппарата положена алгебраическая модель графа, использующая введенную Ротом алгебру кубических комплексов [1], что позволяет предложить достаточно эффективные с точки зрения трудоемкости процедуры определения простых цепей и разрезов. Представление структуры графа в виде множества кубов позволяет формализовать и автоматизировать процесс поиска простых цепей и разрезов с помощью соответствующих компьютерно-ориентированных алгоритмов, поскольку аппарат кубов эффективно отображается на структуру памяти и систему команд современных компьютеров.

В настоящей работе предлагается конструктивный (алгебраический) метод определения полного множества простых цепей с оценкой трудоемкости лучше квадратичной.

**Алгебра простых цепей**

**Определение 1.** Сетью  $G(V, E)$  называется связный граф без петель и кратных ребер [2].

Множество узлов  $V$  сети  $G$  имеет мощность  $w$  узлов, а множество ребер  $E$  сети — мощность  $z$  ребер. Множество всех элементов сети  $G$  имеет мощность  $n = w + z$ . В сети  $G$  выделяется пара узлов  $(\alpha, \beta)$ , называемых в дальнейшем полюсами.

**Определение 2.** Цепь  $K = (\alpha = v_1, e_2, v_3, \dots, e_{r-1}, v_r = \beta)$ , связывающая полюсы  $(\alpha, \beta)$  сети  $G$ , называется простой, если в последовательности узлов и ребер, по которым проходит цепь, все узлы различны [2]. Здесь  $v_i$  — обозначение  $i$ -го узла,  $e_s = (v_i, v_g)_s$  — обозначение  $s$ -го ребра сети.

**Определение 3.** Простым разрезом  $D$  сети  $G$  называется минимальное по включению множество элементов (узлов и ребер), удаление которых из сети делает несвязной пару полюсов  $(\alpha, \beta)$  сети [2].

Введем алгебру простых цепей сети  $G$ . Пусть задано множество простых цепей  $\tilde{A}^n = \{(v_1, e_2, v_3, \dots, e_{r-1}, v_r)\}$  сети  $G$  размерности  $n$ . Дадим на множестве простых цепей  $\tilde{A}^n$  определение двух операций. Первая является обычным теоретико-множественным объединением простых цепей и обозначается символом „ $\cup$ “, она обладает следующими свойствами:

- 1)  $K_j \cup K_s = K_s \cup K_j$  (коммутативность);
- 2)  $K_j \cup (K_s \cup K_t) = (K_j \cup K_s) \cup K_t$  (ассоциативность);
- 3) существует элемент  $O$  (пустое множество) такой, что  $K_j \cup O = O \cup K_j = K_j$ ;
- 4) если  $K_j, K_s \in \tilde{A}^n$ , то  $(K_j \cup K_s) \in \tilde{A}^n$  (замкнутость).

Вторую операцию — умножение простых цепей, обозначенную символом „ $\Delta$ “, — определим на множестве простых цепей  $\tilde{A}^n$  следующим образом. Пусть  $K_j = (v_1, e_2, v_3, \dots, v_r)$ ,  $K_s = (v_\gamma, e_{\gamma+1}, \dots, v_g)$  — простые цепи ( $K_j, K_s \in \tilde{A}^n$ ). Если  $v_r = v_\gamma, \forall_i \forall_\mu (v_i \neq v_\mu)$ , причем  $i = \overline{1, r-1}, \mu = \overline{\gamma+1, g}$ , то по определению 2:

$$K_t = (v_1, e_2, \dots, v_r) \Delta (v_\gamma, e_{\gamma+1}, \dots, v_g) = (v_1, e_2, \dots, v_r = v_\gamma, e_{\gamma+1}, \dots, v_g).$$

В противном случае  $K_t = \emptyset$ .

Можно легко показать, что вновь получаемая цепь  $K_t = K_j \Delta K_s$  удовлетворяет определению 2, т.е. является простой цепью ( $K_t \in \tilde{A}^n$ ), а операция  $\Delta$ -умножения — замкнутой операцией. Данная операция, позволяющая из двух простых цепей образовывать третью, обладает следующими свойствами:

- 1)  $K_j \Delta K_s \neq K_s \Delta K_j$  (некоммутативность);
- 2)  $K_j \Delta (K_s \Delta K_t) = (K_j \Delta K_s) \Delta K_t$  (ассоциативность);
- 3)  $K_j \Delta (K_s \cup K_t) = K_j \Delta K_s \cup K_j \Delta K_t$  (дистрибутивность);
- 4) существует единичный элемент 1 (цепь нулевой длины) такой, что  $K_j \Delta 1 = K_j$ .





предлагается использовать метод последовательного удаления  $\gamma$ -узлов из сети  $G(\gamma \neq \alpha, \beta)$ , аналогичный методу Гаусса, заключающемуся в последовательном исключении неизвестных из системы линейных уравнений.

**Утверждение 2.** В результате последовательного решения системы уравнений (1) получим полный класс простых цепей между парой узлов  $(\alpha, \beta)$  графа  $G$ .

Справедливость этого утверждения доказывается с помощью индуктивного вывода для предложенного метода последовательного удаления внутренних узлов, начиная с  $k = 0$  (исходная матрица смежности) и заканчивая  $k = w - 2$  внутренних узлов, относительно к полюсов  $\alpha, \beta$ .

Можно видеть, что разработанный математический аппарат позволяет решить задачу определения полного множества простых цепей между выделенной парой узлов  $(\alpha, \beta)$ . Теперь необходимо подобрать такую форму представления простых цепей, чтобы введенные операции („ $\cup$ “ и „ $\Delta$ “) легко отображались на структуру памяти и систему команд современных компьютеров для повышения эффективности процесса поиска простых цепей в графе.

**Булевы функции и алгебра кубов.** Структура двухполюсной сети может быть описана с помощью аппарата булевых функций следующим образом [3]. Предположим, что двухполюсная сеть может находиться только в двух состояниях: связности (существует по крайней мере одна простая цепь  $K_j$  между парой  $(\alpha, \beta)$  полюсов сети) или разреза (не существует ни одной простой цепи  $K_j$  между парой  $(\alpha, \beta)$  полюсов сети). Состояние сети, таким образом, может быть представлено булевой функцией

$$f_{\alpha\beta} = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

принимающей значение 1, если сеть находится в состоянии связности, и 0 — если несвязности (разреза). Здесь  $x_i$  — булева переменная, обозначающая состояние  $i$ -го элемента сети, причем  $x_i = 1$ , если  $i$ -й элемент находится в состоянии связности (работоспособности);  $x_i = 0$ , если  $i$ -й элемент несвязности (отказа).

В терминах теории потоков понятия „связности“ и „несвязности“ соответствуют понятиям „способен пропускать поток“ и „не способен пропускать поток“.

Каждой простой цепи ставится в соответствие конъюнктивный терм ранга  $r$

$$K_j = \bigwedge_{i=1}^r x_i^{\sigma_i}; \quad \forall_i (\sigma_i = 1), \quad (3)$$

который принимает значение 1, если все элементы цепи находятся в состоянии связности (работоспособности), и 0 — во всех остальных случаях. При этом в соотношение (3) все переменные  $x_i^{\sigma_i}$  входят в прямой (не инверсной) форме ( $\sigma_i = 1$ ).

Булева функция (2), в дальнейшем называемая структурной функцией (СФ) сети, может быть записана в дизъюнктивной нормальной форме (ДНФ) с помощью простых цепей (3):

$$f_{\alpha\beta} = \bigvee_{j=1}^m K_j = \bigvee_{j=1}^m \left[ \bigwedge_{i=1}^r x_i^{\sigma_i} \right], \quad (4)$$

где  $m$  — число простых цепей сети.

Число векторов состояний сети

$$l = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

на которых определена булева функция (2), равно  $2^n$ . Множество векторов состояний (5), обозначаемое  $L$ , разбивается на два непересекающихся подмножества:  $L_1$  — подмножество

состояний связности сети  $(f_{\alpha\beta} = 1)$  и  $L_0$  — подмножество состояний несвязности сети  $(f_{\alpha\beta} = 0)$ .

Чрезвычайно эффективным математическим аппаратом для представления и преобразования булевых СФ является алгебра кубов [1]. Множеству наборов значений аргументов функции  $f_{\alpha\beta}$  (множеству векторов состояний) ставится в соответствие множество  $L$  вершин  $n$ -мерного куба такое, что вершинам, относящимся к подмножеству  $L_1$ , соответствуют наборы аргументов, на которых  $(f_{\alpha\beta} = 1)$ , а вершинам, относящимся к подмножеству  $L_0$ , соответствуют наборы аргументов, на которых  $(f_{\alpha\beta} = 0)$ .

**Определение 4.** Куб  $C = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  размерности  $n$  есть  $n$ -мерный вектор, каждая координата которого  $a_i$  принимает значения из множества  $\{0, 1, X\}$ . Координаты  $a_i \in \{0, 1\}$  называются связанными,  $a_i = X$  — свободными.

Любая дизъюнктивная нормальная форма булевой СФ может быть представлена некоторым множеством кубов размерности  $n$ , причем каждая конъюнкция соответствует некоторому кубу. Если  $i$ -я переменная конъюнкции входит с инверсией  $(\sigma_i = 0)$ , то  $i$ -я координата куба имеет значение 0, если без инверсии  $(\sigma_i = 1)$  — 1, а в случае, если  $i$ -я переменная отсутствует в конъюнкции, то  $i$ -я координата куба является свободной (равна  $X$ ).

В дальнейшем множество всех кубов (комплекс кубов) размерности  $n$  будем обозначать  $S^n$ , подмножества комплекса кубов — буквой  $\Pi$  с различными индексами, а кубы — буквой  $C$  с различными индексами.

Так как булева СФ является полностью определенной, то для ее задания достаточно одного множества кубов: либо множества единичных кубов  $\Pi(L_1)$ , являющегося покрытием единичных наборов  $L_1$ , либо множества кубов  $\Pi(L_0)$ , покрывающего нулевые наборы  $L_0$ .

**Процедура поиска простых цепей.** ДНФ булевой СФ может быть поставлено в соответствие множество кубов  $\Pi(L_1)$ , покрывающих исходное множество единичных наборов  $L_1$ . Так как каждой простой цепи, соединяющей полюсы  $(\alpha, \beta)$ , поставлена в соответствие некоторая конъюнкция ДНФ булевой СФ  $f_{\alpha\beta}$ , то и каждый куб  $C_j \in \Pi(L^1)$  соответствует не только этой конъюнкции, но и простой цепи. Данное соответствие проиллюстрировано на рис. 1. Таким образом, задача нахождения всех простых цепей между парой узлов  $(\alpha, \beta)$  в

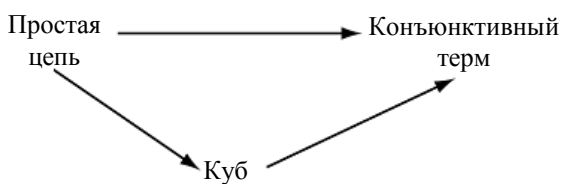


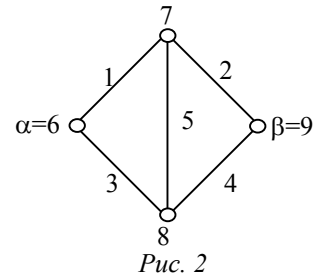
Рис. 1

графе  $G$  может быть сведена к задаче нахождения множества кубов  $\Pi(L^1) = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  посредством отображения множества простых цепей  $\tilde{A}^n$  на  $n$ -мерный кубический комплекс  $S^n$ . Устанавливаемое отображение является гоморфизмом алгебры

простых цепей на  $n$ -мерный кубический комплекс относительно введенных операций, так как для  $\forall K_j (K_j \rightarrow C_j), K_j \in \tilde{A}^n, C_j \in S^n$ , выполняются  $\cup(K_1, K_2, \dots, K_m) \rightarrow \cup(C_1, C_2, \dots, C_m)$  и  $\Delta(K_1, K_2, \dots, K_m) \rightarrow \Delta(C_1, C_2, \dots, C_m)$ . Это означает, что операции объединения простых цепей графа соответствует операция объединения кубов, которая также понимается в теоре-

тико-множественном смысле, а операции  $\Delta$ -умножения простых цепей графа соответствует операция  $\Delta$ -умножения кубов кубического комплекса.

Каждой простой цепи графа  $G$  с  $n$  элементами поставлен в соответствие некоторый куб комплекса  $S^n$  размерности  $n$  по следующему правилу. Элементам простой цепи (узлам и ребрам) поставлены в соответствие единичные компоненты куба в позициях, номера которых соответствуют номерам элементов простой цепи. Остальные компоненты куба остаются свободными. Так, например, простой цепи (6, 1, 7, 2, 9) графа  $G$  с 9 элементами (рис. 2) соответствует куб (11XXX11X1), а простой цепи единичной длины, состоящей из ребер 5, соответствует куб (XXXX1XXXX).



**Определение 5.** Результат операции  $\Delta$ -умножения двух кубов  $C_j = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  и  $C_s = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  определяется как

$$C_j \Delta C_s = \begin{cases} \emptyset, & \text{если } \exists i (a_i = 0 \vee b_i = 0 \vee a_i = b_i = 1); \\ (a_1 \Delta b_1, a_2 \Delta b_2, \dots, a_n \Delta b_n) & \text{— в противном случае, причем} \\ & a_i \Delta b_i = 1, \text{ если одна из координат имеет значение 1,} \\ & a_i \Delta b_i = X, \text{ если } a_i = b_i = X. \end{cases}$$

Можно видеть, что в результате попарного сравнения  $i$ -х компонентов кубов выявление непростых цепей происходит мгновенно ( $a_i = b_i = 1$ ).

Операции над кубами (объединение и  $\Delta$ -умножение) обладают теми же свойствами, что и операции над простыми цепями. Так как при поиске простых цепей предполагается, что они представлены в виде кубов, дадим определение исходного задания структуры сети — матрицы смежности в кубическом виде.

**Определение 6.** Кубической матрицей смежности  $A_w = \parallel a_{\eta\rho}^0 \parallel$  сети  $G(V, E)$  с  $w$  узлами называется  $(w \times w)$ -матрица, элементами которой являются кубы

$$a_{\eta\rho} = \begin{cases} (a_1 = X, \dots, a_{i-1} = X, a_i = 1, a_{i+1} = X, \dots, a_n = X), & \text{если } \eta \neq \rho \text{ и между парой узлов } (\eta, \rho) \text{ существует } i\text{-е ребро;} \\ (a_1 = 0, a_2 = 0, \dots, a_n = 0) & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Предполагается, что  $i$ -ориентированное ребро направлено от  $\eta$  к  $\rho$ . Если ребро ориентировано от  $\rho$  к  $\eta$ , то  $a_{\eta\rho} = (a_1 = 0, a_2 = 0, \dots, a_n = 0)$ .

Теперь на основании утверждения 2 можно привести алгоритм нахождения множества кубов  $\Pi(L_1)$ , соответствующих простым цепям между выделенной парой узлов  $(\alpha, \beta)$ .

**Алгоритм**

1) Представить сеть  $G(V, E)$  исходной кубической  $(w \times w)$ -матрицей смежности  $A_w = \parallel a_{\eta\rho}^0 \parallel$ . Положить  $k = 1$ .

2) Сформировать кубическую  $(w - k) \times (w - k)$ -матрицу  $A_{w-k} = \parallel a_{\eta\rho}^k \parallel$  посредством удаления  $\gamma$ -строки и  $\gamma$ -столбца из матрицы  $A_{w-k+1}$ . Элементы новой матрицы  $A_{w-k}$  вычисляются следующим образом: если  $\eta = \rho$ , то  $a_{\eta\rho}^k = \emptyset$ , в противном случае

$$a_{\eta\rho}^k = a_{\eta\rho}^{k-1} \cup a_{\eta\gamma}^{k-1} \Delta a_{\gamma\rho}^{k-1} \Delta C_\gamma, \quad (6)$$

где  $\gamma \neq \alpha, \beta$ ;  $C_\gamma = (a_1 = X, a_2 = X, \dots, a_{\gamma-1} = X, a_\gamma = 1, a_{\gamma+1} = X, \dots, a_n = X)$ ,  $\gamma$  — удаляемый узел.

3) Если  $k = w - 2$ , т.е.  $A_{w-k}$  —  $(2 \times 2)$ -матрица, то перейти к п. 4, иначе — положить  $k = k + 1$  и перейти к п. 2.

4)  $\Pi(L_1) = a_{\alpha\beta}^{w-2} \Delta C_\alpha \Delta C_\beta$ , где  $C_\alpha$  и  $C_\beta$  — кубы, в которых соответственно координаты  $\alpha$  и  $\beta$  равны единице, остальные координаты — свободные.

5) Конец.

В случае неориентированных сетей  $G$  для любой матрицы  $A_{w-k}$  элементы  $a_{\eta\rho}^k$  и  $a_{\rho\eta}^k$  равны, поэтому на шаге 2 достаточно вычислять только один из них, например  $a_{\eta\rho}^k$ , а второй  $a_{\rho\eta}^k = a_{\eta\rho}^k$ .

**Оценка трудоемкости алгоритма.** Под оценкой трудоемкости будем понимать верхнюю оценку числа „стандартных“ операций алгоритма, асимптотическую относительно размерности задачи. Размерность задачи определяется числом простых цепей в исходном двух-полусном графе  $G$  (см. выражение (6)), т.е. числом  $\Delta$ -операций, необходимых для нахождения всех простых цепей между выделенной парой узлов в полном графе. (Полным называется граф, в котором любая пара узлов соединена ребром.)

Определим общее число простых цепей между любой парой полюсов полного графа, для которого это число является функцией числа узлов  $w$ . Все множество простых цепей разобьем на классы цепей, проходящих через одинаковое число внутренних узлов. Рассмотрим некоторый подграф полного графа, включающий  $k$  внутренних узлов. Для данного подграфа число простых цепей, проходящих через 0 узлов, равно  $Y_k^0$ , проходящих через 1 узел —  $Y_k^1$ , проходящих через  $\mu$  узлов —  $Y_k^\mu$ , где  $Y_k^\mu$  — число размещений  $k$  по  $\mu$ :  $Y_k^\mu = \frac{k!}{(k-\mu)!}$ . Так

как каждый куб, принадлежащий множеству  $a_{\eta\rho}^k$  (6), соответствует простой цепи, проходящей не более чем через  $k$  внутренних узлов, то число таких кубов (цепей)

$$g_k = |a_{\eta\rho}^k| = \sum_{\mu=0}^k \frac{k!}{(k-\mu)!}.$$

Общее число простых цепей полного графа между любой парой полюсов

$$g = g_{w-2} = \sum_{\mu=0}^{w-2} \frac{(w-2)!}{(w-2-\mu)!}. \quad (7)$$

На каждой  $k$ -й итерации алгоритма число  $\Delta$ -операций (см. выражение (6)) может быть определено как

$$I_k = |a_{\eta\gamma}^{k-1}| \cdot |a_{\gamma\rho}^{k-1}| = g_{k-1}^2.$$

Общее число  $\Delta$ -операций алгоритма

$$I = \sum_{k=1}^{w-2} \left\{ \left[ (w-k)^2 - (w-k) \right] I_k \right\} = \sum_{k=1}^{w-2} \left\{ \left[ (w-k)^2 - (w-k) \right] \left[ \sum_{\mu=0}^{k-1} \frac{(k-1)!}{(k-1-\mu)!} \right]^2 \right\}. \quad (8)$$

Численные значения параметров, определяемых выражениями (7) и (8), сведены в таблицу.

$w$	$g$	$I$
3	2	2
4	5	14
5	16	86
...	...	...
$\infty$	$e^{(w-2)!}$	$2[e^{(w-3)!}]^2$

Рассмотрим асимптотическое поведение функций (7), (8) при  $w \rightarrow \infty$ :

$$\lim_{w \rightarrow \infty} g = e^{(w-2)!}, \text{ а } \lim_{w \rightarrow \infty} I = 2[e^{(w-3)!}]^2 = 2\left(\frac{g}{w-2}\right)^2 \ll g^2.$$

Можно видеть, что асимптотическая оценка трудоемкости алгоритма ниже квадратичной по отношению к размерности задачи. Таким образом, разработанный математический аппарат позволяет эффективно осуществлять поиск простых цепей путем определения множества кубов  $\Pi(L_1)$ , соответствующих покрытию ДНФ булевой СФ.

**Пример.** Задана двухполюсная сеть  $G$  (рис. 2). Требуется определить полное множество кубов  $\Pi(L_1)$ , соответствующих простым цепям между парой узлов (6, 9). Элементы исходной кубической матрицы смежности  $A_4 = \|a_{\eta\rho}^0\|$  равны:

$$\begin{aligned} a_{66} = a_{77} = a_{88} = a_{99} &= 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0; \\ a_{67} = a_{76} &= 1 \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X; \\ a_{68} = a_{86} &= X \quad X \quad 1 \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X; \\ a_{69} = a_{96} &= 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0; \\ a_{78} = a_{87} &= X \quad X \quad X \quad X \quad 1 \quad X \quad X \quad X \quad X; \\ a_{79} = a_{97} &= X \quad 1 \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X; \\ a_{89} = a_{98} &= X \quad X \quad X \quad 1 \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X. \end{aligned}$$

Сформируем матрицу  $A_3 = \|a_{\eta\rho}^1\|$  путем удаления узла  $\gamma = 8$ . Элементы  $A_3$  образуются в соответствии с выражением (6):

$$\begin{aligned} a_{66}^1 = a_{76}^1 = a_{99}^1 &= \{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}, \\ a_{67}^1 = a_{76}^1 &= a_{67} \cup a_{68} \Delta a_{87} \Delta C_8 = \left\{ \begin{array}{l} 1 \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \\ X \quad X \quad 1 \quad X \quad 1 \quad X \quad X \quad 1 \quad X \end{array} \right\} \begin{array}{l} C_1^{67} \\ C_2^{67} \end{array}, \\ a_{69}^1 = a_{96}^1 &= a_{69} \cup a_{68} \Delta a_{89} \Delta C_8 = \{X \quad X \quad 1 \quad 1 \quad X \quad X \quad X \quad 1 \quad X\}, \\ a_{79}^1 = a_{97}^1 &= a_{79} \cup a_{78} \Delta a_{89} \Delta C_8 = \left\{ \begin{array}{l} X \quad 1 \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \quad X \\ X \quad X \quad X \quad 1 \quad 1 \quad X \quad X \quad 1 \quad X \end{array} \right\} \begin{array}{l} C_1^{79} \\ C_2^{79} \end{array}. \end{aligned}$$

Сформируем матрицу  $A_2 = \|a_{\eta\rho}^2\|$  путем удаления узла  $\gamma = 7$ :

$$a_{66}^2 = a_{99}^2 = \{0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\},$$

$$a_{69}^2 = a_{96}^2 = a_{69}^1 \cup a_{67}^1 \Delta a_{79}^1 \Delta C_7 = \begin{cases} X & X & 1 & 1 & X & X & X & 1 & X \\ 1 & 1 & X & X & X & X & 1 & X & X \\ 1 & X & X & 1 & 1 & X & 1 & 1 & X \\ X & 1 & 1 & X & 1 & X & 1 & 1 & X \end{cases} \begin{matrix} C_1^{69} \\ C_2^{69} \\ C_3^{69} \\ C_4^{69} \end{matrix},$$

причем в число этих кубов не входит куб, полученный в результате операции  $a_{67}^1 \Delta a_{79}^1 \Delta C_7$  для  $C_2^{67}$  и  $C_2^{79}$ , поскольку пятый и восьмой компоненты этих кубов совпадают и равны 1, т.е.  $C_2^{67} \Delta C_2^{79} = \emptyset$ .

Окончательно получаем

$$\Pi = \Pi(L_1) = a_{69}^2 \Delta C_6 \Delta C_9 = \begin{cases} X & X & 1 & 1 & X & 1 & X & 1 & 1 \\ 1 & 1 & X & X & X & 1 & 1 & X & 1 \\ 1 & X & X & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ X & 1 & 1 & X & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{cases}.$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миллер Р. Теория переключательных схем. Т. 1. М.: Наука, 1970. 416 с.
2. Харари Ф. Теория графов: Пер. с англ. М.: „Либроком“, 2009. 296 с.
3. Тозик В. Т. Расчет вероятности связности сети ЭВМ методом ортогонализации // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1977. № 1. С. 70—75.

#### Сведения об авторе

**Вячеслав Трофимович Тозик**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра инженерной и компьютерной графики; E-mail: tozik@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой инженерной и компьютерной графики

Поступила в редакцию 11.02.10 г.

---

---

# ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

---

---

УДК 621.822.7, 681.2.088

Е. М. АНОДИНА-АНДРИЕВСКАЯ, М. Я. МАРУСИНА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ И МЕХАНИЗМОВ

Проведен сравнительный анализ методов вейвлетного преобразования при решении задач вибродиагностики. Описан метод шумоподавления, включающий выбор типа пороговой обработки и оценку качества очистки сигнала.

*Ключевые слова:* технический контроль, вибродиагностика, вейвлетный анализ.

Для технического контроля приборов и механизмов широко применяются методы вибродиагностики, в которых в качестве диагностических признаков объекта используются параметры осевой, радиальной и угловой вибрации [1]. Важной задачей диагностики является очистка гармонического синусоидального сигнала от шума, для этой цели используется одна из самых перспективных технологий анализа данных — вейвлет-анализ. Вейвлет-преобразование дает наиболее наглядную и информативную картину обработки сигналов, позволяя очистить исходные данные от шумов и случайных искажений [2—6].

В настоящей работе рассмотрена модель сигнала  $s(n) = f(n) + \sigma e(n)$ , где  $f(n)$  — полезный сигнал,  $\sigma$  — уровень шума и  $e(n)$  — гауссов белый шум, т.е. стационарная случайная некоррелированная последовательность величин с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной единице. Цель обработки сигнала состоит в том, чтобы подавить его шумовую часть и выделить гармонический сигнал  $f(n)$ .

При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на аппроксимирующие коэффициенты, которые представляют собой сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, описывающие колебания. Следовательно, информация о шумовом компоненте сигнала содержится в детализирующих коэффициентах. Поэтому их обрабатывают при удалении шума. Шумовой компонент представляет собой сигнал, значение которого меньше по модулю, чем основного. Простейший способ удаления шума состоит в том, чтобы сделать нулевыми значения коэффициентов, меньшие некоторого порогового значения. Эта процедура называется пороговой обработкой коэффициентов.

При жесткой пороговой обработке сигнала сохраняются неизменными все коэффициенты, большие по абсолютной величине порога  $\tau$  или равные ему, а меньшие коэффициенты обращаются в нуль. При мягкой пороговой обработке наряду с обращением в нуль коэффициентов, по модулю меньших  $\tau$ , происходит уменьшение по модулю остальных коэффициентов на величину  $\tau$ .

При решении задачи шумоподавления необходимо оценить спектральный состав шумового компонента, выбрать тип пороговой обработки (трешолдинга) и критерий расчета самого порога.

От выбора значения порогового уровня фона (оценки дисперсии шума) зависит качество шумоподавления сигнала, оцениваемое в виде отношения сигнал/шум. При задании малых значений порога фон сохраняется в виде коэффициентов детализации и поэтому приводит лишь к незначительному увеличению отношения сигнал/шум. При больших значениях порога не учитываются коэффициенты, которые несут существенную информацию. Оптимальное значение  $\tau_0$  порога при наименьшем смещении восстановления сигнала обеспечивает наибольшее значение отношения сигнал/шум.

Процедура шумоподавления включает в себя следующие этапы:

- декомпозиция (выбор вейвлет-преобразования и уровня разложения  $N$ , вычисление вейвлет-разложения исходного сигнала до уровня  $N$ ),
- пороговая обработка детализирующих коэффициентов (выбор порога для каждого уровня от 1 до  $N$  и применение мягкой обработки детализирующих коэффициентов),
- вейвлет-реконструкция, основанная на первоначальных аппроксимирующих коэффициентах уровней от 1 до  $N$ .

Для вейвлетной очистки от шума сигнала применялся пакет Matlab Wavelet Toolbox, позволяющий синтезировать все возможные алгоритмы обработки информации с использованием вейвлет-функций [7].

Для решения задачи шумоподавления разработан алгоритм, включающий в себя следующие этапы:

- моделирование вибрации объекта с использованием методики, представленной в [8—11],
- искажение сигналов белым гауссовым шумом с заданным значением отношения сигнал/шум,
- очистка сигналов от шума с помощью различных методов вейвлет-преобразования,
- выделение шумов на фоне очищенных сигналов,
- расчет значений отношения сигнал/шум,
- расчет коэффициентов корреляции между зашумленными и очищенными сигналами с целью выбора лучшего метода,
- вывод результатов.

Для сравнения выбраны наиболее используемые семейства вейвлетов: Добеши, Хаара, симлеты, вейвлеты Мейера, биортогональные, обратные биортогональные вейвлеты. При очистке сигнала каждым способом использованы одинаковые параметры: порог — мягкий, эвристический вариант первого выбора; перемасштабирование порога с использованием оценки уровня шума на базе коэффициентов первого уровня; уровень вейвлет-разложения — пятый.

Главным критерием при оценке качества очистки сигналов является значение отношения сигнал/шум. Также используются коэффициенты ковариации и корреляции между очищенным и исходным сигналом. Результаты расчетов представлены в таблице.

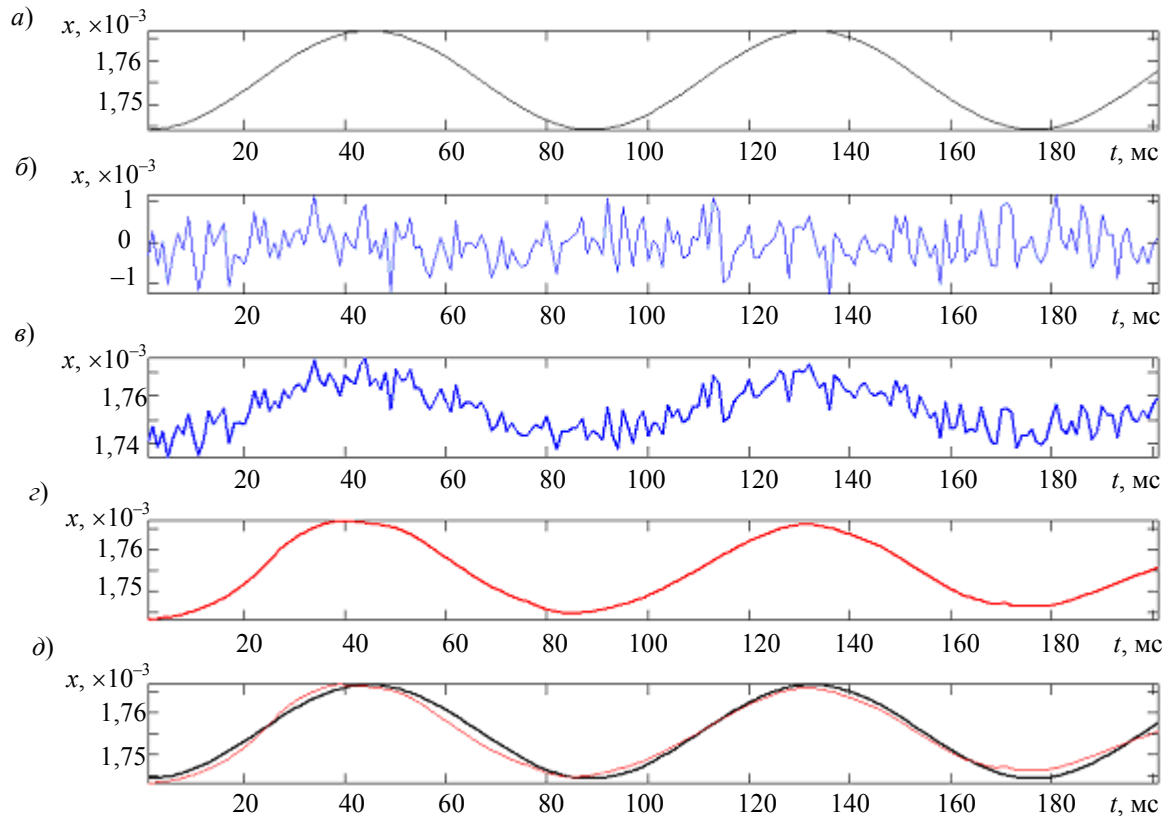
**Результаты анализа вейвлетной очистки сигнала**

Вейвлет-преобразование	Отношение сигнал/шум	Коэффициент ковариации	Коэффициент корреляции
Добеши (db5)	19,70	1,19	0,99
Хаара (haar)	11,99	1,04	0,97
Симлеты (sym5)	15,28	1,14	0,98
Мейера (dmeu)	17,02	1,17	0,98
Биортогональные (bior5.5)	13,17	1,16	0,97
Обратные биортогональные (rbio5.5)	16,36	1,15	0,98

В качестве примера на рисунке представлены результаты обработки модели сигнала вибрации:  $a$  — модель сигнала вибрации,  $b$  — модель шума,  $v$  — обрабатываемый зашумленный сигнал,  $z$  — очищенный от шума сигнал,  $d$  — исходный и очищенный сигналы.



На основе анализа полученных данных можно сделать вывод, что максимальная степень очистки сигнала была получена с использованием фрактального вейвлета Добеши. Если полученный сигнал все еще недостаточно очищен от помех, можно повторно применить к нему вейвлет-преобразование и получить более сглаженный вид, и определить локальные особенности сигнала уже на следующем уровне детализации.



Таким образом, использование вейвлетного преобразования для обработки сигналов вибрации позволяет усовершенствовать процесс выявления гармонических составляющих сигнала, используемых в качестве диагностических признаков объекта в процессе технического контроля приборов и механизмов.

Исследования осуществлены при проведении НИР в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 годы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. К. Н. Явленского, Б. П. Тимофеева, Е. Е. Чаадаевой. Л.: Машиностроение, 1989. 792 с.
2. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2006. 280 с.
3. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 186 с.
4. Мусалимов В. М., Дик О. Е., Тюрин А. Е. Параметры действия энергетического спектра вейвлет-преобразований // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 5. С. 10—15.
5. Марусина М. Я. Инвариантный анализ и синтез в моделях с симметриями. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 144 с.
6. Марусина М. Я., Казначеева А. О. Шумоподавление в томографии с помощью вейвлет-фильтров // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 10. С. 51—57.
7. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М.: ДМК Пресс, 2005. 301 с.

8. Анодина-Андриевская Е. М. Разработка комплексных автоматизированных систем диагностического контроля шарикоподшипников. СПб: СПГУАП, 2000. 8 с.
9. Явленский К. Н., Анодина-Андриевская Е. М. Автоматизированная система диагностирования шариковых подшипников // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. „Диагностика, информатика, метрология, экологическая безопасность — 98“. СПб, 1998. С. 34.
10. Анодина-Андриевская Е. М. Структура и программная реализация обобщенной модели диагностирования шарикоподшипников // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44, № 5.
11. Анодина-Андриевская Е. М. Обобщенная диагностическая модель шариковых подшипников // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. „Диагностика, информатика, метрология, экологическая безопасность — 98“. СПб, 1998. С. 35.

#### Сведения об авторах

**Елена Михайловна Анодина-Андриевская**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии

**Мария Яковлевна Марусина**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: marusina\_m@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
измерительных технологий  
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию  
30.06.10 г.

УДК 921.01

Л. В. ЕФРЕМОВ

## ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ КАЛИБРОВКАМИ С УЧЕТОМ ЗАПАСА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Демонстрируется метод прогнозирования интервалов между поверками и калибровками средств измерений с учетом запаса их метрологической надежности. Метод позволяет гарантировать безотказную работу приборов при эксплуатации и может быть положен в основу стандартов о поверке средств измерений.

**Ключевые слова:** вероятность, запас метрологической надежности, исправность, калибровка, квантиль, поверка, погрешность, средство измерения.

Обычно приборы и другие средства измерения (СИ) считаются исправными и допускаются к работе, если при поверке их фактическая погрешность  $\Delta$  не выходит за пределы допустимого значения  $\Delta_a$  (далее — предел погрешности). Но правильность принятия такого решения во многом зависит от корректности оценки погрешности  $\Delta$ . В инструкциях по поверкам ряда СИ указаны такие варианты расчета  $\Delta$ : по одноразовому измерению, по средней величине трех или пяти измерений, по максимальной величине трех измерений и др.

Общим недостатком рассмотренных способов оценки  $\Delta$  является то, что с их помощью учитывается лишь факт превышения или не превышения предела погрешности. Поэтому СИ может признаваться исправным даже в случае совпадения погрешности с ее пределом или близости к нему, хотя это состояние может быть нарушено сразу же после проведения поверки со всеми вытекающими отсюда негативными, а иногда и трагическими, последствиями.

К нормативным документам, где эта проблема решается на высоком уровне корректности, можно отнести стандарты и методики поверки лабораторных весов [1], предусматривающие расчет размаха и среднего квадратического отклонения (СКО) по результатам многократных измерений. При этом СКО не должно превышать  $1/3$  предела погрешности, что обеспечивает соблюдение правила „трех сигм“ при высокой вероятности безотказной работы (99,87 %). Важно, что назначаются два уровня предела погрешности — для первичной поверки  $\Delta_p$  и для эксплуатации (для периодических поверок)  $\Delta_e$ . При этом норма предела погрешности для эксплуатации  $\Delta_e = 2\Delta_p$ , что учитывает возможный тренд погрешности СИ в период между поверками в допустимых пределах.

Применение методики поверки весов с учетом СКО измерений обусловлено строгими требованиями к условиям проведения первичных поверок, направленных на исключение систематической погрешности. Однако одной из главных задач периодических поверок как раз и является обнаружение таких погрешностей, но в этом случае нарушается основное условие применения правила „трех сигм“ — отсутствие учета систематической погрешности.

Рассматриваемая методика направлена на устранение указанных недостатков, что особенно актуально для приборов контроля безопасности жизнедеятельности. В ее основу положен критерий, условно названный запасом метрологической надежности  $Z$  (далее — запас надежности), который был предложен в статье [4]. Этот критерий рассчитывается по следующей формуле:

$$Z = \frac{|\Delta_a| - |\Delta_{cp}|}{\sigma} = \frac{1 - |\Delta_{cp}|/|\Delta_a|}{\sigma/|\Delta_a|} = \frac{1 - \delta_{САП}}{\delta_{СКО}}, \quad (1)$$

он представляет собой квантиль нормального двухпараметрического распределения вероятности не достижения предела погрешности (далее — вероятность  $\beta$ ). В редакторе MathCAD вероятность  $\beta$  оценивается оператором (2), а в электронных таблицах EXCEL — оператором НОРМСТРАСП [ячейка с квантилем  $Z$ ]

$$\beta(Z) = snorm(Z) = snorm\left(\frac{|\Delta_a| - |\Delta_{cp}|}{\sigma}\right). \quad (2)$$

где  $\Delta_{cp}$  — средняя арифметическая погрешность, которая характеризует систематическую погрешность и в общем случае не равна нулю.

В формулу (1) введены два простых показателя — относительная систематическая, или средняя арифметическая, погрешность  $\delta_{САП} = |\Delta_{cp}|/|\Delta_a|$  и относительное случайное или среднее квадратическое отклонение  $\delta_{СКО} = \sigma/|\Delta_a|$ .

Из формулы (1) видно, что оценка погрешности по правилу „трех сигм“ является частным случаем методики анализа запаса надежности при  $\Delta_{cp} = 0$ . В общем случае для рассматриваемого СИ должен быть установлен минимально допустимый запас надежности  $Z_{min}$ . Вопрос о выборе этого критерия должен решаться поставщиком СИ с учетом класса точности, назначения прибора и опыта применения данной методики. Значение  $Z_{min} = 3$  при  $\beta = 99,87\%$  соответствует правилу „трех сигм“. Однако не исключено установление других норм, например,  $Z_{min} = 2$  при  $\beta = 97,77\%$  или  $Z_{min} = 1$  при  $\beta = 84,10\%$  для учебных или бытовых приборов.

Используя понятие „запас надежности“, можно решать многие проблемы и, в частности, прогнозировать интервалы между поверками или калибровками (МПИ). В настоящей работе основное внимание уделяется алгоритму и программе обоснования МПИ по результатам первичной и периодических поверок конкретного экземпляра СИ. В теории диагностики эта задача соответствует прогнозированию остаточного ресурса объекта. Правомерность постановки

такой задачи вытекает из руководящих принципов Международной организации по законодательной метрологии OIML [2].

В предлагаемом варианте методики по аналогии с правилами поверок весов были введены два уровня предела погрешности — для первичной поверки  $\Delta_p$  и для эксплуатации  $\Delta_э = 2\Delta_p$ . При этом значение базового СКО определяется как  $\sigma_0 = \Delta_p / Z_{\min}$ . Текущий запас надежности, обычно рассчитываемый относительно  $\Delta_э$ , может со временем уменьшаться, но не должен опускаться ниже допустимого уровня  $Z_{\min}$ .

Далее представлены программы в редакторах MathCAD и EXCEL, разработанные применительно к периодической системе поверок и калибровок (рис. 1). Следует обратить внимание на содержание операций первичной и каждой периодической поверки. Целью первичной поверки следует считать не только оценку качества исследуемого СИ, но и обоснование исходных (базовых) метрологических характеристик этого прибора при нахождении его в исправном состоянии. В этой связи первичная поверка должна выполняться с высокой тщательностью при соблюдении всех требований к проведению испытаний. Перед первичной поверкой целесообразно выполнять калибровку прибора. Обязательной операцией должно быть многократное измерение погрешности (не менее 15 измерений) с оценкой базовой сигмы  $\sigma_0$ , верхнего  $Z_{\max} = \sigma_0 \Delta_э$  и нижнего  $Z_{\min}$  уровней запасов надежности.

Основные задачи периодических поверок заключаются в оценке технического состояния и скорости тренда погрешности при эксплуатации, а также — в принятии решения о калибровке и допуске СИ к дальнейшей работе. Первой и обязательной операцией первичной поверки должно быть многократное измерение погрешности (ИП) и оценка запаса надежности перед выполнением калибровки, которая рассматривается как операция по корректировке показаний СИ. На основании анализа этих измерений и принимается решение о калибровке. Затем СИ калибруется (по необходимости) и выполняются обязательные повторные измерения погрешности с целью выбора одного из следующих вариантов дальнейшего использования прибора: отправка его в ремонт или допуск к эксплуатации до следующей поверки.

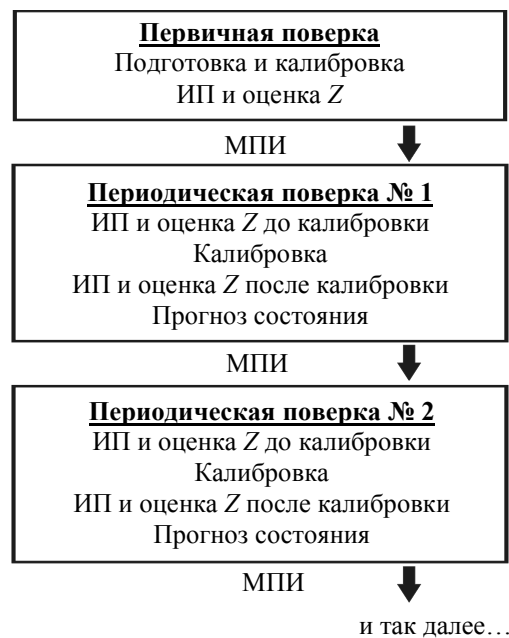


Рис. 1

Каждая  $i$ -я периодическая поверка перед калибровкой начинается с регистрации постоянных исходных данных:  $\Delta_p$ ,  $\Delta_э$ ,  $Z_{\max}$ ,  $Z_{\min}$  и  $\sigma_0$ . К переменным исходным данным относится вектор результатов многократных измерений  $m$  (в рассматриваемом примере  $m = 25$  циклов, хотя можно использовать и меньшее число циклов, но желательно не менее 5—10). Для этого

вектора автоматически рассчитываются систематическая  $\Delta_{ci}$  и случайная погрешность  $\sigma_i$  с использованием операторов редактора MathCAD:

$$\Delta_{ci} := \text{mean}(\Delta_i) \text{ и } \sigma_i := \sqrt{\text{Var}(\Delta_i)}. \quad (3)$$

Для расчета  $\sigma_i$  в алгоритм программы включена небольшая подпрограмма для защиты от появления чрезмерно малых значений СКО (вплоть до нуля):

$$\sigma_i = \text{if} \left( \sigma_i \leq \frac{\Delta_{\beta}}{Z_{\beta}}, \frac{\Delta_{\beta}}{Z_{\beta}}, \sigma_i \right). \quad (4)$$

Условие (4) позволяет выявлять систематические погрешности даже при СКО=0 путем замены  $Z \rightarrow \infty$  на  $Z=12$ , когда  $\beta = 0,999\ 999\ 999 \dots \rightarrow 1$  !!

В предлагаемом варианте программы для каждой  $i$ -й поверки предусмотрен расчет следующих метрологических показателей: фактический запас надежности  $Z_i$ , тренд погрешности относительно предыдущей поверки  $M_i$ , скорость деградации тренда  $V_i$  и прогнозируемый запас надежности  $Z_{i+1}$  при последующей  $(i + 1)$ -й поверке

$$Z_i = \frac{|\Delta_a| - |\Delta_{cpi}|}{\sigma_i}, \quad (5)$$

$$M_i = |Z_{i-1} - Z_i|, \quad (6)$$

$$V_i = M_i / T_i, \quad (7)$$

$$Z_{i+1} = Z_i - T_k V_i. \quad (8)$$

Для решения вопроса о необходимости выполнения калибровки значение  $Z_{i+1}$  следует сравнить с допустимым пределом погрешности  $Z_{\min}$ . Калибровка должна выполняться в случае, если  $Z_{i+1} \leq Z_{\min}$ . После выполнения калибровки все расчеты по формулам (5)–(8) рекомендуется повторить. Тогда СИ допускается к эксплуатации при условии  $Z_{i+1} \geq Z_{\min}$ . Этот вопрос можно решить и по-иному — путем расчета остаточного ресурса  $T_{\text{ост}}$

$$T_{\text{ост}} = \begin{cases} (Z_i - Z_{\min}) / V_i, & \text{если } V_i \neq 0, \\ 2T_k, & \text{если } V_i = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Если  $T_{\text{ост}} \geq T_k$ , то СИ допускается к работе в течение следующего МПИ. В противном случае СИ надо отправить в ремонт либо разрешить работу при меньшей, но согласованной величине  $Z_{\min}$ .

Результаты всех поверок рекомендуется регистрировать в специальном паспорте СИ на листе электронной таблицы EXCEL (рис. 2, а), который одновременно является рабочей программой для расчета рассмотренных показателей. В ячейках рабочего листа EXCEL фиксируются не только исходные данные и результаты расчета, но и выполняются логические операции для автоматических заключений об исправности и остаточном ресурсе СИ (см. рис. 2, б). По результатам поверок в таком паспорте можно формировать тренд деградации и прогнозировать фактический срок службы СИ до ремонта или списания. В данном примере (см. рис. 2, а) после трех лет эксплуатации СИ было направлено в ремонт.

Каждый тип СИ имеет свои особенности накопления систематических погрешностей. Для некоторых СИ (например, часов) это вообще неактуально, поскольку для них разработаны системы обеспечения качества продукции. Возможно, у некоторых СИ скорость тренда будет столь малой, что поверки не выявят необходимости калибровки в течение многих лет.

В других случаях, наоборот, потребуется корректировка МПИ с учетом влияния условий работы на тренд погрешности [6]. Для таких СИ может быть разработана программа ускоренных или полевых испытаний.

а)

Год пост	2006	Эталон	480	Доп ЗМН	3		
ПДПЭ	48	ПДПП	24	ВНДП	0.99865	НМПИ	1

Проверка первич №	0	Дата	12.05.2014	МПИ, лет	1.00		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
После кал	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
Скорость	0.000	Ост. Рес	2.000	Решение	МПИ, лет	1	

Проверка период №	1	Дата	12.05.2011	МПИ, лет	0.80		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	15.2	4.10	1.90	1.725	калибровка
После кал	25	8.1	-1.2	5.78	1.90	3.40	Исправен
Скорость	2.375	Ост. Рес	1.170	Решение	МПИ, лет	1	

Проверка период №	2	Дата	12.05.2012	МПИ, лет	1.10		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	18	3.75	2.03	1.907	калибровка
После кал	25	8.1	2	5.68	2.03	3.836	Исправен
Скорость	1.843	Ост. Рес	1.453	Решение	МПИ, лет	1	

Проверка период №	3	Дата	12.05.2013	МПИ, лет	1.00		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	9	20	3.11	2.57	0.543	калибровка
После кал	25	9	2	5.11	2.57	2.543	Ремонт
Скорость	2.568	Ост. Рес	0.822	Решение	МПИ, лет	Ремонт	

После ремонта

Проверка период №	4	Дата	12.05.2014	МПИ, лет	1.00		
Этап	m	СКП	СиП	ЗМН	Тренд 1	Прогноз	Вывод
До калибр	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
После кал	25	8	0	6.00	0.00	6	Исправен
Скорость	0.000	Ост. Рес	2.000	Решение	МПИ, лет	1	

б)

```
=ЕСЛИ(J23<=6;"калибровка";"Исправен")
=ЕСЛИ(J24<=6;"Ремонт";"Исправен")
=ЕСЛИ(E31=0;2;(H30-$I$6)/E31)
```

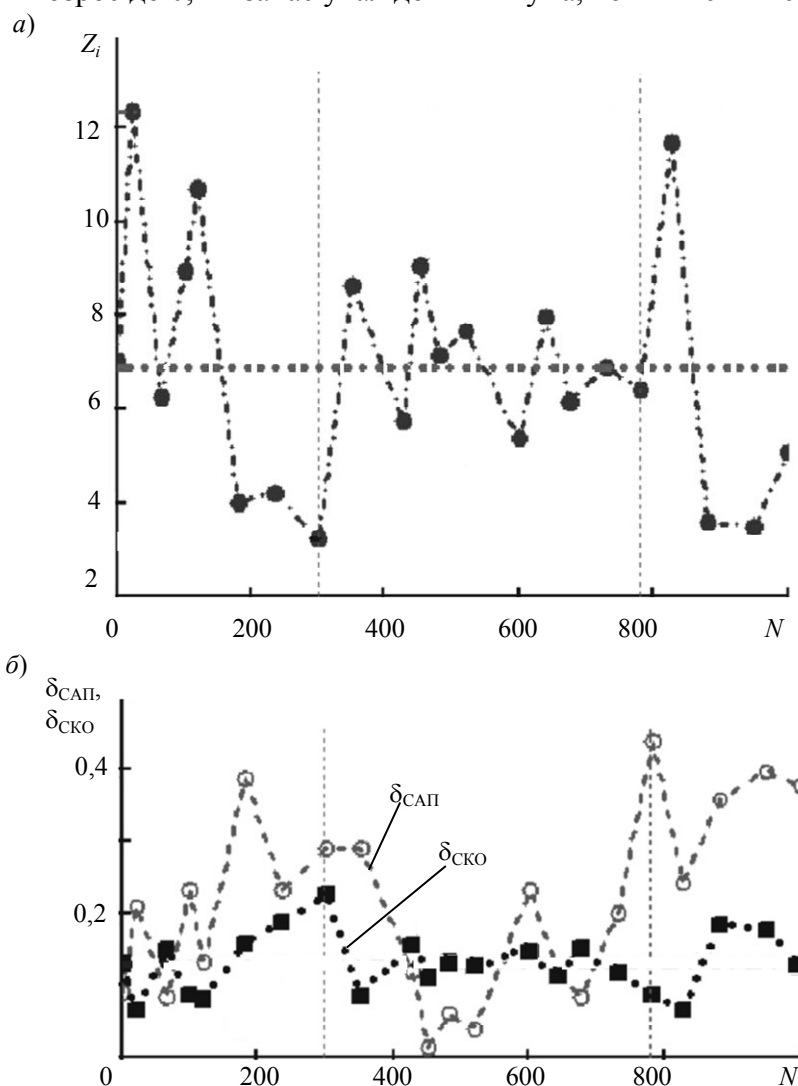
Рис. 2

Корректность и эффективность предлагаемой методики подтверждаются обработкой с ее помощью достоверной информации о трехлетних испытаниях пяти образцов приборов, имеющих предел погрешности, равный 0,1. На рис. 3, а приведен статистический график запаса надежности прибора, рассчитанного по формуле (5). Важно отметить, что этот показатель за все время испытаний  $N$  (1000 суток) находился в диапазоне значений от 12,3 до 3,17. Среднее и наиболее вероятное значение составило 6,7 (пунктир), что выше допустимого значения  $Z \geq 6$  при эксплуатации и минимально допустимом запасе надежности  $Z_{\min} = 3$ .

На рис. 3, а видны два этапа испытаний прибора. За первый год (до 300 суток) наблюдается четкий тренд снижения  $Z$  от 12 до 3,17. После калибровки или ремонта через 350 суток работы запас надежности поднялся до 8 и затем в течение полутора лет (530 суток) находился на высоком уровне — от 6 до 12. После 880 суток запас надежности опять упал до 3,2.

Для объяснения трендов деградации этого показателя на рис. 3, б приведены графики для относительных значений  $\delta_{САП}$  и  $\delta_{СКО}$ . Видно, что запас надежности зависит от изменения как случайной, так и систематической погрешности, что дает основание для вывода об универсальности методики расчета запаса надежности и ее преимуществах по сравнению с частным случаем — способом оценки погрешности по правилу „трех сигм“.

В данном примере снижение запаса надежности от 12 до 3,17 в первые 300 суток объясняется повышением  $\delta_{САП}$  от 0,1 до 0,4 и  $\delta_{СКО}$  от 0,08 до 0,22. При дальнейшей эксплуатации значение  $Z$  находилось в допустимых пределах. В конце испытаний модуль систематической погрешности вновь возрос до 0,4 и запас упал до минимума, хотя и не ниже 3.



Рассмотренная методика позволяет объективно оценивать запас надежности СИ вне зависимости от знака погрешности и ее предела (плюс или минус) поскольку в формулах (1) и (5) применяются их модули. Для того чтобы иметь представление о поведении погрешности за весь период наблюдения с учетом знака погрешности, можно выполнить общий корреляционный анализ его тренда по методике [3].

Полученная нами информация о поверках реального прибора снимает возможные сомнения о корректности и эффективности предложенного метода. Тем не менее в заключение представляется целесообразным еще раз подчеркнуть некоторые ее принципиальные положения. Прежде всего отметим, что предназначение методики заключается в обеспечении высокой надежности СИ, а не в оценке точности измерений, что актуально для совсем других задач метрологии по сличению эталонов. В ГОСТ 8.207-76 [5] указано, что „За результат измерения принимают среднее арифметическое результатов наблюдений, в которые предварительно введены поправки для исключения систематических погрешностей“. С математической точки зрения такое положение вполне корректно, но оно не относится к решению рассматриваемой проблемы, поскольку нами определяется среднее значение не измеряемой

величины, а самой погрешности относительно эталона, который при поверках характеризует истинную величину измеряемого признака. В методике за основную метрологическую характеристику случайной погрешности принимается  $\sigma$  в знаменателе формул (1) и (5), а не средняя квадратическая ошибка  $\sigma_{\text{ср}}$ , которая относится к задаче оценки доверительных границ диапазона, накрывающего среднюю величину

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}.$$

Правомерность применения в методике нормального распределения подтверждается не только классическим правилом „трех сигм“, но и неоднократной проверкой согласия теоретического и эмпирического распределения вероятностей при очень больших выборках (объемом более 500 циклов), тем более что погрешности являются относительно малыми величинами по сравнению с измеряемым признаком. Теоретически СИ могут иметь  $\sigma \rightarrow 0$ , что позволяет сокращать число циклов измерений. Но даже в таких случаях поправка, определяемая по формуле (4), позволяет достоверно оценивать тренд деградации запаса метрологической надежности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования [Электронный ресурс]: <<http://www.complexdoc.ru/lib/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2024104-2001>>.
2. OIML D10. Guidelines for the Determination of Recalibration Intervals of Measuring Equipment Used in Testing Laboratories. International Organization of Legal Metrology [Electronic resource]: <[www.ilac.org/documents/ILAC\\_G24\\_2007.pdf](http://www.ilac.org/documents/ILAC_G24_2007.pdf)>.
3. Ефремов Л. В. Моделирование трендов погрешности диагностических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 38—43.
4. Ефремов Л. В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 52—54.
5. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [Электронный ресурс]: <<http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=160916>>.
6. Мольков В. Ф. Межповерочный интервал приборов учета энергоресурсов — показатель региональный // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. 2004. Вып. 4.

#### Сведения об авторе

**Леонид Владимирович Ефремов** — д-р техн. наук, профессор; Петербургский институт машиностроения, кафедра триботехники; E-mail: levlefr@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
21.06.10 г.



---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 51.74: 533.9: 537.5: 537.876

А. Ю. ГРИШЕНЦЕВ, А. Г. КОРОБЕЙНИКОВ

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКОВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ИОНОСФЕРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

Разработана модель объемного распределения плотности токов в ионосфере в период облучения высокочастотным радиоизлучением при возникновении переходных процессов и в устоявшихся режимах для решения прямой и обратной задачи. Рассмотрены методы численного решения модели и расчета ее параметров.

*Ключевые слова:* ионосфера, распространение электромагнитных колебаний, математическое моделирование.

**Введение.** Моделирование протекания в ионосфере динамических процессов, связанных с возбуждением электромагнитного поля, актуально для радиосвязи, метеорологии и ряда других научно-практических направлений [1—8]. Моделирование распространения радиоволн в ионосфере является сложной многопараметрической задачей, пока не имеющей универсального решения [1—11]. Задача усложняется особенностями плазменного состояния газа, пространственной и динамической неоднородностью ионосферы, неоднородностью геомагнитного поля, наличием собственных токов в ионосфере и др. Модель, рассмотренная в настоящей работе, предназначена для численного анализа и изучения переходных процессов, а также пространственного распределения плотности тока в ионосфере при искусственном облучении высокочастотным радиоизлучением.

**Геометрическая структура модели.** Предлагаемая модель построена путем разбиения некоторого выделенного объема атмосферы (включая тропосферу, стратосферу и ионосферу) на дискретные части цилиндрическо-кольцевой формы с дальнейшим замещением их эквивалентными электрическими  $RLC$ -ветвями (рис. 1), впоследствии объединенными в совокупную  $RLC$ -схему. Использование слоистой структуры модели позволяет моделировать движение электронного газа.

Рассмотрим один из возможных способов разбиения конусного участка атмосферы. Разделив участок на дискретные, получим коаксиальную многослойную структуру, внутри которой можно выделить объемы, обладающие относительной однородностью свойств (рис. 1).

Область ионосферы разделена по горизонтали на  $K$  коаксиальных слоев (от нуля до  $K-1$ ) поверхностями сечения, имеющими форму усеченного сферой конуса с шаровым сегментом в основании и относительно малым углом при вершине (такие усеченные конусы, при некоторых допущениях, можно считать цилиндрами); по вертикали — на  $M$  слоев (от нуля до  $M-1$ ) поверхностями сечения, имеющими форму шарового сегмента. Таким образом, ионосфера дробится на множество коаксиальных цилиндрических трубок общим числом  $NR=(M+1)K$ ,

каждая из которых характеризуется радиусом  $r_{mk}$ , толщиной  $\Delta r_{mk}$  и высотой  $h_m$ , где  $m=0, 1, 2, \dots, M-1$  и  $k=0, 1, 2, \dots, K-1$ . Область тропосферы и стратосферы возможно объединить в единый слой  $M$  и разделить на  $K-1$  коаксиальных трубок высотой  $h_m$ , которые сверху примыкают к соответствующим трубкам из слоя ионосферы  $M-1$ , а снизу опираются на поверхность Земли.

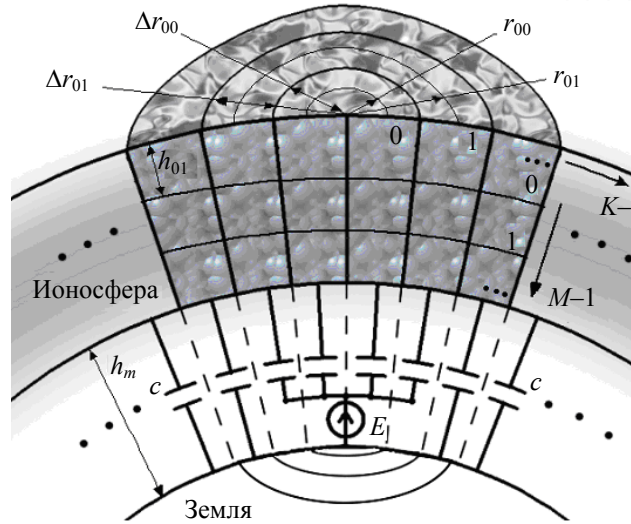


Рис. 1

Выбор значений  $h_m$  для последующего моделирования принимается с учетом изменения следующих величин как функций высоты: значение электронной плотности  $N_e$ , эффективного числа упругих столкновений  $\nu_{\text{eff}}$  электронов с нейтральными частицами и ионами, температуры (в том числе температурных инверсий), химического состава и плотности. Значения  $\Delta r_{mk}$  и  $R_{mk}$  выбираются так, чтобы можно было оценить неравномерность распределения плотности тока по ионосфере, вызванную проявлением поверхностного эффекта, т.е. с учетом глубины проникновения  $\delta$  электромагнитной волны:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}}, \quad (1)$$

где  $\omega$  — круговая частота,  $\mu$  — абсолютная магнитная проницаемость вещества,  $\gamma$  — удельная объемная электропроводность вещества,  $\lambda$  — длина волны. Наиболее значительные изменения с высотой ( $h$ ) аргументов функции (1) будут наблюдаться для  $\gamma$  в зависимости от значений  $N_e$  и  $\nu_{\text{eff}}$  [12]. При выборе  $\Delta r_{mk}$  требуется оценивать уточненное значение  $\delta$  с наибольшими значениями  $\gamma$  для слоев ионосферы, в которых необходимо учитывать неравномерность распределения плотности тока. Окончательное уточнение геометрических параметров модели производится исходя из требуемой точности и доступных вычислительных ресурсов, а также с учетом особенностей расчета эквивалентных электрических параметров.

**Эквивалентная схема замещения.** Эквивалентная схема (рис. 2) получается в результате замены каждого дискретного элемента модели набором  $RLC$  с определенными параметрами, значения которых могут динамически меняться во времени. В данной схеме элементы имеют коаксиальную структуру, каждый (см. рис. 1) обладает собственной индуктивностью  $L(mK+k)$  и активным сопротивлением  $R(mK+k)$ , где  $m=0, \dots, M-1$ ,  $k=0, \dots, K-1$ . Кроме того, присутствуют межслойные электрические взаимодействия благодаря емкостным и индуктивным связям, индуктивно в модели взаимосвязаны все катушки, между соседними слоями присутствуют емкостные связи  $C(m(K-1)+k)$ . Помимо емкостных связей, обусловленных токами смещения, присутствуют горизонтальные межслойные связи, обусловленные токами проводимости  $R(m(K-1)+k)$ . Такой подход позволяет рассматривать модель в виде схемы, состоя-

щей из обычных  $RLC$ -элементов, и анализировать переходные процессы и устоявшиеся режимы стандартными методами электротехники.

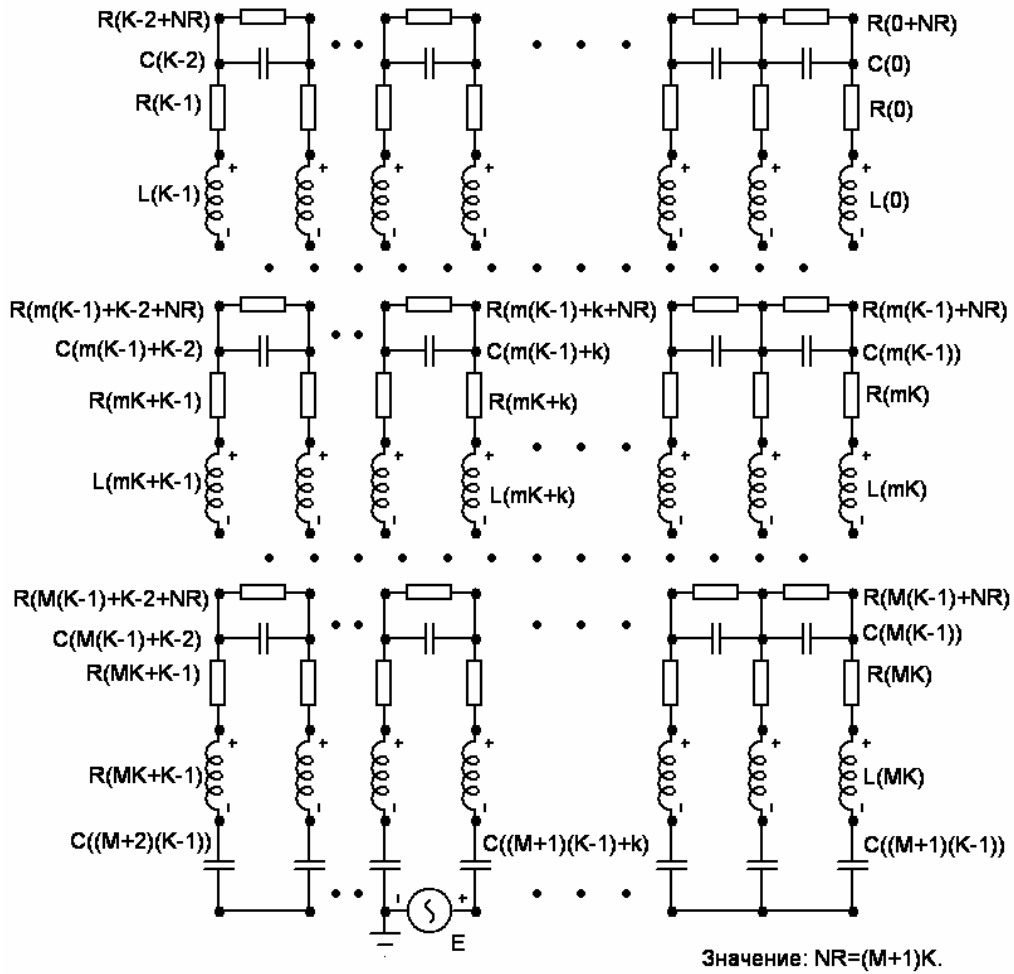


Рис. 2

Индексы элементов (см. рис. 2) соответствуют индексам геометрической структуры модели. Сквозная нумерация элементов  $RLC$  позволяет получить схему, имеющую стандартные обозначения, что может существенно облегчить задачу численного моделирования, например, при использовании пакетов схемотехнического моделирования.

Для составления системы дифференциальных уравнений первого порядка каждый элемент цепи выделим в отдельную ветвь. При отнесении ветвей графа схемы к дереву или связям будем придерживаться правила получения *нормального дерева* и *нормального подграфа связей*. К ветвям дерева последовательно отнесем ветви с источниками ЭДС, затем — ветви с конденсаторами, ветви с резисторами и в последнюю очередь — ветви с катушками индуктивности. В качестве связей (хорд) сначала выделим источники тока (в приведенном варианте схемы отсутствуют), затем — индуктивные элементы, резистивные ветви и в последнюю очередь — ветви с конденсаторами. Граф, полученный таким образом, называют *нормальным* [13].

Общее число узлов в графе схемы  $[(2M + 1)K + 2]$ , общее число ветвей  $[K(4M + 1) + 1 - 2M]$ .

Рассмотрим алгоритм получения матриц, необходимых для машинного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих токи и напряжения в ветвях схемы. Занесем последовательно все ветви в общую таблицу  $DATA$  в соответствии с правилами получения нормального дерева и подграфа связей. Таблица  $DATA$  должна содержать следующий

минимальный набор полей: порядковый номер строки (далее соответствует номеру ветви), номера узлов стока и истока, тип и номер элемента в соответствии с электрической схемой. Далее путем перебора строк *DATA* получим матрицу **A**, строки которой соответствуют номерам узлов, а столбцы — номерам ветвей. Номера ветвей соответствуют номеру элемента в массиве *DATA*.

В каждом столбце полной матрицы **A** должно быть две единицы, одна (+1) соответствует начальному узлу ветви (истоку), вторая (−1) — конечному (стоку). Для пассивных элементов цепи не имеет принципиального значения положение стока (истока). Полученная матрица содержит одну избыточную строку, являющуюся линейной комбинацией других, поэтому одну строку необходимо исключить.

Размерность матрицы **A**  $[(2M+1)K+2-1] \times [K(4M+1)+1-2M]$ , где  $[(2M+1)K+2-1]$  — число узлов,  $[K(4M+1)+1-2M]$  — число ветвей.

Следующей операцией является деление полученной матрицы на матрицу дерева **A<sub>д</sub>** и матрицу связей **A<sub>с</sub>** путем последовательного перебора в направлении, соответствующем направлению заполнения матрицы **A** из таблицы *DATA*. При формировании матрицы **A<sub>д</sub>** достаточно, чтобы хотя бы один из узлов нового элемента не содержался в списке узлов, перечисленных ранее (если это условие не выполняется, то элемент переносится в матрицу **A<sub>с</sub>**). В результате необходимо получить матрицу следующего вида:

$$\mathbf{A} = \left\| \mathbf{A}_d \mathbf{A}_c \right\|. \quad (2)$$

С учетом того что таблица *DATA* была получена в соответствии с правилами формирования нормального графа, матрица **A<sub>д</sub>** будет содержать набор данных, соответствующий нормальному графу. В полученных матрицах дерева **A<sub>д</sub>** и связей **A<sub>с</sub>** номера ветвей могут быть расположены не по порядку, что может вызывать некоторые неудобства при хранении в памяти ЭВМ и вычислениях, привести нумерацию к упорядоченному виду можно с помощью упорядоченного перебора и присвоения новых номеров ветвям. В таблице *DATA* для возможности взаимобратных преобразований необходимо добавить поле, содержащее новую нумерацию ветвей. В результате стандартных преобразований матриц получим систему дифференциальных уравнений, которая в совокупности с начальными условиями представляет задачу Коши, такую систему можно решать различными методами численного интегрирования. Точность и устойчивость решения будут во многом зависеть от выбранного шага интегрирования, при этом слишком малые значения могут существенно увеличить время расчетов. При формировании начальных условий необходимо учитывать следующие правила:  $i_L(t-0) = i_L(t+0)$  и  $u_C(t-0) = u_C(t+0)$ , где  $i_L$  — ток через индуктивности в зависимости от времени  $t$ ,  $u_C$  — напряжение на конденсаторе в зависимости от времени  $t$ .

**Расчет эквивалентных электрических параметров геометрической модели.** Расчет эквивалентных значений активных сопротивлений при движении тока в вертикальном направлении (см. рис. 1) для дискретных элементов модели с номерами  $k$  и  $m$  можно осуществить по формуле:

$$R_{mK+k} = \frac{1}{\gamma_{km}} \frac{h_m}{2\pi r_{mk} \Delta r_{mk}}. \quad (3)$$

Межслойное сопротивление при движении тока в горизонтальном направлении можно рассчитать следующим образом. Рассчитаем элементарное приращение межслойного активного сопротивления для одного (внутреннего) полуслоя:

$$dR'_{m(K-1)+k+NR} = \frac{1}{\gamma_{mk}} \frac{dr}{2\pi(r_{mk} + dr)h_m},$$

далее запишем в интегральном виде:

$$R'_{m(K-1)+k+NR} = \frac{1}{\gamma_{mk}} \frac{\int_{r_{mk}}^{r_{mk} + \frac{\Delta r_{mk}}{2}} dr}{2\pi h_m \left( r_{mk} + \int_{r_{mk}}^{r_{mk} + \frac{\Delta r_{mk}}{2}} dr \right)} = \frac{1}{\gamma_{mk}} \frac{\Delta r_{mk}}{2\pi h_m (2r_{mk} + \Delta r_{mk})},$$

для внешнего слоя на основании аналогичных преобразований получаем

$$R''_{m(K-1)+k+NR} = \frac{1}{\gamma_{m(k+1)}} \frac{\Delta r_{m(k+1)}}{2\pi h_m (2r_{m(k+1)} + \Delta r_{m(k+1)})}.$$

Полное межслойное сопротивление можно вычислить как

$$R_{m(K-1)+k+NR} = \frac{1}{\gamma_{mk}} \frac{\Delta r_{mk}}{2\pi h_m (2r_{mk} + \Delta r_{mk})} + \frac{1}{\gamma_{m(k+1)}} \frac{\Delta r_{m(k+1)}}{2\pi h_m (2r_{m(k+1)} + \Delta r_{m(k+1)})}. \quad (4)$$

При решении задач на расчет индуктивности [14] принято рассматривать случай постоянного тока и низкой частоты, когда поперечные линейные размеры проводника меньше, или значительно меньше, глубины проникновения тока  $\delta$  (1); случай весьма высокой частоты, когда поперечные линейные размеры проводника больше или равны  $\delta$ . При машинном расчете значения индуктивности (собственные и взаимные) целесообразно хранить в двумерном, квадратном, массиве **IND** размером  $[(M + 1)K] \times [(M + 1)K]$ ; элементы с одинаковыми номерами строк и столбцов будут образовывать множество собственных индуктивностей, остальные элементы будут соответствовать взаимным индуктивностям, причем  $\mathbf{IND}[i, j] = \mathbf{IND}[j, i]$ . Рассмотрим некоторые примеры, используемые в модели для расчета индуктивностей.

В общем случае собственную индуктивность коаксиального проводника приближенно можно определить как

$$\mathbf{IND}[mK + k, mK + k] = L_{mK+k} = \frac{\mu_0 h_m}{2\pi} \left( \ln \frac{2h_m}{r_{mk} + \frac{\Delta r_{mk}}{2}} - 1 - \frac{\mu}{\mu_0} \ln c \right), \quad (5)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $c$  — табличная константа [14], зависящая от отношения внутреннего радиуса  $r - \frac{\Delta r}{2}$  к внешнему  $r + \frac{\Delta r}{2}$ .

В пределах одного горизонтального слоя взаимная индуктивность рассчитывается для коаксиальных проводников в случае низкой частоты:

$$\left\{ \begin{aligned} M &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{q}{p} + \frac{\mu}{\mu_0} \left( \frac{s^4}{(s^2 - q^2)} \ln \frac{s}{q} + \frac{n^4}{(p^2 - n^2)^2} \ln \frac{p}{n} - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{q^2}{s^2 - q^2} + \frac{n^2}{p^2 - n^2} \right) \right) \right], \\ \mathbf{IND}[i, j] &= \mathbf{IND}[j, i] = M, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где  $n = r_i - \frac{\Delta r_i}{2}$ ,  $p = r_i + \frac{\Delta r_i}{2}$ ,  $q = r_j - \frac{\Delta r_j}{2}$ ,  $s = r_j + \frac{\Delta r_j}{2}$ , причем  $r_j > r_i$ , а  $p = q$ .

Расчет взаимной индуктивности между  $M$  элементами из различных горизонтальных слоев как между полыми цилиндрическими проводниками с общей осевой линией рассмотрен в [14], в общем случае значение  $M$  является функцией от линейных размеров  $r_i, \Delta r_i, h_i, r_j, \Delta r_j, h_j$  дискретных проводников  $i, j$  и расстоянием между их центрами  $x$ :

$$\begin{cases} M = f(r_i, \Delta r_i, h_i, r_j, \Delta r_j, h_j, x), \\ \mathbf{IND}[i, j] = \mathbf{IND}[j, i] = M. \end{cases} \quad (7)$$

Рассчитаем межслойную электрическую емкость  $C_{mk}$  как совокупность двух последовательно включенных емкостей

$$C'_{mk} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{mk} \frac{h_m}{\ln\left(\frac{r_{mk} + \Delta r_{mk}}{r_{mk}}\right)} \text{ и } C''_{mk} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{mk+1} \frac{h_m}{\ln\left(\frac{r_{mk+1} + \Delta r_{mk+1}}{r_{mk+1}}\right)},$$

$C'_{mk}$  — емкость внутреннего полуслоя,  $C''_{mk}$  — емкость внешнего полуслоя по отношению к площади, разделяющей слои:

$$C_{mk} = \frac{C'_{mk} C''_{mk}}{C'_{mk} + C''_{mk}}. \quad (8)$$

Предложенные способы расчета эквивалентных электрических параметров модели могут варьироваться в зависимости от требований к точности и особенностей численной реализации модели.

**Заключение.** Разработанная модель применима к случаю искусственного возбуждения ионосферы при помощи узконаправленного потока высокочастотного радиоизлучения. В результате моделирования возможно получить трехмерную картину пространственного распределения токов в ионосфере, определить динамику переходных процессов при изменении интенсивности излучения. Предложенная модель позволяет изучать процессы переизлучения и модуляции радиоволн ионосферой, т.е. обратную задачу. На основе предложенной модели возможно изучать некоторые особенности управления модуляцией сигналов при принудительном радиооблучении ионосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rycroft M. J.* Solar-terrestrial energy program: handbook of ionospheric models // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Elsevier Science Publishing Company, Inc., 1998. P. 403—404.
2. Guide to Reference and Standard Ionosphere Models. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. 55 p.
3. *Rasmussen C. E., Schunk R. W.* A three-dimensional time-dependent model of the plasmasphere // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 95. P. 6133—6144.
4. *Смирнов В. М., Смирнова Е. В.* Реконструкция пространственно-временной структуры ионосферы по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. С. 561—566.
5. *Думин Ю. В.* Концентрация носителей заряда в метастабильной плазме с сильной кулоновской неидеальностью // Прикладная физика. 1999. № 5. С. 18—21.
6. *Richmond A. D., Ridley E. C., Roble R. G.* A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamic // Geophys. Res. Lett. 1992. Vol. 19, N 6. P. 601—604.
7. *Голыгин В. А., Сажин В. И., Унучков В. Е.* Коррекция модели ионосферы по данным о максимально-применимых частотах реперных радиолоний // Исследовано в России. 2006 [Электронный ресурс]: <<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/255.pdf>>.
8. *Намгаладзе А. А., Юрик П. Ю.* Математическое моделирование возмущений верхней атмосферы Земли [Электронный ресурс]: <<http://www.rfbr.ru/pics/28326ref/file.pdf>>.
9. *Намгаладзе А. А., Мартыненко О. В., Волков М. А., Намгаладзе А. Н., Юрик П. Ю.* Математическое моделирование крупномасштабных возмущений верхней атмосферы Земли // Моделирование процессов в верхней полярной атмосфере. Апатиты: ПГИ КНЦ РАН, 1998. С. 167—249.
10. *Гусятинский И. А., Немировский А. С., Соколов А. В., Троицкий В. Н.* Дальняя тропосферная радиосвязь. М.: Связь, 1968. 248 с.

11. Хлыбов Е. С., Гаврилов Б. Г., Егоров Д. Е. Модельные исследования ионосферных токов, электрических полей и ускорений заряженных частиц // Сб. тр. XLVII науч. конф. МФТИ. М.: Изд-во МФТИ, 2002.
12. Калинин А. И., Черенкова Е. Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971. 450 с.
13. Демерчан К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники. СПб: Питер, 2006. 576 с.
14. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.

**Сведения об авторах**

- Алексей Юрьевич Гришенцев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: tigerpost@ya.ru
- Анатолий Григорьевич Коробейников** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем

Рекомендована кафедрой  
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию  
16.03.10 г.

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

## ДИСКРЕТНЫЙ ИНТЕГРОДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИЙ ФИЛЬТР С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СГЛАЖИВАНИЕМ ОТСЧЕТОВ ВХОДНОГО СИГНАЛА

Рассмотрен интегродифференцирующий фильтр со взвешенным суммированием промежуточных сумм отсчетов входного сигнала. Показано, что предложенный алгоритм фильтрации по статистическим характеристикам практически не уступает известным алгоритмам и обладает значительно большей вычислительной эффективностью.

**Ключевые слова:** дискретизация сигнала, промежуточное суммирование, дискретная фильтрация, отношение сигнал/шум.

При реализации цифровых фильтров необходимо выполнять значительное количество математических операций умножения и сложения (вычитания), что требует либо быстродействующих вычислителей, либо больших временных затрат на реализацию алгоритма фильтрации. В месте с тем в случае, когда постоянная времени фильтра значительно превышает период следования отсчетов входного сигнала, можно подвергать взвешенному суммированию не каждый отсчет входного сигнала, а их промежуточные суммы. Очевидно, что в этом случае возникают определенные информационные потери, связанные с отклонением амплитудно-частотной характеристики фильтра (АЧХ) от желаемой АЧХ [1].

Целью настоящей работы является создание дискретного интегродифференцирующего фильтра, обладающего высокой вычислительной эффективностью при сохранении качества фильтрации.

Суть предлагаемого метода фильтрации заключается в том, что из последовательности отсчетов входного сигнала  $x[i]$  формируются промежуточные суммы из  $m$  отсчетов

$$x_{\Sigma}[n] = \sum_{i=0}^{m-1} x[nL - i],$$

которые далее с периодом  $T_{\Sigma} = LT$  ( $L \geq m$ ) поступают в дискретный интегродифференцирующий фильтр.

В качестве непрерывного аналога рассматриваемому фильтру рассмотрим фильтр верхних частот с АЧХ вида

$$W(p) = \frac{pT_{\phi}}{1 + pT_{\phi}}, \quad (1)$$

где  $T_{\phi}$  — постоянная времени фильтра,  $p = j\omega$ .

Путем подстановки в (1)  $p = 2(z-1)/T_{\Sigma}(z+1)$  получим следующее выражение для частотной передаточной функции интегродифференцирующего фильтра в плоскости  $z$  [2]:

$$W(z) = \frac{a(1-z^{-1})}{1+bz^{-1}}, \quad (2)$$

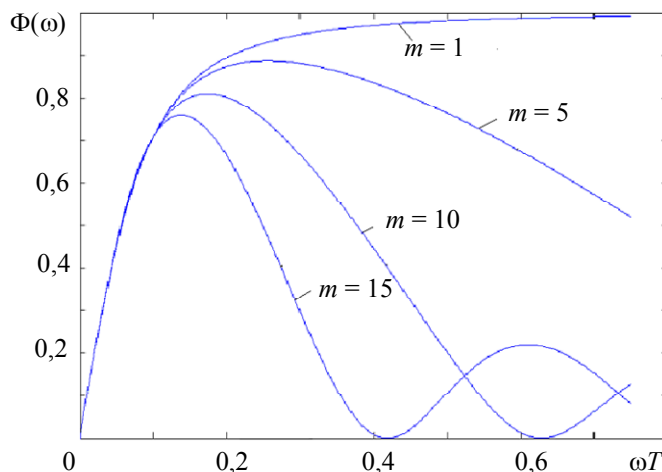
где  $z = e^{pT_{\Sigma}}$ ;  $a = 2T_{\phi}/(T_{\Sigma} + 2T_{\phi})$ ;  $b = (T_{\Sigma} - 2T_{\phi})/(T_{\Sigma} + 2T_{\phi})$ . Передаточной функции (2) будет соответствовать следующее разностное уравнение, определяющее выходной сигнал фильтра:

$$y[n] = a \sum_{i=0}^{m-1} x[nL-i] + a \sum_{i=0}^{m-1} x[nL-i-1] - by[n-1]. \quad (3)$$

Соотношение (2) после несложных преобразований позволяет получить следующее выражение для АЧХ рассматриваемого фильтра:

$$\Phi(\omega) = K \sqrt{\frac{2a^2 \left[ \left( \sum_{i=0}^{m-1} \cos i\omega T \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^{m-1} \sin i\omega T \right)^2 \right] (1 - \cos \omega LT)}{1 + 2b \cos \omega LT + b^2}}.$$

На рисунке показаны нормированные АЧХ интегродифференцирующего фильтра при  $T_{\phi}/T = 10$ ,  $T_{\phi} = 0,001$  с,  $L=m$  для различных значений суммируемых отсчетов входного сигнала  $m$ . Из представленных графиков видно, что промежуточное сглаживание отсчетов входного сигнала приводит к заметному сужению полосы пропускания фильтра. Вместе с тем в диапазоне  $\omega T = 0-0,15$  АЧХ фильтра практически не зависит от числа суммируемых отсчетов входного сигнала.



Для определения статистических характеристик выходного сигнала рассматриваемого фильтра необходимо знать его импульсную характеристику, значения которой в моменты времени  $t_n = nT_{\Sigma}$  можно представить следующим образом [3]:

$$G[n] = c_n,$$



где  $c_0 = a$ ;  $c_1 = -a - b$ ;  $c_2 = -c_1 b$ ;  $c_3 = -c_2 b$ ; ...;  $c_k = -c_k b$  и т.д.

Пусть на входе рассматриваемого интегродифференцирующего фильтра действует аддитивная смесь отсчетов полезного сигнала и помехи, причем полезный сигнал примем в виде последовательности отсчетов гармонического колебания

$$u_c(iT) = U_c \sin(\omega iT)$$

с амплитудой  $U_c$  и частотой  $\omega$ . Отсчеты помехи будем считать некоррелированными с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma_x^2$ . Тогда дисперсию помехи на выходе сумматора, формирующего промежуточные суммы отсчетов входного сигнала, можно найти из выражения

$$\sigma_\Sigma^2 = m\sigma_x^2.$$

При этом дисперсия помехи на выходе фильтра будет равна

$$\sigma_\Phi^2 = \sum_{i=0}^{\infty} \sigma_\Sigma^2 G^2(iTL), \quad (4)$$

где  $G(t_i)$  — значения импульсной характеристики в моменты времени  $t_i = iTL$ .

Средняя мощность полезного сигнала на выходе фильтра будет определяться соотношением

$$P_c = \overline{\left[ \sum_{i=0}^{\infty} u_{c\Sigma}(t_i) G(iTL) \right]^2}, \quad (5)$$

где черта сверху означает усреднение по времени,

$$u_{c\Sigma}(t_i) = \sum_{k=0}^{m-1} U_c \sin \omega T(iL + k). \quad (6)$$

В результате отношение сигнал/шум на выходе фильтра принимает вид

$$q = \frac{P_c}{\sigma_\Phi^2} = \frac{\overline{\left[ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} U_c \sin \omega T(iL + k) G(iLT) \right]^2}}{\sum_{i=0}^{\infty} \sigma_\Sigma^2 G^2(iLT)}. \quad (7)$$

Для интегродифференцирующего фильтра без промежуточного сглаживания отсчетов входного сигнала дисперсию помехи, среднюю мощность выходного сигнала и отношение сигнал/помеха можно записать в виде

$$(\sigma_\Phi^*)^2 = \sum_{i=0}^{\infty} \sigma_x^2 G^2(iT); \quad P_c^* = \overline{\left[ \sum_{i=0}^{\infty} u_c(iT) G(iT) \right]^2}; \quad (8)$$

$$q = \frac{P_c^*}{(\sigma_\Phi^*)^2} = \frac{\overline{\left[ \sum_{i=0}^{\infty} u_c(iT) G(iT) \right]^2}}{\sum_{i=0}^{\infty} \sigma_x^2 G^2(iT)}. \quad (9)$$

Рассмотрим наиболее часто встречающийся на практике случай, когда постоянная времени фильтра  $T_\Phi$  значительно превышает период следования  $T_\Sigma = LT$  промежуточных сумм отсчетов входного сигнала. При этом в соотношениях (4)—(9) можно без заметных погрешностей перейти от сумм к интегралам

$$\sigma_\Phi^2 = \frac{m\sigma_x^2}{LT} \int_0^{\infty} G^2(t) dt; \quad P_c = \frac{U_c^2}{(LT)^2} \overline{\left[ \int_0^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} \sin \omega(t + kT) G(t) dt \right]^2};$$

$$(\sigma_{\phi}^*)^2 = \frac{\sigma_x^2}{T} \int_0^{\infty} G^2(t) dt; \quad P_c^* = \frac{U_c^2}{T^2} \left[ \int_0^{\infty} \sin \omega t G(t) \right]^2.$$

Из представленных на рисунке нормированных АЧХ фильтров следует, что в диапазоне  $\omega T = 0—0,15$  коэффициенты передачи фильтра практически совпадают. Поэтому для данного диапазона частот можно без существенной погрешности записать, что

$$P_c = m^2 P_c^* / L^2.$$

Тогда выигрыш в отношении сигнал/шум для фильтра без промежуточного сглаживания по сравнению с рассматриваемым интегрирующим фильтром составит

$$d = \frac{P_c^* / (\sigma_{\phi}^*)^2}{P_c / \sigma_{\phi}^2} = \frac{L}{m}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) видно, что при количестве суммируемых отсчетов  $m=L$  предлагаемый дискретный интегрирующий фильтр по своим статистическим характеристикам практически не уступает интегрирующему фильтру без промежуточного сглаживания.

В качестве примера положим период поступления отсчетов входного сигнала  $T=100$  мкс, количество суммируемых импульсов  $m=10$  и  $L=m$ . В данном случае при реализации дискретного интегрирующего фильтра без промежуточного сглаживания за одну секунду необходимо выполнить 30 000 операций суммирования и 30 000 операций умножения. При реализации предлагаемого алгоритма дискретной фильтрации с промежуточным сглаживанием за одну секунду необходимо выполнить 30 000 операций суммирования и всего 3000 операций умножения без заметной потери качества фильтрации.

Полученные в работе математические соотношения носят общий характер и могут быть использованы для дискретных фильтров с практически любой импульсной характеристикой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
2. Бесекерский В. А. Цифровые автоматические системы. М.: Наука, 1976. 575 с.
3. Зиатдинов С. И., Осипов Л. А. Нерекурсивные алгоритмы оценки параметров сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 3. С. 19—22.

#### Сведения об авторе

**Сергей Ильич Зиатдинов**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: kaf53@guar.ru

Рекомендована кафедрой  
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию  
08.07.09 г.

В. А. ГОЛОВКОВ, С. В. СОЛК

## ОДНОЭЛЕМЕНТНЫЙ ТЕРМОДЕТЕКТОР

Рассматриваются принципы построения простых одноэлементных термодетекторов для обнаружения биологических объектов на фоне природных образований. Предложено в качестве фотоприемника использовать термоэлементы, что позволяет отказаться от механического или ручного сканирования тепловой цели. Приведена методика расчета дальности обнаружения различных биологических объектов (в частности, человека). Рекомендована элементная база для реализации оптической и электронной частей термодетектора.

**Ключевые слова:** термодетектор, термоэлемент, дрейф сигнал, обнаружительная способность, оптическая схема, испытательный стенд, оптические материалы.

Цель настоящей работы — проектирование, изготовление и испытание прибора, функционирование которого не требует ручного или механического сканирования.

Термодетекторы, предназначенные для использования службами спасения, должны иметь минимально возможные массу и габариты и устойчиво работать при изменении температуры окружающей среды. Приемник излучения должен иметь минимальный дрейф, чтобы позволить в течение продолжительного времени обнаруживать теплые объекты без необходимости осуществлять ручное сканирование местности или частую принудительную калибровку. Требования к быстрдействию термодетектора не столь важны, они определяются реакцией человека и могут составлять десятые доли секунды, что позволяет использовать накопленный сигнал, для уменьшения влияния изменяющейся температуры внешней среды приемник должен быть адаптивным.

Из существующих типов тепловых приемников излучения [2] наиболее удобны в использовании термоэлементы, которые оснащаются термосопротивлениями для оценки температуры холодных спаев, что позволяет производить их адаптацию при изменении температуры окружающей среды и компенсировать дрейф. Для усиления сигнала в термодетекторе целесообразно использовать операционные усилители (ОУ), имеющие малый фликкершум, так как работа термодетектора осуществляется в области сигналов низкой частоты. Сигналы можно обрабатывать с помощью недорогих микроконтроллеров и сообщать об обнаружении тепловой цели с помощью шкалы светодиодов, как и в известных термодетекторах.

Нами исследовался термоэлемент MLX90247, выпускаемый фирмой Melexis. Рабочий спектральный диапазон термоэлемента  $7,5 \leq \lambda \leq 13,5$  мкм, чувствительная площадка термоэлемента размером  $1,2 \times 1,2$  мм, спектральная величина шума термоэлемента  $v = 32$  нВ/Гц<sup>1/2</sup>.

Поскольку температура кожи человека  $32$  °С [3], то

$$\Delta\Phi = \frac{\sigma T^3 \Delta T A_{\text{ист}} D^2}{R^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\Phi$  — приращение величины потока излучения от источника (обнаруживаемого объекта),  $A_{\text{ист}}$  — площадь источника излучения,  $R$  — расстояние до объекта,  $\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-12}$  Вт·см<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup>),  $T$  — радиационная температура источника,  $D$  — диаметр объектива приемника. Приращение сигнала  $\Delta U = \Delta\Phi S$ , где  $S$  — чувствительность

приемника, среднеквадратичная величина шума приемника  $v\sqrt{\Delta f}$ , тогда отношение сигнал/помеха:

$$\rho = \frac{\Delta U}{v\sqrt{\Delta f}},$$

( $\Delta f$  — энергетическая полоса частот усилителя после приемника) при этом, используя выражение (1), получим:

$$\rho = \frac{S\sigma T^3 \Delta T A_{\text{ист}} D^2}{R^2 v \sqrt{\Delta f}}.$$

Отсюда получим разность значений температуры объектов типа абсолютно черное тело (АЧТ), которую может обнаружить термодетектор:

$$\Delta T = \frac{\rho R^2 v \sqrt{\Delta f}}{S\sigma T^3 A_{\text{ист}} D^2}. \quad (2)$$

Оценим разность  $\Delta T$ , которую может обнаружить термодетектор на базе термоэлемента MLX90247. Поскольку речь идет об обнаружении объекта в режиме ручного поиска, то при отношении сигнал/помеха  $\rho = 10\text{—}12$  вероятность обнаружения теплового объекта будет достаточно велика, для  $R = 200$  м,  $A_{\text{ист}} = 400$  см<sup>2</sup> (примерно площадь человеческого лица),  $\Delta f = 3$  Гц,  $D = 6$  см получим из (2)  $\Delta T = 10$  К. На расстоянии 100 м получим различаемую разность температур  $\Delta T \approx 2,5\text{—}3$  К.

Если заданы не величина  $S$  и  $v$ , а удельная обнаружительная способность  $D^*$  [см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт] и площадь приемника  $A_{\text{пр}}$  [3], тогда очевидно соотношение:

$$D^* = \frac{S\sqrt{A_{\text{пр}}}}{v},$$

выражение (2) преобразуется к виду

$$\Delta T = \frac{\rho R^2 \sqrt{A_{\text{пр}} \Delta f}}{D^* \sigma T^3 A_{\text{ист}} D^2}.$$

Поле зрения объектива определяет точность наведения на цель и динамический диапазон работы термодетектора, который можно представить как  $\Delta\Phi/\Phi$  — приращение потока от объекта по отношению к фоновому излучению. Величина  $\Delta\Phi/\Phi$  должна быть ориентировочно не меньше  $10^{-3}$ , иначе на фоне большого сигнала будет затруднено обнаружение малого. Наиболее неблагоприятный вариант возникает, когда АЧТ малых размеров появляется на фоновом АЧТ с меньшей температурой. Определим поток от фоновой поверхности:

$$\Phi = \frac{MA_{\Phi} A_0}{\pi R^2} = \frac{\sigma T^4 \pi D^2 \left(\text{tg} \frac{\gamma}{2}\right)^2}{4},$$

где  $A_0$  — площадь объектива,  $A_{\Phi}$  — площадь фоновой поверхности на расстоянии  $R$ ,  $M$  — светимость фоновой поверхности,  $\gamma$  — двойной (полный) угол зрения объектива. Из выражения (2) получим соотношение для  $\gamma$ :

$$\gamma = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Phi}{\Delta\Phi} \frac{4\Delta T A_{\text{ист}}}{\pi R^2 T}}$$

Тогда для расстояния 100 м при разрешаемой разности температур  $\Delta T \approx 3$  К, величине  $\Delta\Phi/\Phi = 10^{-3}$ ,  $A_{\text{ист}} = 400$  см<sup>2</sup> и температуре фонового АЧТ  $T = 300$  К получим  $\gamma \approx 1^\circ$ . Возможность обнаружения биологических объектов в других природных условиях, на фоне серых тел с меньшей излучательной способностью, выше, так как температурный контраст возрастает, а при одной и той же температуре серого тела и АЧТ эквивалентная радиационная температура серого тела может быть ниже [4]. Это предполагает существование теплового контраста между биологическими объектами и окружающей средой.

Летом, в ночных условиях, температура подстилающей поверхности всех разновидностей редко превышает 20 °С [4], что создает еще больший температурный контраст.

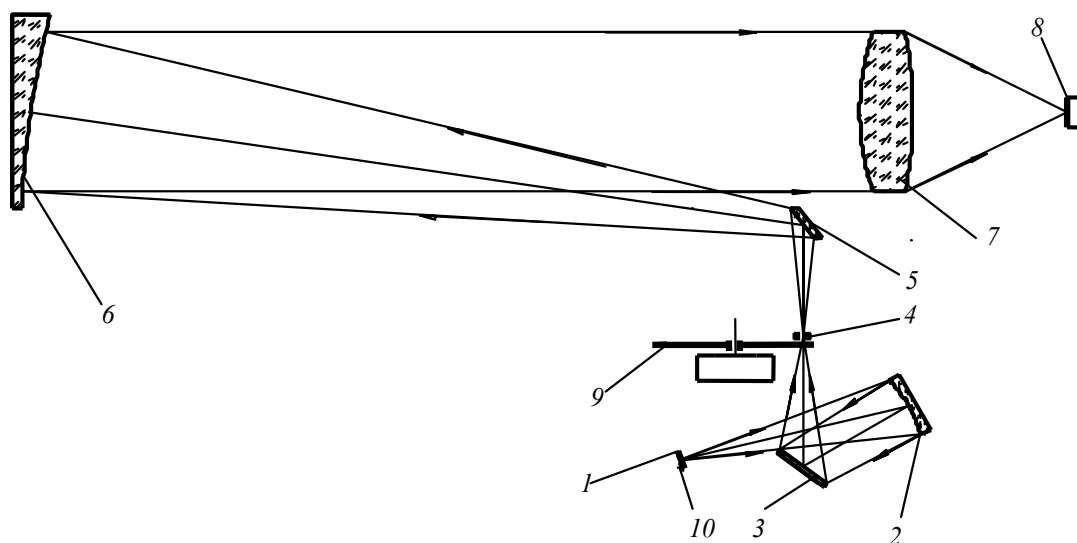
При использовании на местности термодетектора целесообразно провести его калибровку путем наведения на участок „холодной“ местности, где гарантированно отсутствуют биологические объекты, например на листву деревьев или на небо. При этом светодиодная шкала должна быть выставлена примерно посередине. После этого термодетектором можно сканировать участки местности и оценивать их тепловой контраст.

Нами был создан макет термодетектора на базе термоэлемента MLX90247, микропроцессора ADuC812 с частотой кварца 11 МГц, светодиодной шкалой из 8 светодиодов, питанием от батарейки 9 В типа Крона и двухзеркальным объективом с диаметром входного зрачка 60 мм. В термодетекторе использовались операционные усилители с малым уровнем фликкер-шума типа AD8628. При калибровке термодетектора на „холодной“ местности автоматически включались 3 светодиода младших разрядов. Как показали результаты предварительных испытаний, в дневное время в условиях мелколесья человек уверенно обнаруживается на расстоянии около 100 м при температуре окружающей среды около 15 °С.

В данной работе нами использовался объектив Ньютона с диаметром входного зрачка 70 мм, фокусным расстоянием 100 мм и коэффициентом экранирования порядка 0,5. Пропускание объектива в диапазоне 7,5—13,5 мкм составляло 93 %, а концентрация энергии составляла 84 % в пятне диаметром 0,3 мм. Испытания оптической системы совместно с приемниками различных типов проводились в несколько этапов. На первом этапе использовался коллиматорный стенд (см. рисунок). Источник инфракрасного излучения 1, в качестве которого был использован керамический излучатель, с помощью зеркального конденсора 2 и плоского зеркала 3 проецировался на тест-объект 4 (круглая диафрагма) установленной в фокальной плоскости внеосевой параболы 6 зеркального коллиматора (5 — диагональное плоское зеркало). Объектив 7 создавал изображение тест-объекта в своей фокальной плоскости, с которой совмещается чувствительная поверхность фотоприемника 8. В зависимости от принципа работы фотоприемного устройства в оптическую схему может быть включен механический модулятор потока излучения 9. Температура керамического излучателя контролировалась контактным способом с помощью термопары 10. Диаметр диафрагмы зависел от площади и расстояния до обнаруживаемого объекта и имитировал его угловой размер. Значение температуры керамического излучателя отличалось от значения реальной температуры обнаруживаемого объекта и служило для качественного сравнения различных вариантов прибора.

На втором этапе определялась минимальная разрешаемая разность температур  $\Delta T$  между объектом и фоном. На требуемом расстоянии от прибора помещался экран с равномерным фоном при  $T_\Phi$ . Размер экрана превышал линейное поле зрения оптической системы. Перед экраном помещался объект с переменной температурой  $T_0$ , площадь которого была равна площади обнаруживаемого объекта, при этом  $\Delta T = T_0 - T_\Phi$ . Исследования проводились в измерительном зале при нормальных условиях.

На третьем этапе измерения проводились в реальных условиях на полигоне при различной температуре окружающей среды, в дождь и туман, а также при других условиях, усложняющих работу прибора. В качестве обнаруживаемых целей использовались как биологические (люди, животные) объекты, так и техногенные (автомобили).



Простейшие термодетекторы на базе одиночных фотоприемников целесообразно реализовывать, используя термоэлементы, что позволяет работать в статическом режиме, обнаруживая цель и удерживая ее в поле зрения без использования механических модуляторов или ручного сканирования. Для обработки сигналов в термодетекторе целесообразно применять простые однокристалльные микропроцессоры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров А. Ф., Иванов В. М. Современные зарубежные тепловизионные приборы // Оптик. журн. 2003. Т. 70, № 10. С. 62—71.
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
3. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 696 с.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии: Пер. с нем. М.: Мир, 1988. 343 с.

#### Сведения об авторах

- Владимир Алексеевич Головков** — канд. техн. наук; НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый бор, Ленинградская обл.; старший научный сотрудник; E-mail: golovkov\_ggg@mail.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — канд. техн. наук; НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, Сосновый бор, Ленинградская обл.; начальник научно-производственного отдела ИК-оптики; E-mail: solk@sbor.net

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию  
07.04.09 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.7

О. А. ГАВРИЛИНА, С. В. ДУБИНИН

## РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЭТАПАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЯ

Рассматривается пример реализации информационной модели многоконфигурационной оптической системы. Модель реализуется в виде базы данных, в которой хранятся конструктивные параметры и другая информация, необходимая для моделирования. Для работы с моделью предусмотрено пользовательское приложение, позволяющее производить импорт и экспорт данных между различными системами автоматизированного проектирования.

*Ключевые слова:* информационная модель, единое информационное пространство, информационная поддержка изделий, оптические системы, функциональное проектирование, конструирование, базы данных.

**Введение.** В современных условиях для достижения конкурентных преимуществ в разработке изделий становится необходимым обмен данными о них между различными системами автоматизированного проектирования (САПР). Подобные системы содержат результаты проектирования в собственных структурах данных. В связи с необходимостью преобразования данных одной системы в форму, понятную другим системам, были предложены несколько стандартных форматов для хранения данных технических требований [1]. Одни из самых известных — IGES, DXF и STEP (последний наиболее привлекателен). Но специфика оптического прибора заключается в том, что помимо механических он содержит оптические детали, имеющие уникальные оптические параметры. В настоящее время группа специального комитета ISO работает над протоколом NODIF, который является частью формата STEP и содержит правила описания оптической системы, но, к сожалению, работа над этим протоколом пока не завершена.

В ходе разработки изделия становится очевидным, что недостаточно для достижения конкурентоспособности использования только стандартного формата обмена данными. Наиболее перспективным способом повышения конкурентоспособности является информационная поддержка жизненного цикла изделий (ИПИ). Она основана на использовании единого информационного пространства, обеспечении единообразных способов управления процессами и взаимодействия участников жизненного цикла в соответствии с требованиями международных стандартов. Главный принцип такой концепции заключается в том, что информация, однажды появившаяся на каком-либо этапе жизненного цикла, сохраняется в едином информационном пространстве и становится доступной всем участникам этого и других этапов, которые могут находиться на значительном расстоянии друг от друга [2].

В настоящей работе единое информационное пространство реализуется в виде информационной системы, ядром которой является информационная модель изделия, представленная в виде базы данных, структура которой была разработана на кафедре прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики [3]. Система должна предоставлять возможность импорта и экспорта данных в различные форматы САПР.

**Информационная модель оптической системы на этапе проектирования.** Оптическая система как объект проектирования в зависимости от ветви проектирования может быть представлена различными моделями. В частности, конструкционная модель оптической системы состоит, как правило, из значений параметров оптических сред, параметров формы оптических поверхностей, параметров взаимного расположения поверхностей и параметров диафрагм. Кроме того, для проектирования современных оптических систем необходимо предусмотреть возможность работы с многоконфигурационными системами, т.е. обеспечить динамическое изменение конструктивных параметров, а также изменение состава оптической системы в процессе функционирования.

Анализ различных типов многоконфигурационных оптических систем показал, что наиболее простой и эффективный способ описания конструкции таких систем — введение понятия базовой конфигурации. Базовая конфигурация состоит из максимально необходимого числа поверхностей. Описание каждой отдельной конфигурации рассматривается как внесение изменений в базовую конфигурацию. Такой подход обеспечивает удобное описание многоконфигурационных оптических систем с подвижными компонентами и систем, работающих с изменяющимися присоединительными характеристиками. Для его реализации было необходимо разработать структуру данных для описания модели оптической системы на этапе функционального проектирования.

Структура данных во многом определяется технологией и инструментами, которые используются для автоматизации проектирования оптических систем. Анализ показал, что удобней и целесообразней всего использовать объектно-ориентированный подход к организации структуры данных, который предназначен для проектирования, реализации и анализа сложных программных систем (состоящих из взаимозависимых подсистем, которые, в свою очередь, могут быть разделены на подсистемы и т.д.). Основные свойства объектно-ориентированного подхода позволяют удовлетворить наиболее значимым требованиям, предъявляемым к структуре данных для хранения конструктивных параметров.

В настоящей работе рассматривается объектно-ориентированная конструкционная модель оптической системы, в которой в качестве элементарного объекта выбран оптический преобразователь. Можно выделить два типа оптических преобразователей:

- оптический узел, который описывает оптический элемент и его расположение;
- направляющая, которая связывает последующий и предыдущий узлы и описывает среду между ними.

Конструкционная модель многоконфигурационной оптической системы должна содержать описание тех параметров, которые требуется изменить при формировании конструкции отдельной конфигурации. Как правило, такое описание осуществляется посредством таблицы.

В процессе конструирования оптическая система представляется состоящей из оптических деталей, определенным образом расположенных в пространстве посредством закрепления их в оправках. Структуру модели на этапе конструкторского проектирования определяет ЕСКД (ГОСТ 2.052-2006, ГОСТ 2.053-2006).

На этапе технологического проектирования модель оптической системы содержит информацию о деталях и сборочных единицах, информацию о технологических процессах изготовления системы, информацию об оборудовании и средствах технологического оснащения.



Разработанная структура информационной модели оптической системы на этапе проектирования представлена на рис. 1. Она включает в себя функциональную модель, которая описывает:

- конструкцию оптической системы (форму, взаимное расположение оптических поверхностей, диафрагм и экранов, характеристики оптических сред);
- присоединительные характеристики (параметры предмета и изображения, зрачковые присоединительные характеристики);
- спектральные характеристики.

Описание конструкции оптической системы выделено в отдельную конструкционную модель, легко преобразующуюся в геометрическую, которая используется на этапах конструирования и технологического проектирования.

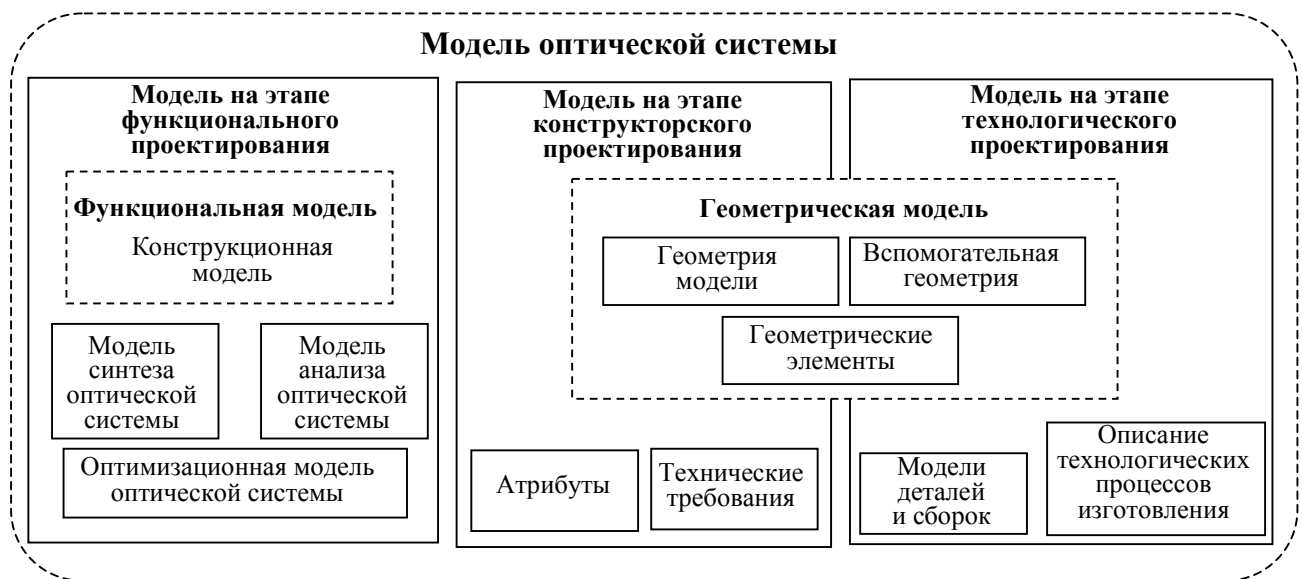


Рис. 1

Конструкционная модель является основой для выполнения процедур синтеза, анализа и оптимизации. При их выполнении требуются дополнительные параметры и функции.

Основу модели на этапах конструкторского и технологического проектирования составляет геометрическая модель изделия, которая по мере выполнения проектных операций заполняется атрибутами, техническими требованиями, моделями деталей и сборок, описанием технологических процессов.

Информационная модель оптической системы имеет следующие особенности:

- конструкция оптической системы на этапе функционального проектирования описывается специальной конструкционной моделью;
- геометрическая модель является общей для этапов конструкторского и технологического проектирования и определяется ЕСКД;
- в нее также входит дополнительная информация, необходимая для выполнения проектных операций.

При организации единого информационного пространства хранение всей возможной информации в различных видах организуется с использованием технологий баз данных. При этом системы управления базами данных (СУБД) предоставляют только инструменты для непосредственного управления данными (создания структуры данных, внесения и удаления, поиска и выбора данных) и управления последовательностями операций над базой данных (транзакциями). Для хранения информации о проектируемом объекте необходимо разработать и создать структуру данных. Эта структура данных должна быть универсальной и пригодной для реализации в универсальных СУБД/PDM-системах.

Основой для реализации структуры базы данных в СУБД/PDM-системе является инфологическая модель предметной области, т.е. модель оптической системы. Она разработана на основе объектно-ориентированной конструкционной модели. Основными элементами инфологической модели являются выявленные на этапе анализа объекты (сущности), связи между ними и их свойства (атрибуты).

Разработка изделия осуществляется в рамках проекта, который составляют организационные мероприятия, проектные операции и процедуры, сопроводительная документация. В информационной модели проект реализуется сущностью PROJECT, атрибутами которой являются идентификатор проекта (ID), имя проекта, информация об авторах, комментарии (пояснения, дополнительная информация), язык описания (кодировка).

Вся сопроводительная документация реализуется сущностью DOCUMENT, которая содержит идентификатор, атрибут ID\_PROJECT, указывающий на проект, к которому относится данный документ. Связь непосредственно с документом осуществляется через атрибут LINK. В состав данной сущности входят информация об авторе документа, дата создания или последнего редактирования документа.

Сущность OSYSTEM описывает оптическую систему. Атрибутами являются идентификатор оптической системы, идентификатор проекта, который указывает на принадлежность оптической системы проекту и имя (название) оптической системы.

Элементы оптической системы описываются универсальной сущностью OUNIT. Она имеет следующие атрибуты: собственный идентификационный номер и атрибут TYPE\_UNIT, поясняющий тип элемента (источник, предмет, узел и так далее).

Детали оптической системы реализуются сущностью OPART. Деталь связана с оптической системой атрибутом ID\_OSYSTEM. Для описания состава детали используется сущность COMPOSITION. Она показывает, какой элемент (ID\_OUNIT) оптической системы является частью детали (ID\_OPART).

Сущность VALUEPAR связана с универсальным параметром (OPARAMETER). Идентификационные номера элементов и параметров устанавливают соответствующие связи между ними. Атрибут STRING\_VALUE хранит значение параметра в строковом виде, DOUBLE\_VALUE — в вещественном. Атрибут INDEX\_VALUE обозначает порядковый номер величины при использовании набора однотипных параметров. Атрибутами OPARAMETER являются также название этого параметра и его единицы измерения.

Возможные конфигурации оптической системы описываются сущностью OCONFIG. Ее атрибутами являются идентификатор конфигурации (ID\_OCONFIG), имя конфигурации и идентификатор, указывающий на оптическую систему, к которой относится данная конфигурация.

Структура конкретной конфигурации описывается сущностью OSTRUCT. Атрибуты OSTRUCT устанавливают взаимосвязи между конфигурацией (ID\_OCONFIG) и элементами оптической системы (ID\_OUNIT), входящими в данную конфигурацию. Атрибут INDEX\_UNIT обозначает порядковый номер элемента в системе при многократном повторении (при использовании один раз равен нулю).

Сущность OSTATE, описывающая состояние конфигурации, имеет в качестве атрибутов собственный уникальный идентификационный номер и уникальный идентификационный номер конфигурации (ID\_OCONFIG), указывающий, к какой конфигурации относится данное состояние.

Изменения в конфигурации описываются сущностью OVARIABLE. Атрибут ID\_OSTATE указывает, к какому состоянию конфигурации относится данное изменение, а атрибут ID\_VALUEPAR устанавливает связь с конкретным значением измененного параметра.

Следует отметить, что при реализации модели в СУБД таблица VALUEPAR будет иметь большие размеры, что существенно снизит скорость выполнения запросов. Эта проблема может быть решена оптимизацией самих запросов или разделением таблицы VALUEPAR на несколько таблиц по типу параметров (параметры узлов, предмета, изображения и т.д.).

Разработанная инфологическая модель является универсальной, т.е. не зависит от типа и особенностей оптической системы, и расширяемой, что обеспечивает возможность добавления новых элементов и параметров в соответствующие сущности.

**Реализация информационной системы в виде пользовательского приложения.** Инфологическая модель оптической системы была реализована в виде базы данных в СУБД Firebird [4]. Программа предоставляет возможность как импорта, так и экспорта различных форматов САПР в базу данных оптических систем (БД).

Разработчик сохраняет оптическую систему в собственном формате программы, в которой происходит работа. Затем, с помощью данного приложения, происходит импорт оптической системы в БД.

Программа предоставляет возможность просматривать содержимое БД, а также производить экспорт и импорт данных об оптических системах в форматы, распознаваемые программами OPAL, ZEMAX, AutoCAD и Компас. Есть возможность непосредственно указывать входной и выходной файлы, с которыми будет производиться работа. В программе заложена возможность работы в режиме „клиент-сервер“ для реализации работы группы разработчиков, т.е. данное приложение может быть установлено на компьютерах локальной сети предприятия и работать с удаленным сервером, на котором находится БД.

Рассмотрим программу на примере объектива-апохромата, информация о котором была импортирована в БД из программы OPAL.

В результате экспорта данной системы из БД были получены файлы в форматах DXF и ZMX. На рисунках представлены экранные формы программ с загруженной оптической системой: рис. 2 — результат обмена данными с программой Zemax; рис. 3 — с программой AutoCAD; рис. 4 — с программой Компас.

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
0B0	Standard		Infinity	Infinity		0.000000 U	0.000000
1*	Standard		-4.365000 V	3.000000	BK6	0.470000 U	0.000000
2*	Standard		-2.089000 V	0.100000	0	2.080000 U	0.000000
3*	Standard		156.309998 V	1.000000	OF4	3.400000 U	0.000000
4*	Standard		10.520000 V	3.700000	FLUORIT	4.000000 U	0.000000
5*	Standard		-5.546000 V	2.900000	0	4.400000 U	0.000000
6*	Standard		13.002000 V	2.700000	FLUORIT	6.150000 U	0.000000
7*	Standard		19.907000 V	1.400000	OF4	6.150000 U	0.000000
8*	Standard		12.134000 V	5.300000	FLUORIT	6.050000 U	0.000000
9*	Standard		-17.257999 V	0.300000	0	6.200000 U	0.000000
10*	Standard		19.634001 V	4.500000	FLUORIT	6.000000 U	0.000000
11*	Standard		-11.588000 V	1.400000	OF4	5.600000 U	0.000000
12*	Standard		-33.959999 V	0.300000	0	5.400000 U	0.000000
13*	Standard		9.419000 V	1.400000	OF4	5.000000 U	0.000000
14*	Standard		4.487000 V	4.200000	FLUORIT	4.000000 U	0.000000
15*	Standard		18.923000 V	5.000000	0	3.600000 U	0.000000
16*	Standard		-8.670000 V	7.000000	TF4	2.700000 U	0.000000
17*	Standard		-4.446000 V	3.000000	OF4	2.900000 U	0.000000
18*	Standard		240.399994 V	Infinity	0	2.800000 U	0.000000
ST0	Standard		Infinity	0.000000		0.000000 U	0.000000
IMA	Standard		Infinity	-		0.000000 U	0.000000

Рис. 2

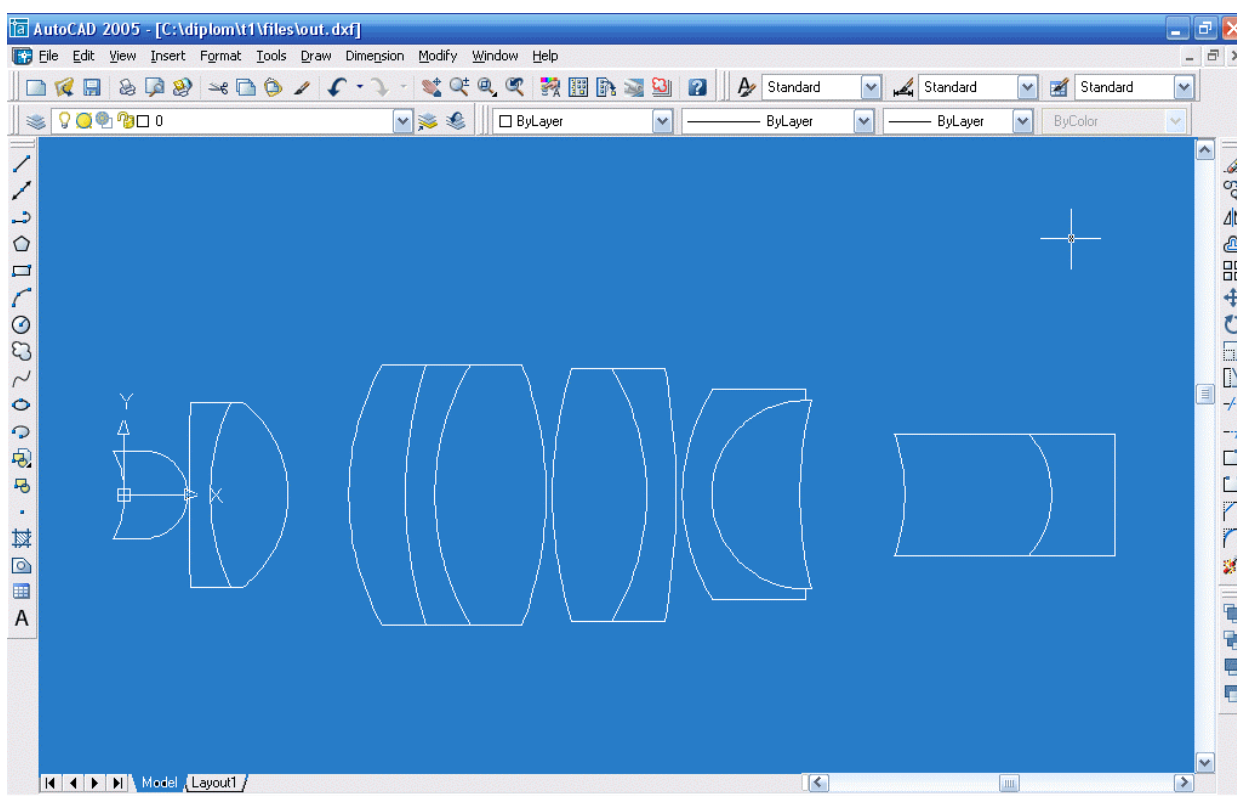


Рис. 3

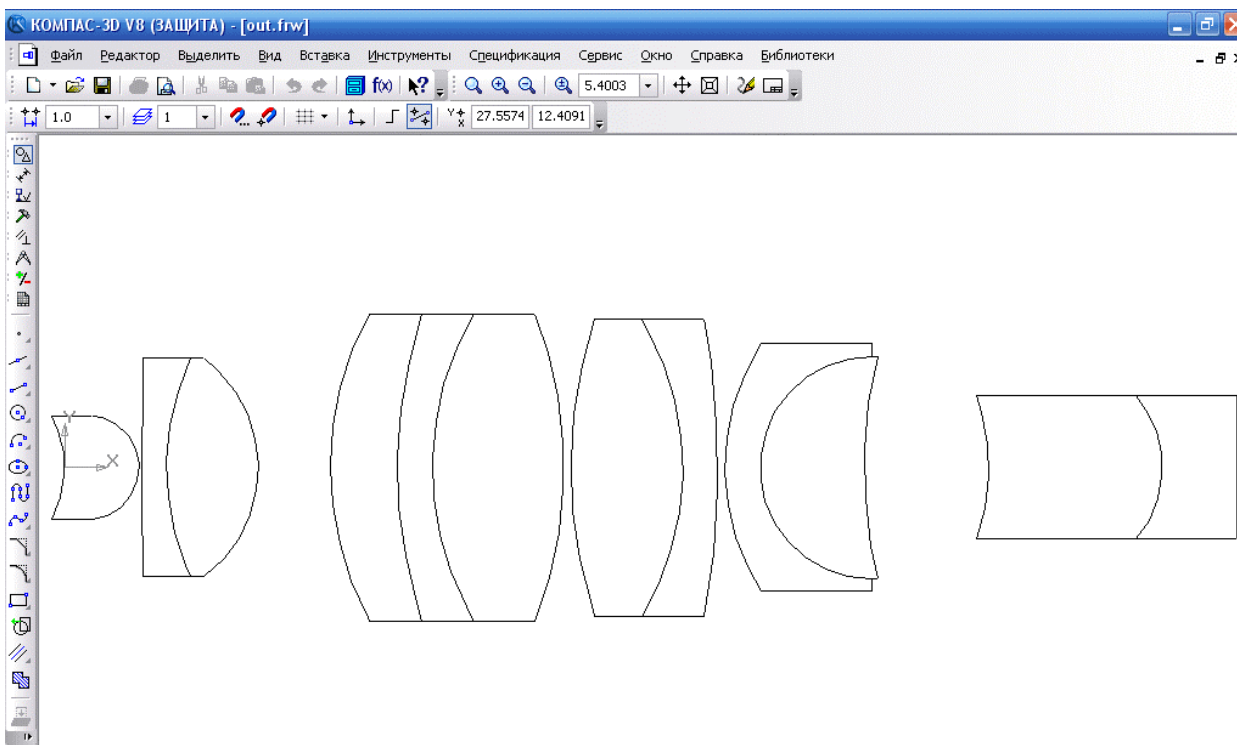


Рис. 4

**Заключение.** Разработанная программа реализует на практике информационную модель оптической системы как ядро единого информационного пространства, являясь лишь первым, но наиболее важным этапом по внедрению ИПИ-технологий в оптическое приборостроение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). СПб: Питер, 2004. 560 с.
2. ИПИ (CALS) технологии. Основные сведения [Электронный ресурс]: <<http://www.rtc.ru/ipi/index.shtml>>.
3. Шехонин А. А., Домненко В.М., Гаврилина О.А. Информационная модель оптической системы на этапе функционального проектирования // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 7. С. 63—67.
4. Firebird — The RDBMS that's going where you're going [Electronic resource]: <<http://www.firebirdsql.org>>.

#### Сведения об авторах

- Ольга Алексеевна Гаврилина** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: GavrulinaOA@aco.ifmo.ru
- Сергей Викторович Дубинин** — магистр; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: serge2603@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
07.05.09 г.

УДК 535.4

Л. В. ТЫМКУЛ, В. М. ТЫМКУЛ

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ В ПРОИЗВОЛЬНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

Предлагаются методика, математическое обеспечение и структура алгоритма компьютерного моделирования работы приборов ночного видения в произвольно поляризованном свете.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, прибор ночного видения, поляризованный свет.

Вопросам разработки теории математических и компьютерных моделей функционирования приборов ночного видения (ПНВ) посвящен ряд работ [1—5]. Так, в статье [1] рассмотрена теория формирования яркости изображения объектов и фона на экране ПНВ активного и пассивного типов в приближении геометрической оптики. В этой же работе получены выражения для абсолютного и относительного контраста изображения объектов на экране ПНВ, следует отметить, что авторам удалось вполне точно отразить основные функциональные составляющие оптического излучения, которые формируют суммарную яркость изображения объектов и фона на экране ПНВ пассивного и активного типа.

Для использования теории линейных систем при расчете характеристик ПНВ в статьях [2, 3] нами на основе положений физической оптики разработаны теория и математическая модель функционирования ПНВ активного и пассивного типа в неполяризованном свете. В этих работах получены математические модели пространственно-частотных спектров (ПЧС)

яркости изображения объектов и фона, а также аналогичные спектры абсолютного и относительного контраста объектов, на основании которых представлена методика расчета дальности действия и разрешения ПНВ. В статье [4] представлена математическая модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном свете. В работе [5] рассмотрена модель структурного описания ПНВ и проведена компьютерная оценка дальности распознавания объектов наблюдения.

Интерес к анализу возможностей и моделированию работы поляризационных ПНВ вызван в основном двумя факторами, которые сформулированы в работе [4]. Согласно этой статье, первый фактор связан с возможностью повышения наблюдаемого контраста в поляризованном свете за счет подавления поляризационным фильтром уровня излучения фона. Это позволяет увеличить дальность действия и распознавания ПНВ. Однако имеет место и другой, противоположный, фактор — энергия оптического излучения при прохождении через поляризационный фильтр в виде линейных поляризаторов и фазовых пластинок снижается. Это может привести к уменьшению дальности действия и распознавания. Очевидно, что сопоставление этих двух противоположных факторов и формирует суммарный (положительный/отрицательный) эффект функционирования поляризационных ПНВ.

В этой связи целью настоящей статьи является разработка методики компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в произвольно поляризованном свете.

В основу компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в произвольно поляризованном свете заложены теория и математические модели работы этих приборов в поляризованном и неполяризованном свете [2—4]. Согласно этим работам, математические модели работы ПНВ пассивного типа содержат следующие информационные соотношения:

— для модуля пространственно-частотного спектра (ПЧС) яркости изображения объекта  $L_o(v, \mu)$  и фона  $L_\phi(v, \mu)$  на экране ПНВ в произвольно поляризованном свете;

— для модуля ПЧС абсолютного  $\Delta L(v, \mu)$  и относительного  $K(v, \mu)$  контраста в изображении объектов на экране ПНВ в произвольно поляризованном свете;

— составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта, формирующегося за счет подсветки излучением неба  $L_{он}(v, \mu)$  и Луны  $L_{ол}(v, \mu)$ ;

— составляющие модуля ПЧС яркости изображения фона, формирующегося за счет подсветки излучением неба  $L_{фн}(v, \mu)$  и Луны  $L_{фл}(v, \mu)$ ;

— выражение для модуля ПЧС яркости рассеянного излучения слоя атмосферы  $L_c(v, \mu)$  между объектом и прибором;

— для частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) оптической системы ПНВ  $h_{опт}(v, \mu)$  и электронно-оптического преобразователя (ЭОП)  $h_{эоп}(v, \mu)$ ;

— для модуля ПЧС яркости темнового свечения экрана  $L_3(v, \mu)$  как внутренней помехи;

— выражения, связывающие пространственные частоты  $v$  и  $\mu$  разрешаемых элементов в пространстве изображений по координатам  $x$  и  $y$  с критическими размерами объекта  $a_x$  и  $a_y$ , фокусным расстоянием объектива ПНВ  $f'$ , линейным увеличением ЭОП  $V'$ , дальностью  $l$  и числом периодов  $N_p$  пространственной миры, разрешаемых вдоль критического размера объекта.

На основе работ [2—4] указанные соотношения в математических моделях имеют следующий вид:

$$L_o(v, \mu) = \left\{ \left[ L_{он}(v, \mu) + L_{ол}(v, \mu) \right] \left[ 1 + P_o \cos 2(t_o - \alpha) \right] + L_c(v, \mu) \left[ 1 + P_\phi \cos 2(t_\phi - \alpha) \right] \right\} \tau_\pi h_{опт}(v, \mu) h_{эоп}(v, \mu) + L_3(v, \mu); \quad (1)$$

$$L_{\Phi}(v, \mu) = \left\{ \left[ L_{\Phi H}(v, \mu) + L_{\Phi L}(v, \mu) \right] \left[ 1 + P_{\Phi} \cos 2(t_{\Phi} - \alpha) \right] + L_c(v, \mu) \left[ 1 + P_{\Phi} \cos 2(t_{\Phi} - \alpha) \right] \right\} \tau_{\Pi} h_{\text{опт}}(v, \mu) h_{\text{эоп}}(v, \mu) + L_3(v, \mu); \quad (2)$$

$$\Delta L(v, \mu) = \left| L_o(v, \mu) - L_{\Phi}(v, \mu) \right|; \quad (3)$$

$$K(v, \mu) = \left| \left[ L_o(v, \mu) - L_{\Phi}(v, \mu) \right] / \left[ L_o(v, \mu) + L_{\Phi}(v, \mu) \right] \right|; \quad (4)$$

$$h_{\text{опт}}(v, \mu) = e^{-2\delta_{\text{об}}^2(v^2 + \mu^2)}; \quad (5)$$

$$h_{\text{эоп}}(v, \mu) = e^{-2\delta_{\text{эоп}}^2(v^2 + \mu^2)}; \quad (6)$$

$$v = N_p l / a_x f' V; \quad (7)$$

$$\mu = N_p l / a_y f' V. \quad (8)$$

Здесь  $(P_o, t_o)$ ,  $(P_{\Phi}, t_{\Phi})$  — степень и азимут поляризации излучения объекта и фона соответственно;  $\delta_{\text{об}}$ ,  $\delta_{\text{эоп}}$  — диаметр пятна рассеяния объектива и ЭОП ПНВ соответственно;  $\alpha$  — азимут поляризации линейного поляризатора, установленного перед объективом ПНВ;  $\tau_{\Pi}$  — коэффициент пропускания поляризатора.

Следует отметить, что составляющие модуля ПЧС яркости изображения объекта получают следующим образом:

$$L_{\text{оH}}(v, \mu) = L_{\text{оH}} \left[ \left( \frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} \beta_{\text{пс}}(\Psi_H) e^{-j2\pi(v x + \mu y)} dx dy \right| \right]; \quad (9)$$

$$L_{\text{оЛ}}(v, \mu) = L_{\text{оЛ}} \left[ \left( \frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} \beta(\Psi_H) e^{-j2\pi(v x + \mu y)} \cos \Psi_L dx dy \right| \right]; \quad (10)$$

$$L_c(v, \mu) = L_c \left[ \left( \frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} e^{-j2\pi(v x + \mu y)} dx dy \right| \right]; \quad (11)$$

$$L_3(v, \mu) = L_3 \left[ \left( \frac{1}{S_o} \right) \left| \iint_{S_o} e^{-j2\pi(v x + \mu y)} dx dy \right| \right]. \quad (12)$$

В этих формулах приняты следующие обозначения:  $\beta(\Psi_H)$ ,  $\beta_{\text{пс}}(\Psi_H)$  — индикатриса коэффициента яркости отражения покрытия поверхности объекта при направленном и полусферическом освещении соответственно;  $S_o$  — площадь поверхности объекта в пространстве изображений;  $\Psi_L$ ,  $\Psi_H$  — угол между нормалью к элементу поверхности объекта и направлением на Луну и на наблюдателя.

Следует отметить, что значения  $L_{\text{оH}}$ ,  $L_{\text{оЛ}}$ ,  $L_c$ ,  $L_3$  выражаются через параметры составных звеньев ПНВ и объектно-фоновой обстановки следующим образом [1]:

$$L_{\text{оH}} = (k\eta\tau_{\text{опт}}L_{\text{нH}}d^2\rho\beta_{\text{пс}}/4(f')^2 V^2) e^{-\sigma l}; \quad (13)$$

$$L_{\text{оЛ}} = (k\eta\tau_{\text{опт}}E_L d^2\rho\beta/4\pi(f')^2 V^2) e^{-\sigma l}; \quad (14)$$

$$L_c = (k\eta\tau_{\text{опт}}L_{\text{нн}}d^2 / 4(f')^2 V^2)(1 - e^{-\sigma l}); \quad (15)$$

$$L_3 = k\eta j / k_{\text{эоп}}\pi V^2, \quad (16)$$

где  $L_{\text{нн}}$  — яркость излучения ночного неба;  $E_{\text{л}}$  — освещенность, создаваемая излучением Луны в месте расположения объекта;  $d$  — диаметр входного зрачка объектива ПНВ;  $\tau_{\text{опт}}$  — коэффициент пропускания оптической системы ПНВ без поляризационного фильтра;  $k$ ,  $k_{\text{эоп}}$  — коэффициенты использования соответственно системой „прибор-глаз“ и фотокатодом ЭОП;  $\eta$  — коэффициент усиления ЭОП;  $\varphi$ ,  $j$  — интегральная чувствительность и плотность тока термоэлектронной эмиссии фотокатода ЭОП;  $\sigma$  — объемный показатель ослабления атмосферы;  $\rho$  — диффузный коэффициент отражения поверхности объекта.

В свою очередь, модули ПЧС яркости изображения фона на экране ПНВ получаются аналогично соотношениям (9)—(12).

Представим алгоритм компьютерного моделирования работы ПНВ пассивного типа в поляризованном и неполяризованном свете.

1. Ввод исходных данных для следующих информационных модулей:

- параметры ПНВ и его составных звеньев;
- условия естественного освещения и метеорологическое состояние атмосферы;
- параметры объектно-фоновой обстановки и условия наблюдения;
- поляризационные характеристики объекта и фона.

2. Формирование операторов расчета модулей ПЧС яркости изображения объекта и фона, согласно соотношениям (1) и (2).

3. Представление соотношений (3) и (4) в виде

$$\Delta L(v, \mu) = |L_o(v, \mu) - L_{\phi}(v, \mu)| \geq mL_3(v, \mu); \quad (17)$$

$$K(v, \mu) = \left| \frac{L_o(v, \mu) - L_{\phi}(v, \mu)}{L_o(v, \mu) + L_{\phi}(v, \mu)} \right| \geq K_{\text{п}}, \quad (18)$$

где  $m$  — отношение сигнал/шум в изображении объекта на экране ПНВ;  $K_{\text{п}}$  — пороговый контраст глаза оператора-наблюдателя.

4. Формирование операторов расчета абсолютного  $\Delta L(v, \mu)$  и относительного  $K(v, \mu)$  контрастов на экране ПНВ при заданном числе периодов  $N_p$ .

5. Организация цикла по дальности  $l$  до выполнения условий:

$$\Delta L(v, \mu) = mL_3(v, \mu); \quad K(v, \mu) = K_{\text{п}}. \quad (19)$$

6. Выдача значения дальности решения поставленной задачи  $l_p$ , которое соответствует условию (19):

$$l_p = l(N_p) \Big|_{\Delta L(v, \mu) = mL_3(v, \mu); K(v, \mu) = K_{\text{п}}}. \quad (20)$$

На основании указанного алгоритма была разработана программа моделирования работы ПНВ в среде Borland Delphi 7.

Для подтверждения достоверности предлагаемой методики компьютерного моделирования работы ПНВ в поляризованном и неполяризованном свете в работе проведены исследования зависимости дальности обнаружения, распознавания и идентификации ПНВ МПН-8КМ от наблюдаемого контраста и метеорологической дальности видимости.

Получено, что дальность обнаружения, распознавания и идентификации в поляризованном свете больше, чем в неполяризованном приблизительно в полтора раза. При этом параметры поляризации отражения объекта и фона следующие:  $P_o = 0,4$ ;  $P_{\phi} = 0,5$ ;  $t_o = 0$ ;  $t_{\phi} = 90^\circ$ . Коэффициент пропускания поляризатора  $\tau_{\text{п}} = 0,85$ ; азимут поляризации линейного поляризатора  $\alpha = 0$ .



1. Разработана математическая модель работы ПНВ пассивного типа в поляризованном и неполяризованном свете, на основании которой предложены методика, алгоритм и программа их компьютерного моделирования.

2. Предложенные методику и программу можно использовать как для моделирования работы традиционных ПНВ пассивного типа в различных условиях естественного освещения, объектно-фоновой обстановки и состояния атмосферы, так и для анализа возможности и условий повышения дальности действия при работе в поляризованном свете.

3. На основании анализа полученных количественных результатов и данных работ [4] выявлено, что при наличии частичной поляризации излучения фона за счет эффекта его частичного подавления поляризационным фильтром имеет место увеличение дальности обнаружения, распознавания и идентификации объектов в поляризационных ПНВ пассивного типа.

4. В свою очередь, при наличии частичной поляризации излучения как объекта, так и фона, поляризационная фильтрация в ПНВ эффективна в случае близости значений коэффициентов отражения объекта и фона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сухопаров С. А., Пизюта Б. А. К вопросу дальности действия приборов ночного видения // Тр. НИИГАиК. 1974. Т. 32. С. 45—48.
2. Тымкул Л. В., Тымкул В. М. Оптико-математическая модель приборов ночного видения пассивного типа // Сб. тез. докл. Междунар. конф. „Прикладная оптика–2000“. СПб, 2000. С. 216.
3. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с.
4. Тымкул Л. В. Математическая модель работы приборов ночного видения в поляризованном свете // Сб. матер. III Междунар. науч. конгр. „ГЕО-Сибирь-2007“. Т. 4. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2. Новосибирск: СГГА, 2007. С. 14—18.
5. Малинин В. В., Цепиногова З. М., Попов Г. Н., Моисеенко Г. А., Моисеенко В. В. Функциональное компьютерное моделирование телевизионных приборов ночного видения // Там же. Ч. 1. Новосибирск: СГГА, 2007. С. 29—33.

#### Сведения об авторах

**Любовь Васильевна Тымкул**

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск; E-mail: [fantasy\\_2000@ngs.ru](mailto:fantasy_2000@ngs.ru)

**Василий Михайлович Тымкул**

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, Новосибирск; E-mail: [kaf.oep@ssga.ru](mailto:kaf.oep@ssga.ru)

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию  
24.02.09 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 621.396.96: 621.391.26

К. И. Драгунов, И. Н. Олексенко, Е. Н. Филин,  
Н. П. Чернецкий, В. И. Шустов

## ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ СОЛНЕЧНОГО НАГРЕВА НА СТАБИЛЬНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАЛИБРОВОЧНОГО СЕТЧАТОГО СФЕРИЧЕСКОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

Исследуется влияние неравномерности солнечного нагрева на искажение формы сетчатого сферического отражателя, используемого в качестве калибровочного объекта при испытаниях радиолокационных средств. Предложенный подход к решению рассматриваемой задачи основан на использовании метода конечных элементов. Приводятся результаты численных исследований.

*Ключевые слова:* калибровка радиолокационных средств, неравномерный нагрев, погрешность формы, сетчатый сферический отражатель, эффективная площадь рассеяния.

**Введение.** При проектировании сетчатого сферического отражателя, предназначенного для использования в качестве калибровочного объекта радиолокационного средства, необходимо учитывать влияние погрешности формы отражателя (отклонения от идеальной сферы) на его эффективную площадь рассеяния (ЭПР).

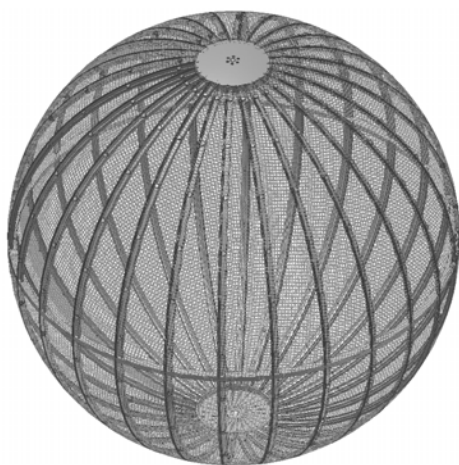


Рис. 1

На рис. 1 приведен пример сетчатого сферического калибровочного отражателя, представляющего собой объемную конструкцию, состоящую из ребер, обтянутых сетеполотном. В силу того что поверхность такой конструкции состоит из участков плоскостей или иных поверхностей, отличающихся от сферической, то погрешность формы реального отражателя будет определяться погрешностью пространственной аппроксимации сферы и случайной технологической составляющей погрешности. Кроме того, форма отражателя искажается вследствие неравномерности его поверхности и нестационарности во времени нагрева его конструкции, обусловленных орбитальным движением отражателя и изменением его ориентации относительно Солнца. Общее

среднее квадратическое отклонение (СКО) поверхности отражателя  $\sigma_{\Sigma}$  от идеальной сферы, которым принято характеризовать его качество, определяется следующим выражением:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{ап}}^2 + \sigma_{\text{сл}}^2 + \sigma_{\text{с}}^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{ап}}$  — СКО, обусловленное пространственной аппроксимацией поверхности отражателя;  $\sigma_{\text{сл}}$  — случайная технологическая составляющая СКО;  $\sigma_c$  — СКО формы, обусловленное неравномерностью и нестационарностью нагрева поверхности отражателя Солнцем.

Погрешность аппроксимации  $\sigma_{\text{ап}}$  может существенно влиять на флуктуации ЭПР отражателя. При равномерной сетке аппроксимации (например, в случае представления поверхности одинаковыми треугольными, пятиугольными или шестиугольными элементами) флуктуации ЭПР пренебрежимо малы. При меридианном разбиении поверхности (см. рис. 1) существуют две диаметрально противоположные области. На полюсах, где сходятся меридианы, ошибка аппроксимации минимальна, тогда как в районе экватора — максимальна.

Случайная составляющая погрешности  $\sigma_{\text{сл}}$  является следствием технологических особенностей изготовления отражателя и не приводит к флуктуациям ЭПР при изменении его положения в пространстве. Составляющая  $\sigma_c$  существенно влияет на флуктуации ЭПР отражателя, что определяет необходимость учета данного фактора при выборе конструктивно-силовой схемы и конструкционных материалов отражателя.

**Оценка температурных деформаций отражателя.** Основным источником тепловой энергии, накапливаемой конструкцией отражателя в условиях космического пространства, является солнечное излучение. Нагрев (охлаждение) силовых элементов конструкции приводит к возникновению дополнительных температурных напряжений и деформаций, значения которых могут превышать критические, что ограничивает работоспособность конструкции.

Температурные поля в силовых элементах конструкции при движении отражателя по околоземной орбите могут носить как стационарный, так и нестационарный характер. Допущение о стационарности распределения температур в элементах конструкции справедливо только для частных случаев, поскольку изменение условий освещенности при движении отражателя по орбите приводит к перераспределению тепловых потоков как вне, так и внутри него. Однако если температура элементов конструкции изменяется сравнительно медленно, температурное поле можно считать стационарным.

Кроме того, нестационарные изменения температурного поля конструкции могут приводить к возникновению динамических эффектов. Термоупругие деформации, возникающие в результате нагревания конструкции, описываются соотношениями классической теории упругости, теории оболочек и термодинамическими соотношениями, которыми характеризуются процессы переноса тепла за счет теплопроводности в элементах конструкции при стационарном и нестационарном теплообмене посредством переизлучения энергии. Важнейшим следствием возникновения градиентов температуры в элементах конструкции является возникновение дополнительного поля напряжений. Анализ величин этих напряжений очень важен при проектировании и создании конструкций орбитальных объектов.

Для вычисления величин температурных напряжений, возникающих в процессе эксплуатации конструкции, используются традиционные расчетные методы, в частности, метод конечных элементов (МКЭ) [1]. Рассмотрим только особенности решения задач термоупругости в приложении к конструкции сетчатого отражателя. В предположении распределения температуры в элементах конструкции отражателя стационарным и заданным в системе уравнений МКЭ учитываются дополнительные деформации, возникающие вследствие нагрева, которые складываются с упругими деформациями

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon}_e - \boldsymbol{\varepsilon}_t), \quad (2)$$

где  $\boldsymbol{\sigma}$  — вектор-столбец напряжений;  $\mathbf{D}$  — матрица жесткости;  $\boldsymbol{\varepsilon}_e, \boldsymbol{\varepsilon}_t$  — векторы-столбцы упругих и температурных деформаций соответственно.

Вектор  $\boldsymbol{\varepsilon}_t$  имеет следующий вид:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_i = (\alpha_1 \Delta T, \alpha_2 \Delta T, \alpha_3 \Delta T, 0, 0, 0)^T, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  — приращение температуры элемента;  $\alpha_i$  ( $i \in \overline{1,3}$ ) — коэффициенты линейного температурного расширения ортотропного материала.

В соответствии с традиционной схемой МКЭ вектор  $\mathbf{q}_i$  дополнительных узловых усилий, обусловленных температурной нагрузкой и приведенных к узлам дискретной модели конструкции, будет определяться следующим выражением:

$$\mathbf{q}_i = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}_i d\Omega, \quad (4)$$

где  $\mathbf{N}$  — матрица функций формы;  $\Omega$  — область пространства, в которой ищется решение.

По аналогичной формуле вычисляются и моменты в узлах, если при разработке математической модели конструкции используются элементы типа балок, пластинок и оболочек, дискретные модели которых предполагают наличие шести степеней свободы в каждом узле (три линейных перемещения и три угла поворота). Использование таких конечных элементов при расчете термоупругих деформаций конструкции отражателя особенно важно, поскольку характер температурных воздействий определяет возникновение не только сжимающих и растягивающих усилий в элементах конструкции, но и распределенных моментов, что в совокупности приводит к искажению начальной геометрии конструкции.

Важнейшим этапом в анализе термоупругого поведения объектов сложной структуры и формы является определение поля температур в силовых элементах конструкции. Найти распределение температур в конструкции и проанализировать тепловые потоки можно, решив систему уравнений, описывающих нестационарные процессы распределения тепла в элементах конструкции. При этом используются численные методы и феноменологические модели комбинированного теплообмена, а вычисления проводятся с использованием специализированных вычислительных программ.

На практике для решения подобных задач часто принимаются следующие допущения:

- 1) конструкция представляется совокупностью стержневых и плоских элементов, соединенных узлами;
- 2) положение элементов в системе координат, связанной с центром масс конструкции, не изменяется;
- 3) на конструкцию действует поток солнечного излучения, направление которого изменяется во времени;
- 4) элементы отражают, поглощают солнечное излучение и теряют энергию за счет собственного излучения;
- 5) характер отражения и испускания излучения диффузный;
- 6) радиоотражающее сетеполотно частично прозрачно для теплового излучения;
- 7) теплообмен конструкции нестационарный;
- 8) передача энергии осуществляется за счет теплопроводности и излучения;
- 9) распределение температуры в пределах поперечного сечения стержневых элементов и по толщине плоских элементов однородное;
- 10) тепловой контакт между элементами и узлами соединений идеальный;
- 11) теплофизические свойства материалов конструкции зависят от направления и температуры;
- 12) оптические свойства поверхностей зависят от температуры и длины волны излучения.

При анализе температурных полей сложных многоэлементных конструкций можно ограничиться некоторыми предельными случаями. Действительно, в процессе эксплуатации конструкции отражателя на орбите условия освещенности, т.е. ориентация конструкции относительно Солнца, могут непрерывно изменяться. Анализ всех возможных распределений

температур в силовых элементах сложной конструкции, которые приводят к изменениям геометрических параметров конструкции, возникновению дополнительных усилий и напряжений, является чрезвычайно сложной задачей. Поэтому возможно применение упрощенных подходов, сложившихся в традиционной практике проектирования конструкций летательных аппаратов аналогичного класса. С этой целью производится предварительный анализ режимов полета с оценкой возможных предельных значений температур и характера их распределения. Выбираются случаи, при которых возможно достижение наибольших напряжений в элементах конструкции и максимальное искажение ее геометрических характеристик. Для выбранных расчетных случаев проводится подробный тепловой расчет. Естественно, что такой подход к анализу температурного состояния конструкции в значительной степени опирается на интуицию проектировщика и зависит от накопленного опыта создания и эксплуатации объектов.

Как показывает анализ опубликованных результатов исследований состояния космических конструкций с трикотажным металлическим сетеполотном [2], максимальные перепады температуры в элементах таких конструкций составляют 100—200 К, а СКО формы рабочей отражающей поверхности составляет порядка 0,2 % характерного размера конструкции.

**Результаты моделирования.** Для оценки возможных перемещений при различном нагреве меридиональных ребер отражателя рассмотрена простейшая модель сетчатого отражателя диаметром 3 м (рис. 2).

Модель состоит из верхнего и нижнего меридиональных ребер, связанных со штангой (прямая  $AB$  на рис. 2). Для исключения движения системы как твердого тела в точке  $A$  запрещены перемещения во всех трех направлениях и поворот относительно оси штанги, а в точке  $B$  — перемещения в направлениях, перпендикулярных оси штанги. Верхний меридиан равномерно нагрет до 470 К, эта температура соответствует лучистому потоку солнечного излучения в  $1400 \text{ Вт/м}^2$  и степени черноты поверхности меридианов порядка 0,5.

Нижний меридиан имеет температуру 90 К. Принимается, что средняя температура штанги равна 280 К. Определение напряженно-деформированного состояния рассматриваемой системы проведено методом конечных элементов с использованием пакета *MSC.Patran/Nastran*. Из анализа полученных результатов следует, что наибольшее перемещение составляет около 1 мм, что характерно для средней точки верхнего меридиана (рис. 2).

**Заключение.** Для сферического отражателя, представляющего собой объемную хаотично вращающуюся в космическом пространстве конструкцию, состоящую из ребер, обтянутых сетеполотном, можно с большой долей вероятности предположить, что распределение температурных полей в этом случае будет более равномерным, чем в рассмотренной модели, и максимальные отклонения не превысят 1 мм. Это позволяет заключить, что односторонний солнечный нагрев не приводит к значительным флуктуациям геометрической формы отражателя. Поэтому при отсутствии стабилизации пространственного положения поверхность сферической оболочки будет равномерно нагреваться или охлаждаться при переходе из света в тень, что приводит к изменению ЭПР, но поскольку периодичность этих процессов велика, изменения ЭПР воспринимаются как изменения среднего значения ЭПР от сеанса к сеансу.

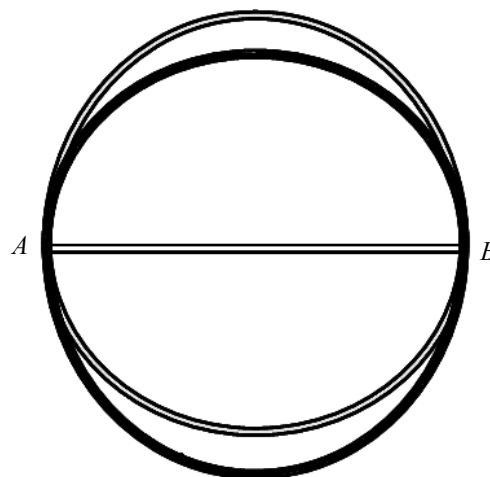


Рис. 2

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
2. *Кисанов Ю. А., Фейзулла Н. М., Кудрявин Л. А., Заваруев В. А.* Материалы для отражающих поверхностей космических складных антенн. Антенны. М.: Радио и связь, 1981.

*Сведения об авторах*

- Константин Иванович Драгунов** — канд. техн. наук; Управление Главного управления вооружений ВС РФ, Москва; главный специалист-эксперт; E-mail: dragunovki@mail.ru
- Игорь Анатольевич Олексенко** — д-р техн. наук; Управление Главного управления вооружений ВС РФ, Москва; начальник отдела; E-mail: olekse89@rambler.ru
- Ефим Николаевич Филин** — канд. техн. наук, доцент; Научно-исследовательский центр 4 Центрального научно-исследовательского института МО РФ, Москва; заместитель начальника отдела; E-mail: efim1979@mail.ru
- Николай Петрович Чернецкий** — канд. техн. наук, доцент; Научно-исследовательский центр 4 Центрального научно-исследовательского института МО РФ, Москва; заместитель начальника отдела; E-mail: Nikolai-Chernecky@yandex.ru
- Владимир Иванович Шустов** — д-р техн. наук; Радиотехнический институт им. академика А. Л. Минца, Москва; генеральный директор

Рекомендована институтом

Поступила в редакцию  
05.11.09 г.

---

---

## ИНФОРМАЦИЯ

---

---

### ЕВГЕНИЙ СТЕПАНОВИЧ ПЛАТУНОВ

#### К 80-летию со дня рождения

27 ноября 2010 г. известному российскому ученому, Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий Евгению Степановичу Платунову исполнилось 80 лет.

Евгений Степанович в 1954 г. с отличием окончил инженерно-физический факультет Ленинградского института точной механики и оптики (ЛИТМО), затем три года проработал в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова, а в 1957 г. вернулся в ЛИТМО в проблемную лабораторию тепловых приборов и измерений. С 1958 г. он занимается преподавательской деятельностью. Ученые степени кандидата и доктора технических наук были присуждены Евгению Степановичу в 1959 и 1969 гг. В 1963 г. он получил звание доцента, а в 1972 г. — профессора.



С 1975 г. трудовая и творческая жизнь Евгения Степановича связана с кафедрой физики Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУ НИПТ, ранее ЛТИХП), которой он заведовал в течение 28 лет. В 1976 г. он создал отраслевую научно-исследовательскую лабораторию динамических методов теплофизических измерений и до 1992 г. возглавлял ее.

Научные интересы Е. С. Платунова отличаются большой широтой. В первые годы научной деятельности он активно занимался разработкой и применением оптических методов измерения яркостной и цветовой температуры изделий атомной и реактивной техники, впервые в СССР экспериментально реализовал ксерографический способ получения оптических полутонных и штриховых печатных снимков, разработал способ контактной тепловой закалки стекол.

Е. С. Платунов разработал нелинейную теорию теплофизических измерений в условиях монотонного разогрева и охлаждения, создал несколько десятков оригинальных приборов, предназначенных для измерения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости в диапазоне температур от 4,2—3500 К. Под руководством Е. С. Платунова были разработаны первые в СССР промышленные теплофизические приборы и организовано их серийное производство. Во многих научных и учебных лабораториях России и других стран СНГ эти приборы успешно функционируют и в настоящее время.

На кафедре физики ЛТИХП под руководством профессора Е. С. Платунова к началу 1980-х гг. сформировалась оригинальная научная школа, получившая мировое признание. Им опубликованы монографии „Теплофизические измерения в монотонном режиме“ (1973 г.), „Теплофизические измерения и приборы“ (1986 г.). Результаты многолетних научных исследований

школы были обобщены Е. С. Платуновым и его учениками в обширной монографии „Теплофизические измерения“ (2010 г.)

Заведуя многие годы кафедрой физики в СПбГУ НиПТ, Е. С. Платунов уделял большое внимание совершенствованию учебного процесса. Среди его учеников — 30 кандидатов наук и 10 докторов наук.

На протяжении восьми лет Е. С. Платунов работал заместителем главного редактора журнала “Известия вузов. Приборостроение”. В 1995 г. он избран членом-корреспондентом Российской метрологической академии, а в 2005 г. — академиком Международной академии холода. В 2006 г. Е. С. Платунов награжден Орденом Почета.

Свой юбилей Евгений Степанович встречает в блестящей научной форме, продолжая руководить аспирантами и консультировать докторантов, пишет статьи, разрабатывает новые приборы для теплофизических измерений.

Дорогой Евгений Степанович! От всей души поздравляем Вас с юбилеем! Желаем здоровья Вам и Вашим близким, дальнейших творческих успехов и благополучия.

*Любящие Вас коллеги и ученики*



## НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ЯРЫШЕВ

### К 80-летию со дня рождения

16 декабря 2010 г. известному российскому ученому и педагогу, Заслуженному работнику высшей школы Российской Федерации, доктору технических наук, профессору кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики Николаю Алексеевичу Ярышеву исполнилось 80 лет.

Николай Алексеевич в 1954 г. с отличием окончил инженерно-физический факультет Ленинградского института точной механики и оптики (ЛИТМО) и был оставлен по распределению на кафедре теплофизики, еще в студенческие годы приступил к научной работе под руководством Г. Н. Кондратьева. В 1958 г. он защитил кандидатскую, а в 1969 г. — докторскую диссертации, в 1967 г. написал оригинальную монографию „Теоретические основы измерения нестационарных температур“. Эта книга стала настольной для большинства специалистов, занимающихся этой проблемой.

В дальнейшем Н. А. Ярышев расширил область своих научных интересов и в соавторстве с другими специалистами выпустил в свет в 1980-х гг. уникальный справочник „Температурные измерения“. В 1984 г. в соавторстве с Л. Б. Андреевой вышла его книга „Тепловой расчет термостатов“.

Н. А. Ярышев одним из первых начал исследовать проблему взаимодействия лазерного луча с веществом и решать задачи защиты космических кораблей от разрушения из-за абляции их оболочки.

Николай Алексеевич — тонкий аналитик, безукоризненно владеющий операционным математическим методом и с успехом применяющий его при решении различных прикладных задач. Им, в частности, был развит математический аппарат теории теплопроводности, что нашло отражение в многочисленных статьях и монографии „Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении“, выпущенной в 2003 г.

Н. А. Ярышев имеет свыше 140 печатных научных трудов, в том числе 7 книг, опубликованных в центральных издательствах страны. Под его редакцией подготовлено свыше 25 учебно-методических пособий, он награжден орденами Почета (2000 г.), Знак Почета, медалями „В память 250-летия Ленинграда“, „Ветеран труда“, „В память 300-летия Санкт-Петербурга“ (2004 г.) и др.

Под его руководством закончили аспирантуру и защитили кандидатские диссертации 15 учеников, 4 из которых стали докторами наук, профессорами, в том числе в Китае и Польше.

Многолетняя научно-консультационная и рецензионная деятельность Н. А. Ярышева инициировала развитие исследований и создание научных школ по теплофизике и термометрии в НИИ и вузовских центрах ряда регионов, включая Москву, Киев, Харьков, Львов, Минск, Одессу, Новочеркасск и др.

С 1973 по 2002 г. профессор Н. А. Ярышев успешно руководил кафедрой физики — одной из крупнейших в университете. Разработанное на кафедре учебное оборудование реко-



мендовано Министерством образования Российской Федерации к использованию в системе инженерно-технических вузов России.

Н. А. Ярышев в 1980—1985 гг. был проректором ЛИТМО по учебной работе, он организатор и первый декан естественнонаучного факультета (1993—1997 гг.). В течение многих лет Николай Алексеевич является членом редколлегии нашего журнала.

Н.А.Ярышев — ученый широкого профиля, сочетающий тонкое владение теоретическим аппаратом с практической направленностью ума, позволяющей ему с успехом браться за трудные прикладные задачи современности.

Дорогой Николай Алексеевич! Примите наши искренние поздравления со столь значимым юбилеем и пожеланиями здоровья и долгих лет жизни!

*Любящие Вас коллеги и ученики*

## SUMMARY

P. 3—6.

### ALGORITHMIZATION OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL TEXTS PROCESSING

Algorithms designed for automation processing of scientific and technical texts processing are considered. A criterion of text structure correctness is proposed, characteristics and restrictions on correct text structure are formalized. The structure of automation system for scientific and technical texts referring is presented.

**Keywords:** algorithm, formalization, predicate, automation system, referring, information processing.

#### *Data on authors*

- Arkady V. Zharkovsky* — Cand. Techn. Sci., St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”; Deputy Pro-rector for R&D; E-mail: av.jarkov@yandex.ru
- Alexander A. Lyamkin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Control Systems; E-mail: alex-ljamkin@yandex.ru
- Sergey A. Tregoda* — St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Department of Computer-Aided Control Systems; Junior Scientist; E-mail: troftu@mail.ru

P. 7—12.

### GENETIC ALGORITHM OF RADIO TELESCOPE GROUP OPERATION PLANNING

A method is proposed for planning of operation of a group of radio telescopes in a radiointerferometric experiment with extra-long bases. The method reduces the planning problem to a discrete optimization problem. NP-completeness of the problem is demonstrated, and an evolution method is proposed for the problem solving.

**Keywords:** genetic algorithm, experiment planning, radiointerferometry with extra-long base.

#### *Data on author*

- Alexey E. Rogov* — Cand. Techn. Sci.; Federal State Unitary Enterprise “Russian Research Institute of Space Instrument Engineering”, Moscow; Head of Department; E-mail: niikp@list.ru

P. 13—22.

### TRAFFIC MODELING IN COMPUTER NETWORK WITH THE USE OF FLOW OF EVENTS

On the base of mathematical models of aggregating and decimation of events flow, equations are derived for equilibrium flows described by the two first moments of time distribution between the events. The equations allows for decomposition of network models into separate units and calculation of the units characteristics.

**Keywords:** characteristics of flows distribution, mathematical multiplexing and demultiplexing of flows, approximation of distribution laws and flows, equilibrium equations for flows in networks models.

#### *Data on author*

- Nadezhda F. Bakhareva* — Cand. Techn. Sci.; Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara; Department of Software and Control in Technical Systems; E-mail: vt@ist.psati.ru

**P. 22—30.****MATHEMATICAL APPARATUS FOR ANALYSIS OF STRUCTURAL PROPERTIES OF NETWORKS**

A mathematical apparatus is proposed for analysis of network structure properties. The apparatus essential is a network model based on cubic complex algebra. The apparatus makes it possible to propose an effective procedure for determination of a full set of simple circuits in double-pole networks of complex structure.

**Keywords:** double-pole network, simple circuit, structure function, cubic complex algebra.

**Data on author**

*Vyacheslav T. Tozik* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Engineer and Computer Graphics; E-mail: tozik@mail.ifmo.ru

**P. 30—34.****APPLICATION OF WAVELET TRANSFORMATION OF SIGNALS FOR REVEALING OF DIAGNOSTIC INDICATORS OF INSTRUMENT ELEMENTS AND MECHANISMS**

A comparative analysis of wavelet transformation methods in vibration diagnostics problems is carried out.

**Keywords:** technical control, vibration diagnostics, wavelet analysis.

**Data on authors**

*Elena M. Anodina-Andrievskaya* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography

*Maria Ya. Marusina* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography; E-mail: marusina\_m@mail.ru

**P. 34—40.****ESTIMATION OF INTERVALS BETWEEN CALIBRATIONS WITH THE ACCOUNT FOR METROLOGICAL ROBUSTNESS OF MEASURING MEANS**

A method is demonstrated for prognosis of intervals between verification and calibration tests of measuring means with the account for their metrological robustness. The method makes it possible to assure no-failure operation of instrument exploitation and may be used as a basis for standardization of measuring means verification.

**Keywords:** probability, metrological robustness, good condition, calibration, fractile, verification, measuring inaccuracy, measuring mean.

**Data on author**

*Leonid V. Efremov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute of Mechanical Engineering, Department of Tribotechnology; E-mail: levlefr@mail.ru

P. 41—47.

### DEVELOPMENT OF CURRENT DENSITY DISTRIBUTION IN IONOSPHERE UNDER HIGH-FREQUENCY RADIATION

A model is proposed for volume distribution of current density in ionosphere under high-frequency radiation at transient processes and in steady-state regimes. The model is designed for solving both direct and inverse problems. Methods of digital solution and calculation of model parameters are considered.

**Keywords:** ionosphere, propagation of electromagnetic oscillations, mathematical modeling.

#### *Data on authors*

- Alexey Yu. Grishentsev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design;  
E-mail: tigerpost@ya.ru
- Anatoly G. Korobeinikov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design

P. 47—50.

### DISCREET INTEGRO- DIFFERENTIATIVE FILTER WITH INTERMEDIATE SMOOTHING OF INPUT SIGNAL COUNTS

Integro-differentiative filter with weighted summation of intermediate sums of input signal counts is considered. The proposed algorithm of filtration by statistical characteristics is shown to be as good as known algorithms and to demonstrate significantly higher calculation effectiveness.

**Keywords:** signal discretization, intermediate summation, discreet filtering, signal-to-noise ratio.

#### *Data on author*

- Sergey I. Ziatdinov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information Network Technologies; E-mail: kaf53@guap.ru

P. 51—54.

### ONE-ELEMENT THERMODETECTOR

Simple one-element thermometers for biological objects detection against a natural background are considered. Principles of design of such detectors are analyzed. Thermoelements are proposed for employment as photo receivers to avoid mechanical or manual scanning of thermal target. Method of calculation of detection range for various biological objects (e.g., human) is presented. Elements specifications for optical and electronic components of the thermometer are formulated.

**Keywords:** thermometer, thermoelement, signal drift, detectability, optical diagram, test desk, optical materials.

#### *Data on authors*

- Vladimir A. Golovkov* — Cand. Techn. Sci.; Research Institute for Complex Testing of Optoelectronic Devices and Systems, Sosnovy Bor, Leningrad region; Senior Scientist;  
E-mail: golovkov\_ggg@mail.ru
- Sergey V. Solk* — Cand. Techn. Sci.; Research Institute for Complex Testing of Optoelectronic Devices and Systems, Sosnovy Bor, Leningrad region; Head of Scientific Production Department of IR Optics; E-mail: solk@sbor.net

**P. 55—61.****INFORMATION MODEL REALIZATION FOR OPTICAL SYSTEM UNDER FUNCTIONAL DESIGN AND CONSTRUCTION**

An example is considered of information model realization for a multi-configurational optical system. The model is realized as a database of construction parameters and other information necessary for modeling. A user's application provided for the model employment allows for data import and export between different computer-aided design systems.

**Keywords:** information model, interconnect information space, infotainment of product life cycle, optical system, functional design, construction, database.

*Data on authors*

- Olga A. Gavrilina** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;  
E-mail: GavrilinaOA@aco.ifmo.ru
- Sergey V. Dubinin** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: serge2603@gmail.com

**P. 61—65.****COMPUTER MODELING OF NIGHT VISION INSTRUMENT OPERATION AT ARBITRARY POLARIZED LIGHT**

A method, software, and algorithm structure is proposed for computer modeling of night vision instrument operation at arbitrary polarized light.

**Keywords:** computer modeling, night vision instrument, polarized light.

*Data on authors*

- Lyubov V. Tymkul** — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Geodetic Academy, Novosibirsk;  
E-mail: fantasy\_2000@ngs.ru
- Vasily M. Tymkul** — Dr. Techn. Sci., Professor; Siberian State Geodetic Academy, Novosibirsk;  
E-mail: kaf.oep@ssga.ru

**P. 66—70.****EFFECTS OF SOLAR HEAT IRREGULARITY ON STABILITY OF GEOMETRIC PARAMETERS OF CALIBRATION SPHERICAL GRID REFLECTOR**

The effects are investigated of solar heat irregularity on shape distortion of grid reflector used as a calibration object for RADAR means testing. The proposed approach to the problem is based on application of finite element method. Results of numerical study are presented.

**Keywords:** RADAR calibration, irregular heating, shape distortion, spherical grid reflector, effective scattering area.

*Data on authors*

- Konstantin I. Dragunov** — Cand. Techn. Sci.; The Russian Federation Ministry of Defense, Main Armament Administration, Moscow; Chief Specialist-Expert;  
E-mail: dragunovki@mail.ru
- Igor A. Oleksenko** — Dr. Techn. Sci.; The Russian Federation Ministry of Defense, Main Armament Administration, Moscow; Head of Department; E-mail: olekse89@rambler.ru
- Efim N. Filin** — Cand. Techn. Sci.; The Russian Federation Ministry of Defense, 4th Central Research Institute, Research Center, Moscow; Deputy Director of Department;  
E-mail: efim1979@mail.ru

- 
- Nicolay P. Chernetsky*** — Cand. Techn. Sci.; The Russian Federation Ministry of Defense, 4th Central Research Institute, Research Center, Moscow; Deputy Director of Department;  
E-mail: Nikolai-Chernecky@yandex.ru
- Vladimir I. Shustov*** — Dr. Techn. Sci.; Academitian A. L. Mintz Radiotechnical Institute, Moscow; Director General

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2010 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Ахметьянов В. Р., Мишина О. А.	Обработка данных ветрового когерентного доплеровского лидара на основе метода гауссовой аппроксимации	1
Гатчин Ю. А., Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О.	Метод автоматизированного проектирования аппаратных средств бортового оборудования	5
Гортинская Л. В., Дернова Е. С., Молдовян Д. Н., Молдовяну П. А.	Построение конечных групп векторов для синтеза алгоритмов цифровой подписи	5
Гришин М. В., Тропченко А. Ю., Ван Цзянь	Маркирование цифровых изображений путем спектральных преобразований	10
Денисов А. В., Филимонов А. П.	Использование информативных признаков для выявления момента нарушения стационарности случайного процесса	7
Жарковский А. В., Лямкин А. А., Тревгода С. А.	Алгоритмизация процесса обработки научно-технических текстов	12
Козырев В. А., Куменко А. Е., Рудых А. Г., Русанов В. А.	Нелинейный регрессионно-тензорный анализ оптимальной установки электромагнитного источника излучения при несанкционированном сканировании его электромагнитного поля	10
Косенко В. Е., Марарескул Д. И., Ермоленко В. И., Лавров В. И., Арапочкин А. Н., Косынкин А. И., Симонов А. Б.	Навигационное обеспечение посадки воздушных судов с применением ГЛОНАСС-технологий	1
Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.	Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений	1
Парамонов П. П., Гатчин Ю. А., Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О.	Модели композиционного проектирования авионики	7



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Рогов А. Е.	Генетический алгоритм планирования работы группы радиотеле-скопов	12
Сеньченков В. И.	Процедура обучения при разработке моделей контроля технического состояния сложных систем	1

**ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Ульянова О. В.	Особенности движения летательного аппарата в вертикальной плоскости в неравновесном режиме с учетом ограниченного ресурса управления	10
Григорьев В. В., Козис Д. В., Коровьяков А. Н., Литвинов Ю. В.	Анализ поведения автоматических радиодальномеров при случайных возмущениях	7
Климов А. П., Ремизова О. А., Рудакова И. В., Фокин А. Л.	Достижение робастности системы стабилизации, синтезированной на основе квадратичной теории	7
Петунин В. И.	Синтез систем автоматического управления летательными аппаратами с автоматами ограничений предельных параметров	10

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

Бахарева Н. Ф.	Моделирование трафика в компьютерных сетях с помощью потоков событий	12
Бессмертный И. А.	Применение реляционных операций для логического вывода в производственных системах	10
Волобуев С. В., Зотов И. В., Николаев В. Н.	Процедура распределенной параллельно-конвейерной барьерной синхронизации, инвариантная к способу размещения синхронизируемых процессов	10
Грушин А. И., Ремизов М. Л., Ростовцев А. В., Николаев Д. Д., Чинь Куанг Киен	Вычислительное устройство для обработки радиолокационной информации	1
Казарин О. В., Скиба В. Ю.	Применение самокорректирующихся сред для обеспечения проактивной безопасности компьютерных систем	1
Никитин Ю. А.	Анализ конечного автомата для синтеза частот с помощью функций целочисленного аргумента	5
Никифоров В. В., Шкиртиль В. И.	Оценка времени доставки сообщений в распределенных системах реального времени с CAN-интерфейсом	7
Ожиганов А. А., Жуань Чжипэн	Критерий выбора длины линейной псевдослучайной кодовой шкалы	5

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Ожиганов А. А., Прибыткин П. А.	Использование нелинейных последовательностей при построении двухдорожечных кодовых шкал для преобразователей угловых перемещений	7
Сафьянников Н. М., Бондаренко П. Н.	Преобразователь код—число импульсов с актуализацией состояний	7
Супрун В. П., Городецкий Д. А.	Реализация бисимметрических булевых функций логическими схемами	5
Титов А. В.	Методика оценки надежности встроенных программных средств при редких отказах	10
Тозик В. Т.	Математический аппарат для анализа структурных свойств сетей	12

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Емельянец Г. И., Лочехин А. В.	Погрешности бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках	10
Степанов О. А., Торопов А. Б.	Использование последовательных методов Монте-Карло в задаче корреляционно-экстремальной навигации	10

### ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

Анодина-Андриевская Е. М., Марусина М. Я.	Использование вейвлетного преобразования сигналов при выявлении диагностических признаков элементов приборов и механизмов	12
Голубков В. А., Голубков А. В.	Влияние неоднородности физико-механических свойств материалов колец на виброактивность шарикоподшипников	5
Ефремов Л. В.	Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений	7
Ефремов Л. В.	Оценка интервалов между калибровками с учетом запаса метрологической надежности средств измерений	12
Заморуев Г. Б., Ткачев А. Л.	Математическое моделирование нелинейных динамических эффектов при медленном движении с сухим трением	5
Махов В. Е.	Контроль линейных размеров изделий на базе технологий фирмы “National Instruments”	7

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Галалу В. Г.	Преобразователи код—напряжение с суммированием взвешенных токов на аттенюаторе лестничного типа	1
Головков В. А., Солк С. В.	Одноэлементный термодетектор	12
Голубев А. А., Игнатъев В. К.	Цифровой нанотеслометр	1
Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г.	Разработка модели распределения плотности токов при возбуждении ионосферы высокочастотным облучением	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Земляков В. Л.	Методы и средства технической диагностики пьезокерамических элементов	10
Зиатдинов С. И.	Восстановление сигнала по его выборкам на основе теоремы отсчетов Котельникова	5
Зиатдинов С. И.	Дискретный интегродифференцирующий фильтр с промежуточным сглаживанием отсчетов входного сигнала	12
Кольцов М. М., Кузнецов С. В.	Синтез системы передачи и визуализации объемных изображений на основе акустооптического дефлектора	7
Курасов А. Е., Попов И. Ю.	Входное устройство для квантового компьютера на электронах в связанных волноводах	5
Нагаев Д. А., Шакурский В. К.	Цифровой генераторный преобразователь высокой чувствительности	1
Передельский Г. И., Иванов В. И.	Мостовая цепь с расширенными функциональными возможностями	1
Порхун В. И.	Устройство для импульсного фотолиза в спектрометрах ядерного магнитного резонанса	10
Титов А. А., Пушкарев В. П., Авдоченко Б. И.	Мощный импульсный СВЧ генераторный модуль	5
Удальцов В. Е., Уварова А. А.	Моделирование процессов распространения излучения в светодиодах	7
Янушковский А. Ю., Кривошейкин А. В.	Точность определения параметров демодулятора в системах с квадратурной амплитудно-фазовой модуляцией	10

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Андреев А. Л., Коротаев В. В.	Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей	10
Андреев Л. Н., Бахолдин А. В., Пруненко Ю. К.	Оптика цифрового кинематографа	1
Андреев П. С., Шабалина Т. Н., Пикуль О. Ю., Строганов В. И.	Использование плоскопараллельной кристаллической пластинки для управления эллиптичностью излучения	7
Белов Н. П., Яськов А. Д., Грисимов В. Н.	Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов	7
Гаврилина О. А., Дубинин С. В.	Реализация информационной модели оптической системы на этапах функционального проектирования и конструирования	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Головков В. А., Смирнов В. А.	Компенсация помех в оптико-электронных устройствах с использованием фильтра Винера—Хопфа	5
Дилбазов Т. Г., Ягубзаде Н. Я., Гусейнова Е. А.	Оптическая система с высокой разрешающей способностью для малогабаритного спектрального прибора	10
Кузнецов Д. А., Лебедев В. А., Андреев П. С., Строганов В. И.	Влияние начальных фаз световых волн при генерации гармоник и фотовольтаическом эффекте	1
Соломатин В. А.	Дискретизация пространства в оптико-электронных системах с мозаичным угловым полем	5
Сушков А. Л.	Исправление сферической аберрации третьего порядка в линзе введением неоднородностей показателя преломления	5
Торшина И. П.	Особенности компьютерного моделирования многодиапазонных оптико-электронных систем обнаружения	10
Тымкул Л. В., Тымкул В. М.	Компьютерное моделирование работы приборов ночного видения в произвольно поляризованном свете	12

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Драгунов К. И., Олексенко И. Н., Филин Е. Н., Чернецкий Н. П., Шустов В. И.	Влияние неравномерности солнечного нагрева на стабильность геометрических параметров калибровочного сетчатого сферического отражателя	12
Соколов А. Н., Тарновский Н. Н.	Тепловые сопротивления неразъемных соединений элементов конструкций	1
Ходунков В. П.	Метод измерения локальных значений температуры неоднородного дисперсного потока	5
Ходунков В. П.	Определение эффективной температуропроводности псевдооживленного слоя	10

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Анисимов А. Г., Коротаев В. В., Кулешова Е. Н.	О возможности адаптации теории распределенных измерительных систем к оптико-электронным системам	7
Анитропов Р. В., Лившиц И. Л., Свищук Д. В.	Предпосылки построения экспертной системы композиции объектов	5
Бударгина М. И., Пруненко Е. К.	Исследование влияния поверхностно окрашенных очковых линз на остроту зрения	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Горбачёв А. А., Горбунова Е. В., Коротаев В. В.	Структура многоканальных распределенных оптико-электронных систем	5
Горбунова Е. В., Жуков Д. В., Чертов А. Н.	Промышленные оптико-электронные системы цветного зрения	5
Ермолаев В. С., Иночкин М. В., Пузык И. П., Хлопонин Л. В., Пузык М. В.	Сенсорный элемент люминесцентного кислородного датчика	10
Ожиганов А. А., Чепурной А. И.	Метод разработки web-приложений на основе систем иерархических конечных автоматов	10

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
НАДЕЖНОСТИ И ТОЧНОСТИ МАШИН И ПРИБОРОВ**

Анодина-Андриевская Е. М.	Методы и средства построения комплексных систем входного контроля шарикоподшипников	2
Беляев А. К.	Динамическая устойчивость зубчато-ременной передачи	2
Биндер Я. И., Мусалимов В. М., Сергушин П. А., Соколов Д. А.	Динамика гироскопического инклинометра	2
Войнов К. Н., Самойлова Е. В., Черток Е. В.	Новые приборы и устройства для работы со смазочными материалами	2
Воронцов Е. А., Мусалимов В. М.	Проблемы оценивания динамической остроты зрения	2
Ефремов Л. В.	Моделирование трендов погрешности диагностических приборов	2
Заморуев Г. Б., Ноздрин М. А., Шаветов А. В.	Формирование учебного процесса на базе курса „Компьютерное управление мехатронными системами“	2
Кошкин И. А., Смирнов А. Б.	Пьезоэлектрический двухкоординатный дефлектор маркирующего лазера	2
Ларин М. С.	Моделирование дополненной реальности	2
Мешковский И. К., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков Р. Л.	Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра	2

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Мусалимов В. М., Ноздрин М. А., Родин Н. В.	Динамический анализ уплотнительного элемента скважинного прибора	2
Смирнов А. Б., Крушинский И. А.	Исследование пьезоэлектрического схвата с резонансным чувствлением и микропозиционированием	2
Тимофеев Б. П., Дайнеко В. Ю.	Шестеренные насосы с внутренним цевочным внецентроидным зацеплением	2
Тимофеев Б. П., Соколов Д. А., Дайнеко В. Ю., Бартош Р. А.	Варианты конструктивного исполнения универсального малогабаритного гироскопа	2
Шамберов В. Н.	Фрикционные автоколебания в механических системах	2

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА****ЧАСТЬ I**

Аверин В. В., Гусельников В. С.	Автоматизация проектирования управляющих программ	6
Афанасьев М. Я., Филиппов А. Н.	Применение методов нечеткой логики в автоматизированных системах технологической подготовки производства	6
Афанасьев М. Я., Филиппов А. Н.	Создание динамических моделей баз данных технологического назначения на языке Python	6
Богданов В. В.	Формирование базы знаний для САПР ТП на основе баз данных технологического назначения	6
Валетов В. А., Куликов Д. Д., Падун Б. С., Яблочников Е. И.	Кафедра технологии приборостроения: этапы развития	6
Котельникова Ю. Е.	Обработка текстовых документов и эволюция автоматизированных систем проектирования	6
Куликов Д. Д., Киселев Ф. В.	Интеграция модуля расчета режимов резания с системой проектирования технологических процессов	6
Куликов Д. Д., Чертков С. А.	Система поиска средств технологического назначения как web-служба	6
Куликов Д. Д., Шувал-Сергеев Н. А.	Проектирование операционных заготовок с использованием CAD-системы	6
Падун Б. С.	Технология проектирования автоматизированных систем подготовки производства	6

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Падун Б. С., Андрианов А. Н., Гнездилова С. А.	Автоматизированная система управления инструментальным производством современного предприятия	6
Падун Б. С., Рождественская М. Г., Бажанова В. А.	Автоматизированная система группирования объектов производства	6
Яблочников Е. И., Молочник В. И., Гусельников В.С.	Метод разработки групповых технологических процессов для оборудования с числовым программным управлением	6
Яблочников Е. И., Молочник В. И., Саломатина А. А.	Комплексное использование баз знаний в автоматизированных системах технологической подготовки производства	6
Яблочников Е. И., Фомина Ю. Н., Саломатина А. А.	Организация технологической подготовки производства в распределенной среде	6

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА****ЧАСТЬ II**

Алиев Т. И., Падун Б. С.	Оптимизация процессов сборки микрообъективов	8
Валетов В. А., Иванов А. Ю.	Микрогеометрия поверхностей деталей и их функциональные свойства	8
Валетов В. А., Красильников А. В.	Технологическая оснастка для отработки пусковых устройств подводных аппаратов	8
Васильков С. Д., Тальнишних С. А.	Исследование остаточных напряжений резистивным электроконтактным методом	8
Голубчиков М. А., Кузьмин Ю. П.	Моделирование процесса вибронакатывания	8
Грибовский А. А., Пирогов А. В., Алёшина Е. Е.	Использование технологии оптического сканирования при подготовке производства новых изделий	8
Красильников А. В.	Проблемы создания средств освоения континентального шельфа Мирового Океана	8
Медунецкий В. М., Цимбал И. Р.	Обеспечение качественных показателей пар трения, работающих в особых условиях	8
Падун Б. С., Латыев С. М.	Интегрированная система автоматизации сборки микрообъективов	8

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Серков Е. А.	Автоматизация процесса проектирования групповых станочных приспособлений	8
Третьяков С. Д., Юльметова О. С.	О проблемах оптимизации микрогеометрии поверхностного слоя деталей приборов	8
Федосов Ю. В., Соболев С. Ф.	Построение учебного процесса в лаборатории поверхностного монтажа	8
Чертовской В. Д.	Адаптивное автоматизированное планирование производства	8
Юльметова О. С., Сисюков А. Н., Юльметова Р. Р.	Создание базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей	8
Яковлева С. А., Юльметова О. С.	Размерная стабильность материалов и элементов конструкций в приборостроении	8

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Авдоченко Б. И., Коновалов В. Ф.	Блок питания для активно-импульсной телевизионной системы	9
Андрианов Д. Е., Соколов М. С.	Использование топологических правил при пространственном анализе картографических объектов	9
Ватугин Э. И., Зотов И. В., Титов В. С., Аль-Ашвал М. М.	Реализация операции вставки поддерева при аппаратно-ориентированной обработке R-выражений	9
Гальчук И. В., Костевич А. Г., Курячий М. И.	Пространственно-временные ранговые алгоритмы выделения мало-размерных объектов на сложном фоне	9
Гальчук И. В., Костевич А. Г., Курячий М. И.	Устранение помеховых образований в видеосистемах с высокочувствительными телевизионными датчиками	9
Ершов Е. В., Виноградова Л. Н., Шумилова Е. С.	Алгоритм фрактальной аппроксимации для сжатия изображений в оптико-электронных системах контроля качества продукции	9
Зайцева Е. В.	Сравнение различных аппроксимаций кружка рассеяния безаберрационного объектива	9
Кирпиченко Ю. Р., Пустынский И. Н.	О влиянии рассеяния света на характеристики изображения, формируемого телевизионным датчиком	9
Масленников В. Н.	Сравнительный анализ чувствительности транзисторных и ламповых видеоусилителей	9
Мирошниченко С. Ю., Титов В. С.	Метод локализации теней геопространственных объектов на цифровых аэрокосмических изображениях	9



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Панищев В. С., Решетникова В. П., Чернецкая И. Е.	Блок управления автоматизированной системой нанесения этикеток на подвижный объект	9
Садыков С. С., Сафиулова И. А., Ткачук М. И.	Полная автоматизированная обработка последовательности ультразвуковых снимков сердца	9
Сизов А. С., Титов Д. В., Труфанов М. И.	Модульная встраиваемая интеллектуальная оптико-электронная система видеонаблюдения	9
Титов В. С., Бобырь М. В., Милостная Н. А., Беломестная А. Л.	Метод коррекции дрейфа нуля операционных усилителей	9
Титов Д. В.	Стенд для испытаний оптико-электронных устройств	9
Труфанов М. И., Прилуцкий С. В.	Способ обнаружения препятствий перед транспортным средством с использованием бинокулярной системы технического зрения	9

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ

Десницкий В. А., Котенко И. В.	Комбинированная защита программного обеспечения от несанкционированных воздействий	11
Дилоу-Рагиня Э. А. Э., Колпин М. А., Григорьев К. Л., Соколов Б. В.	Полиmodelное описание процесса модернизации унаследованной информационной системы на основе сервис-ориентированного подхода	11
Зеленцов В. А., Цивирко Е. Г., Чукарин А. В.	Метод маршрутизации трафика в информационно-коммуникационной гетерогенной сети	11
Каргин В. А., Майданович О. В., Охтилев М. Ю.	Автоматизированная система информационной поддержки принятия решений по контролю в реальном времени состояния ракетно-космической техники	11
Кокорин С. В., Рыжиков Ю. И.	Оптимизация параметров сетей массового обслуживания на основе комбинированного использования аналитических и имитационных моделей	11
Котенко И. В., Коновалов А. М., Шоров А. В.	Исследование бот-сетей и механизмов противодействия им на основе имитационного моделирования	11
Кулешов С. В.	Потенциальные свойства цифровых каналов передачи данных	11
Львов А. С., Фаткиева Р. Р.	Использование web-сервисов для установления медицинского диагноза	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Куссуль Н. Н., Соколов Б. В., Цивирко Е. Г., Юсупов Р. М.	Междисциплинарный подход к оцениванию и анализу эффективности информационных технологий и систем	11
Михайлов В. В., Селяков И. С., Соловьева Т. Н.	Применение многоагентного подхода для моделирования биоресурсов	11
Павлов А. Н., Осипенко С. А.	Исследование безопасности сложных технических объектов	11
Панькин А. В.	Метод взаимодействия элементов корпоративной информационной системы	11
Смирнова О. В.	Использование геоинформационных технологий при оценке рисков, вызванных катастрофическими явлениями	11
Соловьева И. В., Семенов О. И., Соколов Б. В.	Постановка задачи коррекции планов работы корпоративной информационной системы с использованием метода позиционной оптимизации	11

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК****К 110-ЛЕТИЮ СПбГУ ИТМО**

Арефьева Н. Н., Денисюк И. Ю.	Применение наноимпринт-литографии для получения нано- и микроэлементов фотоники	3
Бухановский А. В., Васильев В. Н.	Современные программные комплексы компьютерного моделирования e-Science	3
Воробьева Е. А., Гуров И. П., Петерсон М. В.	Исследование метода обработки сигналов в системах оптической когерентной томографии с повышенным быстродействием	3
Демин А. В., Денисов А. В., Летуновский А. В.	Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения	3
Дмитриев П. А., Мусалимов В. М.	Кинематические и динамические параметры движения автомобиля	3
Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ходунков В. П.	Теплофизические аспекты процесса псевдооживления в энергетических установках	3
Зверев В. А.	Большой Телескоп Азимутальный	3
Колесников Ю. Л.	От ремесленного училища до Национального исследовательского университета	3
Тарлыков В. А., Шехонин А. А.	Этапы развития оптического образования в России	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
--------------------------	-----------------	---------------

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ РАБОТ  
НА ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ СПбГУ ИТМО

Артемов В. В., Белов Н. П., Смирнов А. В., Яськов А. Д.	Помехоустойчивый оптико-электронный измеритель скорости перемещения протяженного объекта	4
Беликов А. В., Пушкарёва А. Е., Скрипник А. В., Струнина Т. В., Шатилова К. В.	Лазерное текстурирование поверхностей материалов	4
Бубнов Ю. З., Бирюлин Г. В., Егоров В. И., Постернаков С. В.	Анализ тепловых режимов полупроводниковых сенсоров	4
Волков Д. П., Успенская М. В.	Теплопроводность наполненных полимеров	4
Воронин А. А., Дмитриев И. А., Лукьянов Г. Н., Рыбина Л. А.	Измерительный комплекс для исследования колебательных процессов в человеческом организме	4
Данилов Д. А., Егоров В. И., Фадеева С. В., Шарков А. В.	Моделирование тепловых режимов электронных систем с естественной вентиляцией	4
Кораблев В. А., Нагибин Ю. Т., Шарков А. В.	Исследование режимов работы лампы накачки лазера при различных способах охлаждения	4
Костенко К. С., Лукьянов Г. Н., Петров Д. С.	Экспериментальное исследование динамики теплообмена через ограждающую конструкцию	4
Котов И. Р., Майорова О. В., Прокопенко В. Т.	Измерение локальных наклонов диффузно отражающих объектов с использованием метода голографической интерферометрии	4
Кузнецов К. Ю., Нагибин Ю. Т., Трофимов В. А., Никущенко Е. М.	Математическое моделирование напряженного состояния роговой оболочки глаза человека	4
	Волоконно-оптический осветитель для системы обеззараживания воды	4
Серебряков В. А.	Взаимодействие лазерного ИК-излучения с биологическими тканями. Лазерная диагностика заболеваний	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Соловьев В. С., Успенская М. В., Сиротинкин Н. В.	Полимерные водопоглощающие композиции с повышенной прочностью	4
Тогатов В. В., Гнатюк П. А., Терновский Д. С.	Теория сверхбыстрого выключения МОП-транзистора	4
Яковлев Е. Б., Свирина В. В., Сергаева О. Н.	Особенности плавления металлов при действии ультракоротких лазерных импульсов	4
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>		
Никифоров В. О., Гвоздев С. С., Хамитова Л. А.	Сообщение о конкурсе выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика“ 2009 г.	1
—	Сообщение о Международной конференции „Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий“	2
—	Е. С. Платунов. К 80-летию со дня рождения	12
—	В. В. Солодовников. К 110-летию со дня рождения	8
—	Н. А. Ярышев. К 80-летию со дня рождения	12