

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Парамонов И. Ю., Смагин В. А.** Сложность и эффективность информационных сетей..... 5
- Бондаренко И. Б.** Метод многоуровневой оптимизации в задаче раздельного резервирования элементов..... 11
- Ахметсафин Р. Д., Ахметсафина Р. З.** Обратное Z-преобразование при идентификации дискретных систем с запаздыванием ..... 15
- Дружков П. Н.** Уменьшение размерности признаков описаний в задаче детектирования объектов на изображениях..... 25

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Данилова Т. В.** Автономный метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата при отсутствии априорной информации ..... 30
- Посягин А. И., Южаков А. А.** Самомаршрутизация сигналов в аналого-цифровом преобразователе на основе нейронной сети ..... 38
- Журов Г. Е., Цивинский М. Ю.** Универсальная модульная реконфигурируемая система для обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени ..... 44
- Шарапов В. М., Петрищев О. Н., Прохоренков А. М., Базило К. В., Сотула Ж. В.** Методы повышения звукового давления мономорфных акустических пьезоэлементов ..... 47

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Ежова В. В., Зверев В. А., Тимощук И. Н.** Аберрационные свойства тонкой линзы в широких и узких пучках лучей ..... 51
- Смирнов Н. В., Лопатина М. С., Митрофанов С. С.** Считывающая система преобразователя линейных перемещений ..... 61
- Зацепина М. Е., Кирилловский В. К.** Тенеграмма линейной решетки как геометрическая модель интерферограммы сдвига ..... 66
- Федоров Ю. В., Федорова А. Ю.** Перфорационные очки ..... 69

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

<b>Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Грибовский А. А.</b> Совместное применение аддитивных технологий и систем виртуального моделирования при подготовке производства полимерных изделий .....	72
SUMMARY ( <i>перевод Ю. И. Копилевича</i> ).....	77

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Paramonov I. Yu., Smagin V. A.** Complexity and Efficiency of Information Networks ..... 5
- Bondarenko I. B.** Multi-Level Optimization Method in the Problem of Separate Element Reservation ..... 11
- Akhmetsafin R. D., Akhmetsafina R. Z.** Inverse Z-Transform in Identification of Discrete Systems with Delay ..... 15
- Druzhkov P. N.** Reduction of Feature Description Dimensionality in the Problem of Object Detection in Images ..... 25

### DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Danilova T. V.** Autonomous Method for Estimation of Orbital Parameters and Spacecraft Orientation in the Absence of A Priori Information ..... 30
- Posyagin A. I., Yuzhakov A. A.** Self-Routing of Signals in Analog-to-Digital Converter Based on Neural Network ..... 38
- Zhurov H. E., Tsivinsky M. Yu.** Universal Modular Reconfigurable System for Real-Time Processing of Thermal and Multichannel Image ..... 44
- Sharapov V. M., Petrishchev O. N., Prohorenkov A. M., Bazilo K. V., Sotula Zh. V.** Methods of Sound Pressure Amplification in Monomorphic Piezoelectric Elements ..... 47

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Ezhova V. V., Zverev V. A., Timoshchuk I. N.** Aberration Properties of Thin Lens in Wide and Narrow Ray Beam ..... 51
- Smirnov N. V., Lopatina M. S., Mitrofanov S. S.** Sensing System of Linear Displacement Converter ..... 61
- Zatsepina M. E., Kirillovsky V. K.** Shadow Image of Linear Grating as a Geometrical Model of Shearing Interferogram ..... 66
- Feodorov Yu. V., Feodorova A. Yu.** Pinhole Eyeglasses ..... 69

**INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY**

<b>Yablochnikov E. I., Pirogov A. V., Gribovsky A. A. Combined Application of Additive Technologies and Virtual Simulation in Polymer Manufacture Preproduction.....</b>	<b>72</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>77</b>

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

И. Ю. ПАРАМОНОВ, В. А. СМАГИН

## СЛОЖНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Исследуются свойства информационных сетей, уточняется понятие эффективности и вводится ее показатель — количество информационной работы, выполняемой сетью. Рассматривается важное свойство сети — взаимодействие ее компонентов. Приводится модель расчета вероятности количества выполненной работы для простой и сложной структур сети.

*Ключевые слова:* сложность, эффективность, информационная сеть, работа, взаимодействие, итерация, вероятность, топология, гипердельтное распределение.

**Введение.** Среди множества сетей наиболее важными, в силу их критичности для процессов управления, являются сети, предназначенные для сбора, хранения, обработки и передачи информации. Сложность, качество и эффективность функционирования информационных сетей (ИС) принято оценивать с помощью различных критериев и показателей.

Наиболее известными и общими законами, описывающими информационные сети, являются законы Меткалфа, Амдала, Густавсона — Барсиса, Гроша [1, 2].

В работе [1] отмечается, что «эффективность сетевых структур подтверждена математическим законом Меткалфа, в соответствии с которым „полезность“ и „эффективность“ сети пропорциональна квадрату числа ее узлов. Этот закон, перенесенный из области веб-торговли в военную сферу, дает своеобразную максимально возможную оценку эффективности системы датчиков, ... в предположении, что датчики обеспечивают своевременную и достоверную информацию». Однако, по мнению авторов настоящей статьи, понятия „полезность“ и „эффективность“ требуют уточнения. В работах [1, 2] утверждается, что основное ограничение эффективности в условиях сетецентрической структуры обусловлено этапами принятия решений и действий. Математической моделью, которая наиболее близко описывает эти этапы, является закон Амдала (также перенесенный в сферу сетецентрических структур из области моделирования параллельных процессов с использованием суперкомпьютеров). В исходном виде закон Амдала гласит: „увеличение числа ресурсов в системе обеспечивает увеличение суммарной производительности до максимума только в случае ресурсов, допускающих суммирование“ [2].

Применительно к алгоритмам, допускающим распараллеливание, существует, как показано в работе [3], максимальное число процессоров (процессов), обеспечивающих максимальную производительность. Это обусловлено наличием системных ограничений на временные затраты по распараллеливанию алгоритмов и организации самих параллельных вычислений.

Цель настоящей статьи — уточнить понятие эффективности функционирования сети, а также исследовать одно из важнейших ее свойств — взаимодействие компонентов, для чего

предпринята попытка в количественном виде оценить влияние взаимодействия узлов на качество функционирования сети.

**Эффективность информационной сети.** Примем условие, что сеть и ее узлы являются сложными системами. Сложная система характеризуется множеством возможных состояний, каждое из которых описывается набором конкретных параметров. Следует различать технические и эргатические сложные системы. Применительно к технической сложной системе количество обрабатываемой ею информации не может быть больше суммарного количества информации, обрабатываемой ее узлами. Что касается эргатической сложной системы, то количество обрабатываемой ею информации, согласно принципу Фёрстера [4], может превышать суммарное количество информации, обрабатываемой ее узлами. В данной статье рассматриваются структуры только технических сложных систем.

Эффективность информационной сложной системы — это „комплексное операционное свойство целенаправленного процесса (ЦП) функционирования системы, характеризующее его приспособленность к решению стоящей перед сложной системой задачи“ [5]. Свойства ЦП — результативность, ресурсоемкость и оперативность — в совокупности порождают его комплексное свойство — эффективность.

Рассмотрим такую сложную систему, как отдельный узел информационной сети. Результативность его можно определить количеством информационной работы, выполненной за время  $t$ ; оперативность определяется заданным временем  $t$ , а ресурсоемкость — средствами, израсходованными на разработку узла, его построение и функционирование. В дальнейшем ресурсоемкость будем считать заранее определенной и будем полагать, что работоспособность узла определяется только его надежностью. Пусть плотность вероятности времени до отказа узла  $f(t)$  задана. Исходя из характеристик ресурсоемкости узла полагаем, что в работоспособном состоянии он обладает информационной пропускной способностью  $I$  операций в единицу времени. Тогда плотность вероятности количества информационной работы будет равна  $g(t) = \frac{1}{I} f\left(\frac{t}{I}\right)$ . Вводя данную плотность вероятности для всех узлов сети, определяем

в качестве показателя эффективности сети вероятность выполнения ею определенного количества информационной работы [6].

**Взаимодействие узлов сети.** Взаимодействие сложных систем целесообразно рассматривать на примерах живых систем (субъектов). Простейшим примером является информационное взаимодействие двух субъектов. Предположим, что два субъекта должны выполнять независимо друг от друга определенную информационную работу в течение времени  $t$ . Если оба субъекта выполнили свою работу, цель достигнута. Но если в момент  $\tau$ ,  $0 \leq \tau \leq t$ , один из субъектов становится неработоспособным, доля невыполненной им работы в течение оставшегося времени должна быть выполнена работоспособным субъектом. Для этого данный субъект должен обладать дополнительным системным ресурсом работоспособности. Предполагая, что такая возможность имеется, можно при задании значений необходимых параметров субъектов решить задачу выполнения необходимой работы двумя субъектами. Если работы разнородны, то субъекты должны располагать соответствующими тезаурусами. Таким образом, процесс взаимодействия живых систем рассмотрен на вербальном уровне.

Процесс взаимодействия узлов информационной сети как неживых систем представляется как передача функций неработоспособного узла одному или нескольким исправным узлам. В данном случае следует применять (вместо тезаурусов) термин „системный ресурс узлов“, под которым понимается информационная пропускная способность  $i$ -го узла —  $I_i$ . В дальнейшем, чтобы упростить задачу оценивания количества выполняемой сетью работы, будем рассматривать более простой процесс взаимодействия. А именно, полагаем, что узлы сети связаны вероятностными переходами, а системные ресурсы узлов постоянны во времени.

В этих условиях требуется оценить вероятность выполнения сетью переменного количества информационной работы.

**Оценивание количества информационной работы сети.** Рассмотрим следующий числовой пример [6]. Известна структура сети, стохастический граф ее переходов показан на рис. 1 (здесь  $g(s)$  — преобразование Лапласа плотности вероятности  $g(t)$ ,  $p_{ij}$  — вероятность перехода).

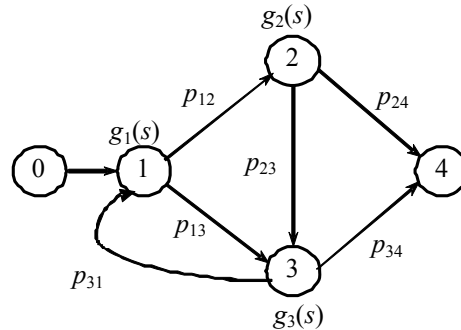


Рис. 1

Требуется оценить вычислительную работу сети, состоящей из трех взаимосвязанных узлов. Заданы значения производительности (пропускной способности) узлов сети:  $I_1 = 10$  операций/ч,  $I_2 = 7$  операций/ч,  $I_3 = 4$  операций/ч; равномерные плотности распределения времени работы узлов:  $f_1(t) = \Delta(t - T_1)$ ,  $f_2(t) = \Delta(t - T_2)$ ,  $f_3(t) = \Delta(t - T_3)$ , где  $T_1 = 12$  ч,  $T_2 = 15$  ч,  $T_3 = 9$  ч. Изображения плотности распределения количества работы узлов в преобразовании Лапласа принимают вид  $g_1(s) = e^{-I_1 T_1 s}$ ,  $g_2(s) = e^{-I_2 T_2 s}$ ,  $g_3(s) = e^{-I_3 T_3 s}$ . Матрицы  $G(s)$  и  $I - G(s)$  представляются в следующем виде:

$$G(s) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{12}g_1(s) & p_{13}g_1(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{23}g_2(s) & p_{24}g_2(s) \\ 0 & p_{31}g_3(s) & 0 & 0 & p_{34}g_3(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$I - G(s) = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -p_{12}g_1(s) & -p_{13}g_1(s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p_{23}g_2(s) & -p_{24}g_2(s) \\ 0 & -p_{31}g_3(s) & 0 & 1 & -p_{34}g_3(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Элемент матрицы  $(I - G(s))^{-1}$  с номером (0, 4) равен [6]

$$Y_{0,4}(s) = \frac{p_{12}g_1(s)p_{23}g_2(s)p_{34}g_3(s) + p_{12}g_1(s)p_{24}g_2(s) + p_{13}g_1(s)p_{34}g_3(s)}{1 - p_{13}g_1(s)p_{31}g_3(s) - p_{12}g_1(s)p_{23}g_2(s)p_{34}g_3(s)}. \quad (1)$$

Подставляя исходные данные в выражение (1) и полагая  $s = 0$ , получаем  $Y_{0,4} = 1$ , что подтверждает выполнимость условия нормирования плотности. Значения трех начальных моментов, найденные с помощью дифференцирования выражения (1) и взятия пределов при  $s = 0$ , равны:  $v_1 = 517,5$  операций,  $v_2 = 423,6 \cdot 10^3$  операций<sup>2</sup>,  $v_3 = 5,08 \cdot 10^8$  операций<sup>3</sup>; среднеквадратическое отклонение  $\sigma = 394,7$ , коэффициент вариации  $\eta = 0,763$ . Нормируя плотность вероятности с коэффициентом  $C = 1,105$ , вычисляем новые средние значения моментов:  $\bar{v}_1 = 535,1$  операций,  $\bar{v}_2 = 4,179 \cdot 10^5$  операций<sup>2</sup>,  $\bar{v}_3 = 3,833 \cdot 10^8$  операций<sup>3</sup>. Для этих значений определим нормальную плотность вероятности, найдем по ней третий начальный момент

и сравним его с третьим моментом, вычисленным с использованием формулы (1). Погрешность этого сравнения не превышает  $\delta = 10,5\%$ , что является вполне удовлетворительным для аппроксимации нормальным распределением. График вероятности  $P(w)$  того, что количество эффективной информационной работы, выполненной сетью, будет не менее  $w$ , показан на рис. 2.

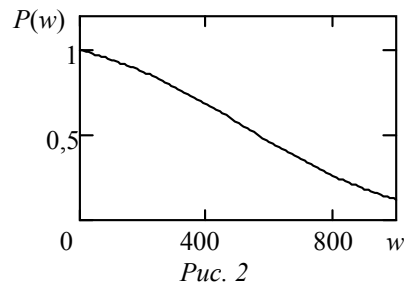


Рис. 2

С помощью предложенной модели можно рассчитать вероятность выполнения сетью заданного количества информационной работы при других распределениях вероятностей.

Произведем сравнение эффективности работы сети и эффективности суммарной работы узлов сети. Для суммарной работы узлов плотность распределения в преобразовании Лапласа будет равна  $R(s) = g_1(s)g_2(s)g_3(s)$ . Начальные моменты  $\nu_1 = 261$  операций,  $\nu_2 = 68,12 \cdot 10^3$  операций<sup>2</sup>,  $\nu_3 = 17,78 \cdot 10^6$  операций<sup>3</sup>;  $\sigma=0$ ,  $\eta=0$ . На рис. 3 показаны следующие графики:  $P(w)$  — вероятность работы сети (кривая 1),  $P_c(w)$  — вероятность суммарной работы трех узлов сети (кривая 2),  $P_3(w)$  — экспоненциальная аппроксимация вероятности  $P_c(w)$  (кривая 3, грубая аппроксимация по моменту  $\nu_1$ ).

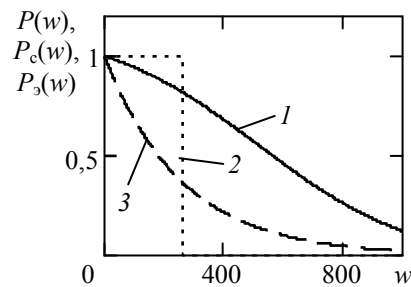


Рис. 3

**Сложность и эффективность сети.** Графики, приведенные на рис. 3, достаточно убедительно показывают преимущества сетевой организации выполнения работы по сравнению со структурой, не имеющей взаимодействия между узлами. Естественно можно поставить вопрос о том, каковы будут эти преимущества, если сеть будет обладать более сложной внутренней организацией.

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим более сложную структуру. Для этого обратимся к работе Дж. фон Неймана [7], который, изучая проблему построения надежных организмов из ненадежных компонентов, предложил сравнивать надежность „гамакообразных“ структур с надежностью более простых. Для этого он применил принцип структурной итерации и показал, что с увеличением сложности существенно увеличивается структурная надежность.

Рассмотрим следующий пример. Используя принцип итерации, предположим, что сеть (исходная), показанная на рис. 1, состоит (вместо узлов 1, 2, 3) из узлов более сложной структуры. Пусть все три узла имеют одинаковую топологию, аналогичную узлам исходной сети, т.е. каждый узел итеративной сети заменим узлом, топология и параметры которого представляются исходной сетью. Это приведет к тому, что в процессе анализа работы итератив-



ной сети необходимо плотности распределения количества работы узлов заменить плотностью распределения количества работы исходной сети. Далее, определим искомую вероятность количества работы для итеративной сети и сравним ее с вероятностью количества работы, выполненной исходной сетью.

Используем преобразование Лапласа для определения плотности вероятности количества работы исходной сети. Так как для нормального распределения выполнить это достаточно трудно, то воспользуемся приближенной аппроксимацией этой плотности по двум начальным моментам с помощью гипердельтного распределения [8]. Выражение для приближенной нормальной плотности имеет вид

$$f(w) = C_1 \Delta(w - v_1 + \sigma) + C_2 \Delta(w - v_1 - \sigma), \quad (2)$$

где  $C_1 = C_2 = 0,5$ ,  $v_1 = 517,5$  операций,  $\sigma = 394,7$ , и в преобразовании Лапласа формула (2) примет вид

$$g(s) = 0,5(e^{-122,8s} + e^{-912,2s}). \quad (3)$$

Далее, согласно допущению об идентичности узлов итеративной сети можно записать

$$g_1(s) = g_2(s) = g_3(s) = g(s). \quad (4)$$

Подставляя выражение (3) в формулу (1) и вычисля значения начальных моментов итеративной сети, получаем  $v_1 = 2953,7$  операций;  $v_2 = 1,547 \cdot 10^7$  операций,  $v_3 = 1,201 \cdot 10^{11}$  операций, при этом  $\sigma = 2,597$ ,  $\eta = 0,879$ . В данной аппроксимации третий начальный момент  $v_3$  не используется. Тогда плотность вероятности количества работы итеративной сети с учетом условия нормирования будет равна

$$R'(w) = \frac{1,147}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(w-v_1)^2}{2\sigma^2}}, \quad \int_0^{\infty} R'(z) dz = 1,$$

а вероятность того, что количество информационной работы итеративной сети будет не менее  $w$ , определяется по формуле

$$P'(w) = \int_w^{\infty} R'(z) dz. \quad (5)$$

На рис. 4 показаны графики вероятностей для итеративной (кривая 1) и исходной (кривая 2) сетей.

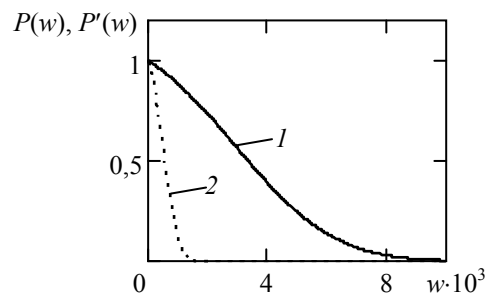


Рис. 4

Сравнительный анализ представленных графиков показывает существенное преимущество итеративной сети по сравнению с сетью более простой организации.

В приведенном примере рассмотрена итеративная сеть первого порядка. Если же каждый составной узел данной сети представить итерационной структурой, т.е. рассмотреть итерацию второго порядка, то выигрыш в эффективности такой сети по сравнению с исходной будет весьма значительным. На этом основании можно сделать вывод, имеющий существенное значение для практики построения сетевых информационных структур, а именно:

чем сложнее организация системы, тем значительнее информационный эффект, измеряемый количеством производимой ею информационной работы.

С учетом темпа развития электроники и совершенствования математического обеспечения компьютеров можно в перспективе ожидать создания более сложных высокопроизводительных сетевых структур в целях применения их в гражданской и военной сферах.

**Заключение.** В представленном исследовании информационных сетей использовано понятие эффективности целенаправленных процессов их функционирования. В качестве показателя эффективности сети принята вероятность достижения ею заданного количества информационной работы.

Важным свойством информационных сетей, в отличие от систем, состоящих из независимых компонентов, является взаимодействие компонентов сети. Учет этого свойства при анализе количества информационной работы сети приводит к повышению эффективности ее функционирования. Применение итерационного принципа построения сложных структур сетей позволяет, в свою очередь, увеличить эффективность их функционирования, на один и более порядков превышающую эффективность систем, не обладающих эффектом взаимодействия компонентов.

Результаты исследований могут быть использованы как для оценивания эффективности информационных сетей, так и для разработки и построения новых более сложных сетей различного назначения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивлев А. А.* Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации: Монография. М.: Изд-во АСТ, 2008. 64 с.
2. *Kopp C.* Network Centric Warfare Defence // Today Magazine. Aug. 2003 [Электронный ресурс]: <<http://www.ausairpower.net/new.pdf>>.
3. *Парамонов И. Ю., Смагин В. А.* Закон Амдала для иерархических вычислительных систем // Вестн. Орловск. гос. ун-та. 2012. № 4. С. 22—28.
4. *Фёрстер Г.* Био-логика // Проблемы бионики / Г. Фёрстер, Д. Тепас, Дж. Харсхорн и др.; Пер. с англ. М: Мир, 1965. С. 7—23.
5. *Петухов Г. Б.* Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч. 1. Методология, методы, модели. МО СССР, 1989. 660 с.
6. *Смагин В. А., Парамонов И. Ю.* Оценивание количества информационной работы вычислительной сети // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 16—20.
7. *Фон Нейман Дж.* Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонентов // Автоматы: Сб. статей. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
8. *Смагин В. А., Филимонович Г. В.* О моделировании случайных процессов на основе гипердельтного распределения // Автоматика и вычислительная техника. 1990. № 3. С. 25—31.

#### Сведения об авторах

**Иван Юрьевич Парамонов**

— канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; докторант; E-mail: [ivan\\_paramonov@mail.ru](mailto:ivan_paramonov@mail.ru)

**Владимир Александрович Смагин**

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра метрологического обеспечения, Санкт-Петербург; E-mail: [va\\_smagin@mail.ru](mailto:va_smagin@mail.ru)

Рекомендована отделом перспектив развития АСУ и связи ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
12.03.13 г.

И. Б. БОНДАРЕНКО

## МЕТОД МНОГОУРОВНЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ РАЗДЕЛЬНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлен метод получения оптимального решения в многоуровневой системе, разработанный на примере решения задачи раздельного резервирования элементов. Исследован метод генетического поиска решений в многоколониальной модификации. Описаны дальнейшие направления исследований генетического метода для задач многоуровневой оптимизации.

**Ключевые слова:** генетический алгоритм, оптимизация, многоуровневая система, резервирование, многоколониальный алгоритм, колония, поколение.

Задачи многоуровневой оптимизации возникают при выработке оптимальных решений в иерархических сложных системах, которые представляют собой множество взаимоподчиненных уровней. Сложность процесса принятия решений заключается в том, что оптимальное решение, достигнутое на нижних уровнях системы, — локальное и не означает получения оптимального — глобального — решения для системы в целом. При этом процесс выработки решения носит лавинообразный характер, а результаты, полученные на промежуточных уровнях, взаимосвязаны. Поэтому исследования в данной области направлены на выделение координирующих переменных, определяющих взаимосвязь нижних и верхних уровней [1], а также декомпозицию системы  $Q_{\text{опт}}$  на подсистемы  $Q_i$  меньшей размерности с последующим решением локальных задач оптимизации [2]:

$$Q_{\text{опт}} = \text{extr}(Q_i(X)), \quad Q_i(X) = Q(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $n$  — количество подсистем,  $k$  — количество параметров каждой подсистемы.

Данные методы включают процедуры выработки постоянных уточняющих межуровневых коэффициентов взаимосвязи отдельных подуровней и матриц этих коэффициентов. Решение задачи многоуровневой оптимизации с использованием такого подхода, особенно для систем большой размерности и при наличии ограничений, — сложная вычислительная процедура.

Резервирование относится к методам повышения надежности приборов и систем и используется на стадии их проектирования. При раздельном резервировании создается избыточность: к каждому элементу системы с помощью коммутаторов может быть подключено до  $(m_i - 1)$  таких же резервных элементов (рис. 1), где  $i = 1, 2, \dots, n$  — номер „столбца“ (блока элементов). Каждый элемент характеризуется вероятностью безотказной работы  $p_i$ . Тогда вероятность безотказной работы основной цепи равна

$$P_{\text{осн}} = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n,$$

а „столбца“ —

$$p_{\text{ст}} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j). \quad (1)$$

Отсюда для всей резервируемой системы

$$p_c = \prod_{i=1}^n (1 - (1 - p_i)^{m_i}).$$

В качестве ограничения для решаемой задачи используем выражение, определяющее общую массу системы:

$$G_c = \sum_{i=1}^n g_i m_i \leq G_{\max}, \quad (2)$$

где  $g_i$  — масса  $i$ -го элемента.

Таким образом, задача оптимизации определяется выражением

$$Q_{\text{опт}} = \max_{\sum_{i=1}^n g_i m_i \leq G_{\max}} \left[ \prod_{i=1}^n (1 - (1 - p_i)^{m_i}) \right]. \quad (3)$$

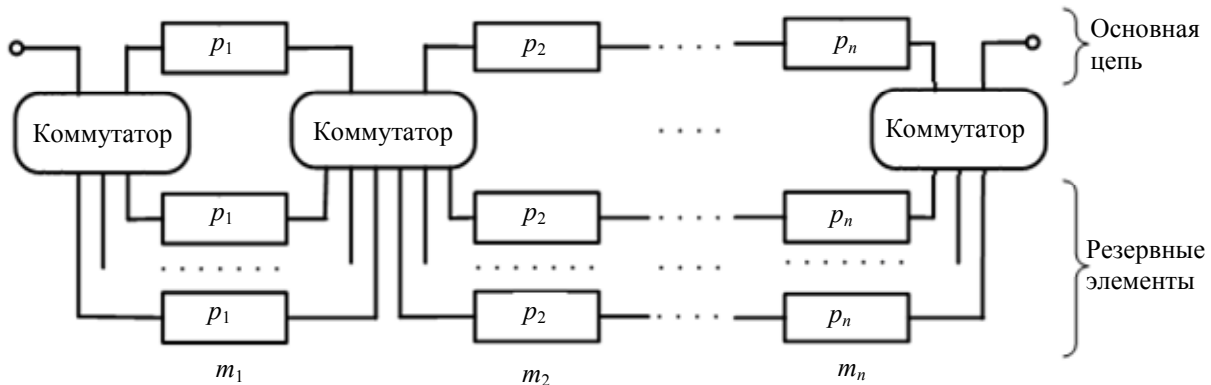


Рис. 1

При заданном уровне надежности элементов, известной их массе и ограничении на массу всей системы рассматриваемая задача может быть представлена в виде иерархической системы, где локальной задачей оптимизации является максимизация надежности (1), а глобальной — максимизация по соотношению (3) при выполнении ограничения (2).

Графическая интерпретация задачи (1) для двух элементов представлена на рис. 2. Ограничение (2) „отсекает“ область, в которой находятся оптимальные решения (в данном случае два). На рисунке представлен вариант, когда массы элементов одинаковы, поэтому ограничивающая плоскость проходит под углом  $45^\circ$  к осям  $m_1$  и  $m_2$ . Когда массы элементов не равны, эти углы разные. Для численных методов оптимального поиска задача усложняется тем, что вероятность безотказной работы, описываемая поверхностью  $Q(m_1, m_2)$ , сначала резко повышается, а затем ее рост замедляется.

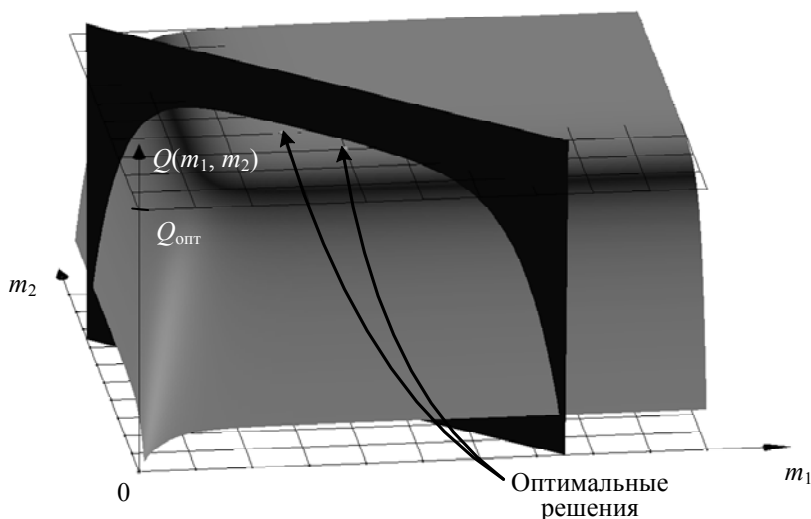


Рис. 2

Для решения задачи (3) можно использовать аналитические методы: например, метод неопределенных множителей Лагранжа или вариационный метод, однако при этом трудоем-

кость задачи существенно возрастает, а решение, особенно при небольших значениях  $m_i$ , не всегда является оптимальным.

В настоящей статье для решения поставленной задачи предлагается использовать многоуровневый многоколонийный генетический алгоритм (рис. 3).

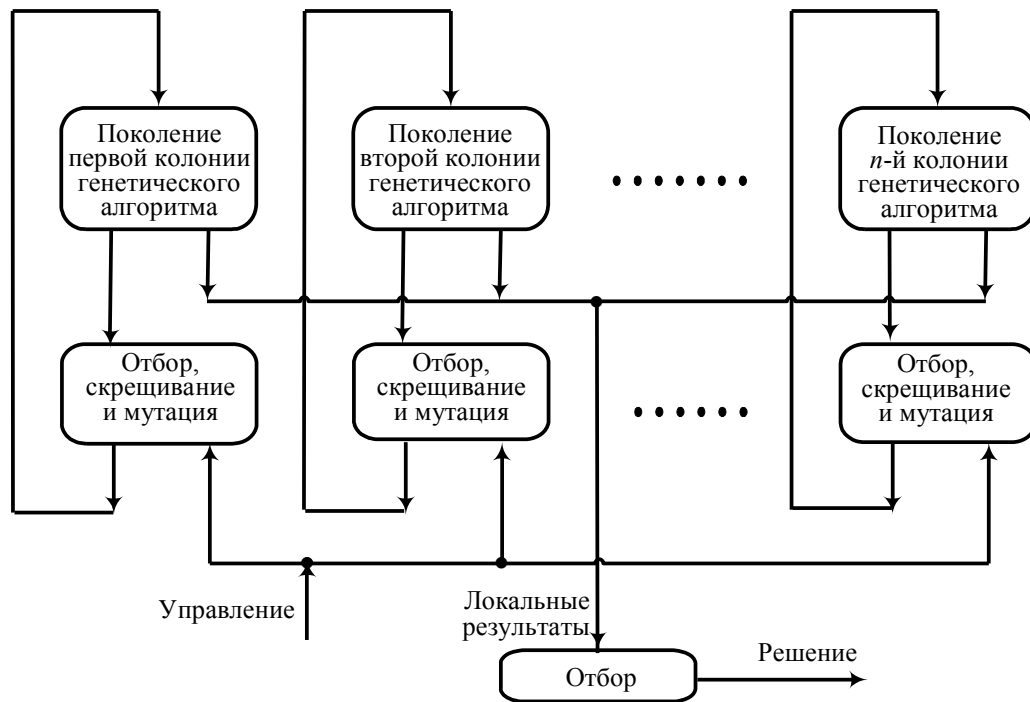


Рис. 3

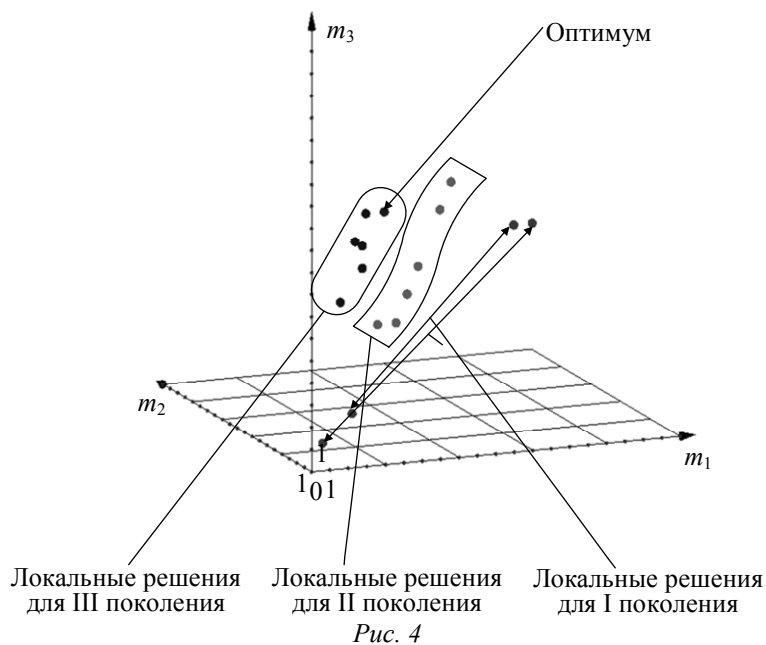
Реализация генетических алгоритмов предусматривает совмещение случайного поиска с отбором наилучших решений, что было исследовано в работах [3, 4]. Для решения каждой локальной задачи оптимизации используется отдельная колония хромосом, функционирующая на нижнем уровне (см. рис. 3), в результате чего формируется максимум локальной целевой функции (1) с локальным ограничением:

$$Q_{i\text{опт}} = \max_{g_i m_i < G_{\text{max}} / g_i} (1 - (1 - p_i)^{m_i}). \quad (4)$$

Управление поиском при работе многоуровневого многоколонийного генетического алгоритма осуществляется путем сужения интервала поиска и повышения точности от поколения к поколению. Из каждой популяции нижнего уровня, содержащей 20 хромосом, отбирается несколько вариантов решений, образующих колонию верхнего уровня. Из этих вариантов на основе выражения (3) осуществляется выбор наилучшего решения с учетом ограничения (2). В результате процесса эволюции хромосом через несколько поколений формируется оптимальное решение. Как показано в работе [5], выгоднее использовать большее количество хромосом в колонии, чем наращивать число поколений, что и было использовано при проведении экспериментов.

Исходные данные и результаты вычислительного эксперимента для трех основных элементов, при  $G_c=485$  кг, приведены в таблице — оптимальное решение, найденное на третьей итерации поиска (для III поколения), выделено жирным шрифтом; ход поиска представлен на рис. 4.

Номер блока элементов	$p_i, \%$	$g_i, \text{кг}$	$G_{\text{max}}, \text{кг}$	$m_i$ — варианты локальных решений для поколения								
				I		II		III				
				1	2	1	2	1	<b>2</b>	3	4	5
1	90	10	500	15	16	11	12	9	<b>10</b>	8	8	8
2	80	15		10	10	10	11	15	<b>15</b>	13	14	13
3	95	20		8	8	9	10	8	<b>8</b>	6	7	7



В заключение следует отметить, что представленный в статье подход управления многоуровневой системой не является окончательным. Возможна организация управления хромосомами низших порядков за счет составления ступенчатой целевой функции, оптимизации операторов отбора, скрещивания, мутации и т.д., что требует дополнительных исследований. Разработанная методика может быть использована при принятии решений в многоуровневых задачах для управления сложными техническими системами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В. В. Автоматизация управления предприятием. М.: ИНФА-М, 2000. 239 с.
2. Лисяной Г. В. Модели оценки эффективности функционирования интегрированной автоматизированной системы управления // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. 2009. Вып. № 2 (55). С. 7—9.
3. Коробейников А. Г., Михайличенко О. В., Прохожев Н. Н., Бондаренко И. Б. Метод поиска множества оптимальных решений тестовой функции Бранинса // Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе: Сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием. Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т, 2012. Ч. 1. С. 73—77.
4. Бондаренко И. Б., Гатчин Ю. А., Гераничев В. Н. Синтез оптимальных искусственных нейронных сетей с помощью модифицированного генетического алгоритма // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 51—55.
5. Бондаренко И. Б., Каляева Е. А., Кошкиarov Д. Н. Адаптация параметров генетического алгоритма для оптимизации сложных функций // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 9. С. 5—9.

#### Сведения об авторе

**Игорь Борисович Бондаренко** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем; E-mail: igorlitmo@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
проектирования и безопасности  
компьютерных систем

Поступила в редакцию  
10.01.14 г.

Р. Д. АХМЕТСАФИН, Р. З. АХМЕТСАФИНА

## ОБРАТНОЕ Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Предлагается алгоритм текущей идентификации дискретной системы с переменным запаздыванием, состоящей из идеального импульсного элемента, экстраполятора нулевого порядка и линейной непрерывной части. Основу алгоритма составляет оценка параметра смещения решетчатой функции (дробной части значения параметра запаздывания) при обратном модифицированном Z-преобразовании исходя из условия равенства нулю переходного процесса непрерывной части в точке запаздывания.

**Ключевые слова:** идентификация, запаздывание, обратное модифицированное Z-преобразование.

**Введение.** Рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК, англ. RLS — Recursive Least Squares) [1, 2] широко применяется для параметрической идентификации в реальном масштабе времени (адаптивная или текущая идентификация, самонастройка) дискретных систем (ДС), описываемых регрессионной моделью

$$y(k) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=0}^n b_i x(k-i-d) + v(k),$$

где  $x(k)$ ,  $y(k)$  — входной и выходной сигналы;  $v(k)$  — аддитивная помеха с нулевым средним и конечной дисперсией;  $n$  — порядок модели;  $d$  — запаздывание.

Основные соотношения РМНК:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \gamma(k)[y(k) - \Psi^T(k+1)\theta(k)]; \quad (1)$$

$$\gamma(k) = \frac{1}{\Psi^T(k+1)P(k)\Psi(k+1) + \lambda} P(k)\Psi(k+1);$$

$$P(k+1) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - \gamma(k)\Psi^T(k+1)]P(k),$$

где  $\theta(k)$  — вектор коэффициентов регрессии:

$$\theta(k) = [a_1 \dots a_n \ b_0 \dots b_n]^T; \quad (2)$$

$\Psi(k)$  — вектор данных:

$$\Psi(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-l) \ x(k-d) \dots x(k-d-n)]^T; \quad (3)$$

$P(k)$  — обратная матрица ковариаций;  $\gamma(k)$  — вектор коррекции;  $\lambda$  — числовой коэффициент, определяющий демпфирование алгоритма (фактор „забывания“) [1].

Если порядок  $n$  или запаздывание  $d$  заданы некорректно по отношению к динамическим свойствам объекта управления, то это приводит к следующему:

- смещению оценок вектора параметров  $\theta(k)$  и потере устойчивости модели;
- потере сходимости оценок вектора параметров  $\theta(k)$ ;
- невозможности достижения показателей качества системы управления и потере ее устойчивости.

Обзоры публикаций, посвященных идентификации объектов управления с запаздыванием по входу, выходу и состоянию, приведены в работах [3, 4]. Исследования по текущей идентификации дискретных систем с запаздыванием с применением РМНК также имеют давнюю историю — см., например, обзоры [5, 6]. Из российских публикаций следует выделить

работу [7], где решается задача синтеза адаптивного идентификатора переменного запаздывания (получено рекуррентное соотношение) с использованием линейной прогнозирующей модели при допущении о том, что известны границы изменения параметра запаздывания и весовая функция объекта, а также работу [8], где для оценки запаздывания ДС предлагается варьировать интервал квантования.

Для определения неизвестного запаздывания необходимо дополнительное уравнение, и во всех известных работах такое уравнение выводится на основе минимизации квадрата ошибки модели:  $e(k, d) = y(k | d) - y(k)$ , где  $y(k|d)$  — выходной сигнал модели при значении запаздывания  $d$ .

Применительно к РМНК сумму квадратов ошибок или невязок RSS (Residual Sum of Squares) можно поставить в зависимость от  $d$  [1, 2]:

$$\text{RSS}(k, d) = \sum_{t=0}^k \lambda^{k-t} e^2(t, d) = \lambda \text{RSS}(k-1, d) + e^2(k, d) = s_y(k) - F^T(k, d)R^{-1}(k, d)F(k, d), \quad (4)$$

где скаляр  $s_y(k) = \lambda s_y(k-1) + y^2(k)$  — сумма квадратов выходов;  $R(k, d)$  — матрица ковариаций:

$$R(k, d) = \lambda R(k-1, d) + \Psi(k, d)\Psi^T(k, d); \quad (5)$$

$F(k, d)$  — вектор измерений:

$$F(k, d) = \lambda F(k-1, d) + \Psi(k, d)y(k). \quad (6)$$

Неизвестный параметр  $d$  определяется минимизацией уравнения (4) или близких ему выражений. Для этого при известных ограничениях

$$d_{\min} \leq d \leq d_{\max} \quad (7)$$

на каждом шаге самонастройки системы формируются максимальные вектор данных, вектор измерений и матрица ковариаций:

$$\begin{aligned} \Psi_{\max}(k) &= [-y(k-1) \dots -y(k-n)x(k-d_{\min}) \dots x(k-d_{\max}-n)]^T; \\ F_{\max}(k) &= \lambda F_{\max}(k-1) + \Psi_{\max}(k)y(k); \\ R_{\max}(k) &= \lambda R_{\max}(k-1) + \Psi_{\max}(k)\Psi_{\max}^T(k), \end{aligned} \quad (8)$$

элементы которых служат „строительным материалом“ для любых матриц и векторов в выражении (4) из диапазона (7).

Для такого подхода характерны следующие проблемы:

— неявная зависимость RSS от запаздывания  $d$  (4) обуславливает необходимость определения оценки запаздывания с использованием различных методов оптимизации (градиентных, инструментальных переменных, генетических алгоритмов и др.) или простого перебора [5—15];

— дискретное изменение значения запаздывания в вычислительной схеме RLS — РМНК обуславливает начальное смещение оценки вектора параметров  $\theta(k+1)$  на следующем шаге самонастройки, так как эта оценка определяется для нового запаздывания  $d$  (в соответствии с перестроенными векторами  $\gamma(k)$  и  $\Psi(k)$ ), а оценка  $\theta(k)$  получена еще для прежнего запаздывания (1); смещение постепенно устраняется в ходе самонастройки на последующих шагах с учетом фактора „забывания“ (что может оказаться критичным для систем управления) [5, 6, 9—15];

— ограничения (7) определяют порядок квадратной матрицы  $R_{\max}(k)$ , что может потребовать значительных ресурсов для ее хранения и оптимизации (4).

Наиболее корректным по формализации задачи текущей идентификации линейных систем с переменным запаздыванием до сих пор представляется сформулированный в работе [16] подход, где перечисленные проблемы отсутствуют. Принципиальное отличие данного подхода заключается в том, что запаздывание определяется не минимизацией квадрата ошибки модели, а при обратном Z-преобразовании.



**Постановка задачи.** Рассмотрим задачу текущей идентификации дискретной системы с переменным запаздыванием, состоящей из идеального импульсного элемента, экстраполятора нулевого порядка и непрерывной части (рис. 1). Запаздывание относится к непрерывной части (НЧ), передаточная функция (ПФ) которой в  $S$ -области имеет следующий вид:

$$W^*(s) = \frac{B^*(s)}{A^*(s)} e^{-\tau s} = \frac{\sum_{i=0}^p b_i^* s^i}{s^n + \sum_{i=0}^{n-1} a_i^* s^i} e^{-\tau s} = \frac{B^*(s) e^{-\tau s}}{s^{n-1} \prod_{i=2}^l (s - s_i)^{r_i}}, \quad (9)$$

где  $a_i^*$ ,  $b_i^*$  — вещественные коэффициенты;  $\tau$  — запаздывание;  $s_1=0$ ,  $s_2, \dots, s_l$  — не равные друг другу полюсы дроби;  $p, n, r_i$  — натуральные числа ( $p < n$ ).

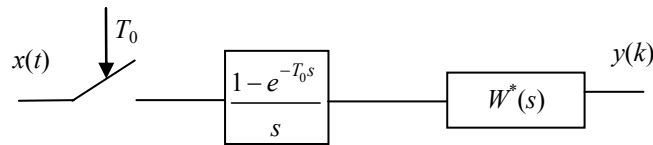


Рис. 1

Передаточная функция ДС в  $Z$ -области связана с ПФ НЧ прямым  $Z$ -преобразованием и имеет вид [2, 14, 15]

$$W(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W^*(s)}{s} \right\} = \frac{B(z)}{A(z)} z^{-c} = \frac{\sum_{i=0}^n b_i z^{n-i}}{z^n + \sum_{i=1}^n a_i z^{n-i}} z^{-c} = \frac{B(z) z^{-c}}{(z-1)^{l-1} \prod_{i=2}^l (z - z_i)^{r_i}}, \quad (10)$$

где  $a_i, b_i$  — вещественные коэффициенты (составляют элементы вектора (1) при идентификации);  $c, l, n, r_i$  — натуральные числа ( $d \geq 1, l \leq n, \sum r_i = n + 1$ );  $z_1=1, z_2, \dots, z_l$  — не равные друг другу полюсы дроби.

Так как в задаче текущей идентификации определяется вектор параметров ПФ ДС, то формально задача оценки неизвестного запаздывания  $\tau$  сводится к обратному  $Z$ -преобразованию.

В дискретной системе запаздывание НЧ представляется в виде целого числа интервалов квантования ( $T_0$ ). Запаздывание представляется как  $\tau = (d+m-1)T_0 = (d-\varepsilon)T_0$  [17, 18], где  $m \in [0, 1), \varepsilon \in (0, 1]$  — дробные числа,  $d$  — целое. В литературе для дробной части значения параметра запаздывания (“delay parameter”), или параметра смещения решетчатой функции, используются оба обозначения —  $m$  и  $\varepsilon$  [17—19], которые связаны между собой соотношением  $m = 1 - \varepsilon$ . Дробная часть значения параметра запаздывания в модели не выделяется и учитывается в числителе ПФ ДС при модифицированном  $Z$ -преобразовании.

Модифицированное  $Z$ -преобразование рассматриваемой дискретной системы

$$H(z) = \frac{z}{z-1} \frac{B(z)}{A(z)} = Z_\varepsilon \left\{ \frac{1}{s} \frac{B^*(s)}{A^*(s)} \right\} = Z_\varepsilon \{H^*(s)\},$$

а обратное модифицированное  $Z$ -преобразование —

$$H^*(s) = Z_\varepsilon^{-1} \{H(z)\}. \quad (11)$$

В общем случае, при известном параметре смещения, обратное модифицированное  $Z$ -преобразование (11) содержит простые дроби (с учетом кратных и комплексно-сопряженных полюсов) [15, 16]:

$$H(z) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \frac{G_{ji}}{(z^{-1} - z_i^{-1})^{j+1}}; \quad H^*(s) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \frac{D_{ji}}{(s - s_i)^{j+1}}; \quad s_i = \ln(z_i)/T_0,$$

где  $G_{ji}, D_{ji}$  — параметры системы.

При текущей параметрической идентификации на каждом шаге самонастройки оценивается вектор параметров  $\theta(k)$  ПФ ДС при уже известном запаздывании  $d$ . Параметр смещения  $\varepsilon$  не известен, а следовательно, и запаздывание  $\tau$  не определено с точностью дробной части. Для модели FOLPD (First Order Lag Plus Delay — звено первого порядка с запаздыванием) попытки решения этой проблемы предпринимались в работах [6, 12, 14], однако общее решение найдено не было.

#### Оценка параметра смещения при обратном модифицированном Z-преобразовании.

Дополнительное уравнение для параметра  $\varepsilon$  предлагается вывести исходя из структурного свойства ПФ НЧ, которая является дробно-рациональной функцией (9), и через обратное преобразование Лапласа:

$$L^{-1} \{H^*(s)\} \Big|_{t=0} = h^*(+0). \quad (12)$$

Переходный процесс без учета запаздывания должен начинаться с нуля, поэтому  $h^*(+0) = 0$ .

Выразим уравнение (12) через известные параметры  $H(z)$ . Для этого разложим  $H(z)$  в степенной ряд:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h_k z^{-k},$$

где коэффициенты  $h_k$  определяются как

$$h_k = \frac{d^k H(z)}{d(z^{-1})^k} \Big|_{z^{-1}=0} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} (-1)^{j+1} G_{ji} C_{k+j}^k z_i^{k+j+1}.$$

Далее запишем

$$C_{k+j}^k = \frac{1}{j!} \sum_{q=0}^j (-1)^{q+j} S(j+1, q+1) k^q,$$

где  $S(j, q)$  — числа Стирлинга первого рода [20], что позволяет перегруппировать слагаемые, не зависящие от индекса  $k$ :

$$h_k = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \left[ (-1)^{j+1} \sum_{q=j}^{r_i-1} G_{qi} \frac{S(q+1, j+1)}{q!} z_i^{q+1} \right] k^j z_i^k = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} G_{ji}^* k^j z_i^k.$$

С другой стороны, коэффициенты  $h_k$  связаны с  $H^*(s)$  соотношениями

$$h_k = L^{-1} \{H^*(s)\} \Big|_{t=(k+\varepsilon)T_0} = h^*((k+\varepsilon)T_0) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} D_{ji} \frac{[(k+\varepsilon)T_0]^j}{j!} z_i^{k+\varepsilon},$$

которые можно переписать следующим образом:

$$h_k = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} \left[ z_i^\varepsilon \sum_{q=j}^{r_i-1} D_{qi} \frac{C_{k+j}^j}{q!} T_0^q \varepsilon^{q-j} \right] k^j z_i^k = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} G_{ji}^* k^j z_i^k.$$

Поскольку  $h_k = h^*((k+\varepsilon)T_0)$ , то формально для выражения (12) можно записать  $h^*(0) = h_{-\varepsilon}$  или

$$F(\varepsilon) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^{r_i-1} G_{ji}^* (-\varepsilon)^j z_i^{-\varepsilon} = 0. \quad (13)$$

Итак, получено дополнительное трансцендентное уравнение, связывающее известные параметры ПФ ДС с неизвестным значением параметра смещения  $\varepsilon$ . Уравнение решается численными методами.

В частном случае для инерционного звена первого порядка с запаздыванием (FOLPD) можно получить явную зависимость

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{b_0 + b_1}{b_1 - a_1 b_0} \right) / \ln(-a_1),$$

а в случае когда числитель дроби (9) представлен в виде

$$B^*(s) = \sum_{i=0}^{n-p-1} b_i^* s^i, \quad p < n,$$

будет справедливо условие  $h^{(p)}(+0) = 0$  или  $F^{(p)}(\varepsilon) = 0$ .

Соотношения

$$\left. \begin{aligned} G_{ji}^* &= (-1)^{j+1} \sum_{q=j}^{r_i-1} G_{qi} \frac{S(q+1, j+1)}{q!} z_i^{q+1}; \\ G_{ji}^* &= z_i^\varepsilon \sum_{q=j}^{r_i-1} D_{qi} \frac{C_q^j}{q!} T_0^q \varepsilon^{q-j}; \\ i &= \overline{1, l}; \quad j = \overline{0, r_i - 1}, \end{aligned} \right\}$$

позволяют сформировать систему линейных уравнений для вектора коэффициентов  $\mathbf{D} = \|D_{ji}\|$  при обратном модифицированном Z-преобразовании и вектора коэффициентов  $\mathbf{G} = \|G_{ji}\|$  при прямом модифицированном Z-преобразовании ( $\mathbf{G} \leftrightarrow \mathbf{G}^* \leftrightarrow \mathbf{D}$ ); алгоритмы разложения рациональной дроби на сумму простых дробей [21, 22] позволяют применять матричные операции к вектору параметров  $\theta(k)$ .

Вектор коэффициентов числителя уравнения (10) может быть определен по предложенному в работе [22] алгоритму как  $\mathbf{b} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{G}$ , где  $\mathbf{A} = \|a_{n-i-j}\|$  — квадратная матрица  $(n+1)$ -го порядка, состоящая из коэффициентов знаменателя дроби (10);  $\mathbf{V} = \|\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2 \dots \mathbf{V}_l\|$  — обобщенная матрица Вандермонда  $(n+1)$ -го порядка, состоящая из прямоугольных клеток:

$$\mathbf{V}_i = \left\| C_q^j s_i^{q-j} \right\|, \quad q = \overline{0, n}, \quad j = \overline{0, r_i - 1},$$

поэтому оператор  $\theta \leftrightarrow \mathbf{G}$  формализуется.

Таким образом, при прямом и обратном модифицированном Z-преобразовании формализуется оператор  $\theta \leftrightarrow \mathbf{D}$  или

$$\theta = Z(\varepsilon, \mathbf{D}), \quad \mathbf{D} = Z^{-1}(\varepsilon, \theta). \quad (14)$$

Рассмотрим ПФ ДС третьего порядка

$$W(z) = \frac{0,1832 + 0,2006z^{-1} + 0,0355z^{-2} - 0,0006z^{-3}}{1 - 0,8377z^{-1} + 0,1966z^{-2} - 0,00995z^{-3}} z^{-1}.$$

На рис. 2 представлен график функции  $F(\varepsilon)$  в интервале  $m \in [0, 1)$ . Параметр смещения определен численно по формуле (13) как  $\varepsilon = 0,5$  ( $m = 0,5$ ) при  $T_0 = 8$ . Соответствующая ПФ НЧ после обратного модифицированного Z-преобразования и построения рациональной дроби в S-области имеет порядок 2/3 и следующий вид:

$$W(s) = \frac{0,00476 + 0,02857s + 0,03809s^2}{0,00476 + 0,0952s + 0,5762s^2 + s^3} e^{-4s}.$$

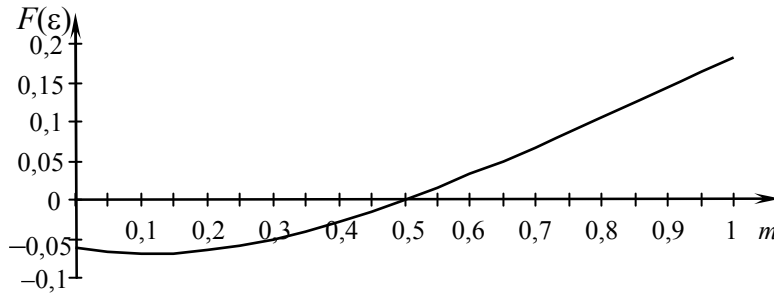


Рис. 2

Теперь рассмотрим ПФ ДС

$$W(z) = \frac{0,0292 + 0,2416z^{-1} + 0,0773z^{-2} - 0,0009z^{-3}}{1,0 - 0,8377z^{-1} + 0,1966z^{-2} - 0,00995z^{-3}} z^{-1}.$$

На рис. 3 представлены графики функций  $F(\varepsilon)$ ,  $F^{(1)}(\varepsilon)$  и  $F^{(2)}(\varepsilon)$  (кривые 1, 2, 3 соответственно) в интервале  $m \in [0,1)$ . Параметр смещения определен численно по функции  $F^{(2)}(\varepsilon) = 0$  как  $\varepsilon=0,5$  ( $m=0,5$ ) при  $T_0=8$ . Соответствующая ПФ НЧ после обратного модифицированного Z-преобразования и построения рациональной дроби в  $S$ -области имеет порядок 0/3 и следующий вид:

$$W(s) = \frac{0,00476}{0,00476 + 0,0952s + 0,5762s^2 + s^3} e^{-4s}.$$

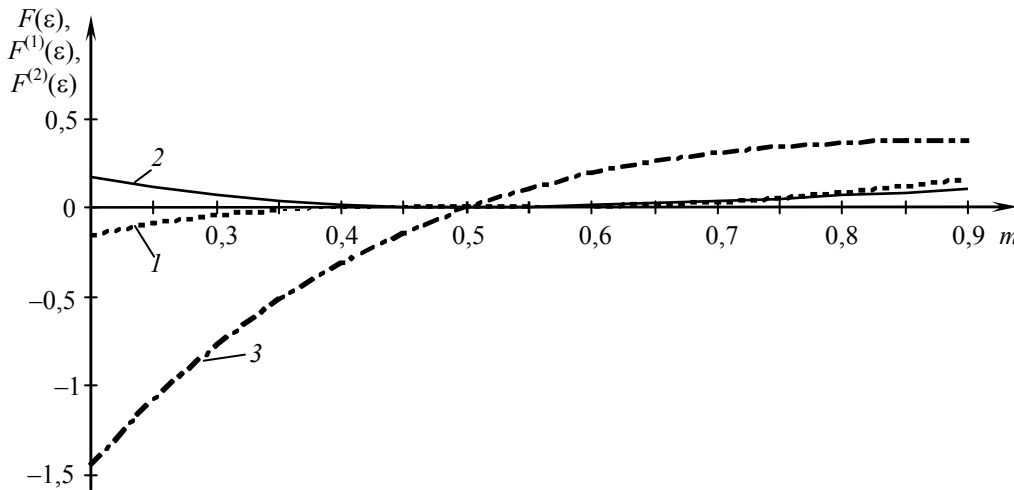


Рис. 3

Сформулируем допущения, на основе которых строится предлагаемый алгоритм идентификации.

1. Уравнение (13) имеет как минимум один действительный корень.
2. Если запаздывание  $d$  модели задано корректно, то по определению параметра смещения  $\varepsilon$  соответствующий корень уравнения (13) принадлежит интервалу  $(0,1]$ , а соответствующее запаздыванию  $d$  значение  $RSS(k,d)$  (см. формулу (4)) минимально.
3. Уравнение (13) может не иметь решений на интервале  $(0,1]$  — это означает, что запаздывание  $d$  задано некорректно.
4. При отклонениях решения  $\varepsilon$  уравнения (13) от интервала  $(0,1]$  запаздывание  $d$  корректируется на величину целой части  $(1-\varepsilon)$ , а скорректированная оценка принадлежит интервалу  $(0,1]$ :

$$T_0 = d - \varepsilon;$$

$$d_{\text{new}} = d + \text{floor}(1 - \varepsilon) = \text{floor}(T_0) + 1, \tag{15}$$

$$\varepsilon_{\text{new}} = d_{\text{new}} - d + \varepsilon = d_{\text{new}} - T_0. \tag{16}$$

5. Новому значению  $\varepsilon_{\text{new}}$  соответствует новый вектор параметров  $\theta_{\text{new}}(k)$ , пересчет которого по  $\theta(k)$  выполняется посредством обратного модифицированного Z-преобразования при  $\varepsilon$ , а затем — посредством прямого модифицированного Z-преобразования при  $\varepsilon_{\text{new}}$  (14):

$$\theta_{\text{new}}(k) = Z(\varepsilon_{\text{new}}, Z^{-1}(\varepsilon, \theta(k))). \quad (17)$$

Такой пересчет позволяет устранить на следующих шагах самонастройки начальное смещение оценки вектора  $\theta(k)$  при изменении запаздывания  $d$ .

6. Величина  $d_{\text{new}}$  стремится (сходится) к значению, корректному относительно текущих динамических свойств объекта управления, что обеспечивает сходимость оценок вектора  $\theta_{\text{new}}(k)$ .

7. Компенсацию значительного отклонения решения  $\varepsilon$  уравнения (13) от интервала (0,1] можно осуществить в несколько шагов самонастройки, т.е. возможно задать ограничение на скорость отслеживания запаздывания.

Сформулированные допущения определяют критерий изменения значения параметра запаздывания модели; далее необходимо привести в соответствие значению  $d_{\text{new}}$  основной параметр рекуррентной вычислительной схемы — обратную матрицу ковариаций.

**Формирование матрицы ковариаций при изменении запаздывания.** Запаздывание и порядок ПФ ДС относятся к структуре цифровой модели. Если структура изменяется, то параметрическая идентификация должна начинаться с формирования новой системы уравнений. Однако если известны ограничения (7), то любая матрица  $R(k, d_{\text{new}})$  может быть получена из заранее сформированной матрицы  $R_{\text{max}}(k)$  (8) простым вычеркиванием лишних строк и столбцов. Далее, для вычислительной схемы РМНК  $P(k, d_{\text{new}}) = R^{-1}(k, d_{\text{new}})$ .

Альтернативный вариант пересчета матрицы ковариаций рассматривается, когда ограничения (7) неизвестны или размерность матрицы  $R_{\text{max}}(k)$  (8) неприемлема для ее хранения.

В работе [16] представлен вариант пересчета матрицы  $R(k, d)$  при изменении величины  $d$  на +1 и -1. Такое ограничение на скорость изменения запаздывания модели обосновывается демпфированием алгоритма самонастройки, а значительные изменения запаздывания объекта управления корректируются на ряде следующих шагов самонастройки.

Вычислительную схему РМНК представим в виде прямого (нерекуррентного) обращения ковариационной матрицы [1,2] и в дополнение к выражениям (5) и (6) запишем

$$R(k, d)\theta(k, d) = F(k, d). \quad (18)$$

Пересчитаем матрицу ковариаций  $R(k, d)$  в матрицу  $R(k, d+1)$ . Матрицы  $R(k, d)$  и  $R(k, d+1)$  содержат одинаковые блоки. Одинаковые блоки можно выделить и в матрицах  $R(k-1, d)$  и  $R(k, d+1)$ . С учетом перекрытия блоков и симметричности матрицы ковариаций „не закрытым“ остается лишь один элемент матрицы  $R(k, d+1)$  —  $r_{2n+1,1}(k, d+1)$ :

$$R(k, d+1) = \begin{bmatrix} A_1(k) & A_2(k, d) & r_{1,2n+1}(k, d+1) \\ A_2^T(k, d) & & B_{2,n+1}(k-1, d) \\ r_{2n+1,1}(k, d+1) & B_{2,n+1}^T(k-1, d) & B_3(k-1, d) \end{bmatrix}.$$

Этот элемент совпадает, исходя из выражений (3), (5) и (6), с последним элементом вектора  $F(k-1, d)$ , взятым со знаком минус:

$$r_{2n+1,1}(k, d+1) = r_{1,2n+1}(k, d+1) = -f_{2n+1}(k-1, d),$$

тогда, учитывая уравнение (18), его можно определить как

$$r_{2n+1,1}(k, d+1) = r_{1,2n+1}(k, d+1) = -R_{2n+1}(k-1, d)\theta(k-1, d),$$

где  $R_{2n+1}(k-1, d)$  — последняя строка матрицы  $R(k-1, d)$ .

Аналогично при пересчете матрицы  $R(k, d)$  в матрицу  $R(k, d-1)$  в парах матриц  $R(k, d)$ ,  $R(k, d-1)$  и  $R(k+1, d)$ ,  $R(k, d-1)$  выделяются одинаковые блоки. С учетом перекрытия блоков и

симметричности матрицы ковариаций „не закрытым“ также остается лишь один элемент матрицы  $R(k, d-1) — r_{n+1,n}(k, d-1)$ :

$$R(k, d-1) = \begin{bmatrix} \tilde{A}_1(k) & \tilde{B}_{2,1}(k+1, d) & \tilde{A}_2(k, d) \\ \tilde{B}_{2,1}^T(k+1, d) & r_{n+1,n}(k, d-1) & \\ \tilde{A}_2^T(k, d) & & \tilde{B}_3(k+1, d) \end{bmatrix}.$$

Определение этого элемента более громоздко: исходя из уравнения (18)

$$R_{n+1}(k, d-1)\theta(k, d-1) = f_{n+1}(k, d-1)$$

при

$$f_{n+1}(k, d-1) = -r_{n+1,1}(k+1, d) = -r_{1,n+1}(k+1, d),$$

и с учетом выражений (3), (5) и (6) получим

$$r_{n+1,n}(k, d-1) = r_{n,n+1}(k, d-1) = \frac{r_{n+1,1}(k+1, d) + \sum_{i=1}^{n-1} r_{n+1,i}(k, d-1)\theta_i(k, d-1) + \sum_{i=n+1}^{2n+1} r_{n+1,i}(k, d-1)\theta_i(k, d-1)}{\theta_n(k, d-1)}.$$

Векторы параметров  $\theta(k, d+1)$  или  $\theta(k, d-1)$  пересчитываются по  $\theta(k, d)$  согласно выражению (17), векторы данных  $\Psi(k, d+1)$  или  $\Psi(k, d-1)$  (см. формулу (3)) формируются на каждом шаге самонастройки.

Итак, для формирования матрицы ковариаций при изменении запаздывания  $d$  на  $\pm 1$  матрица  $R_{\max}(k)$  не используется.

При коррекции  $d$  (и  $\varepsilon$ ) по формулам (15) и (16) скорость отслеживания запаздывания  $\partial\tau$  не должна превышать интервал квантования  $T_0$ :

$$|\partial\tau/T_0| \leq 1.$$

Схема предлагаемого алгоритма коррекции параметров РМНК при текущей идентификации ДС с переменным запаздыванием представлена на рис. 4.

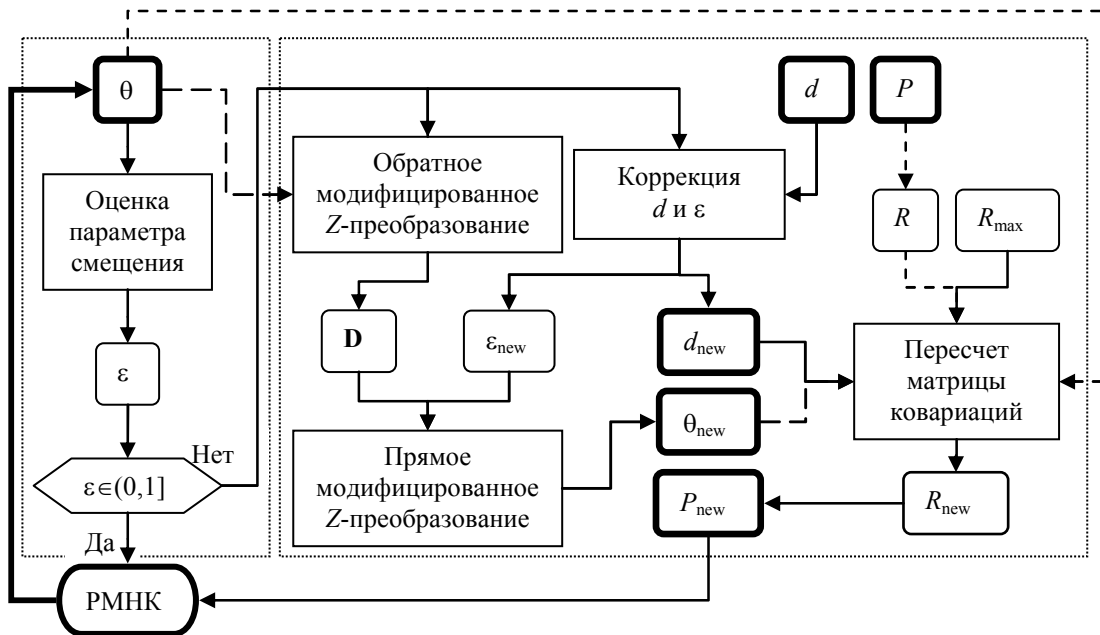


Рис. 4

**Результаты вычислительного эксперимента.** На рис. 5 представлены графики входного (*a*) и выходного (*б*) сигналов системы, а на рис. 6 — графики запаздывания НЧ „объекта“ (*a*) и оценки параметра смещения (*б*): запаздывание  $\tau$  в „объекте управления“ с ПФ НЧ порядка 2/3

$$W(s) = \frac{0,00476 + 0,02857s + 0,03809s^2}{0,00476 + 0,0952s + 0,5762s^2 + s^3} e^{-\tau s}$$

скачкообразно возросло на величину, равную двум интервалам квантования, — с  $1,4T_0$  до  $3,4T_0$ , а затем скачкообразно снизилось на три интервала до  $0,4T_0$ . Фактор „забывания“  $\lambda=0,99$ ,  $T_0=8$ , отношение шум/ сигнал равно 0,1.

На рис. 7 представлены результаты вычислительного эксперимента (*a* — запаздывание, *б* — оценка) при линейных изменениях запаздывания в „объекте“ на  $3T_0$  в течение 300 шагов (самонастройки).

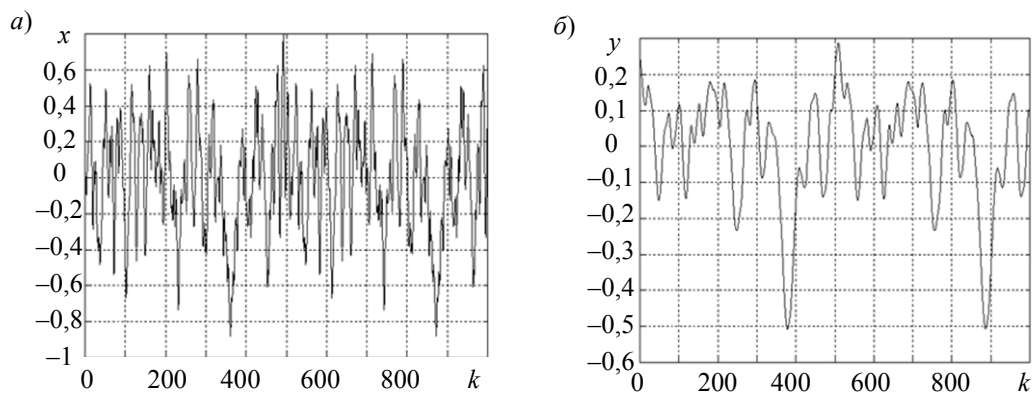


Рис. 5

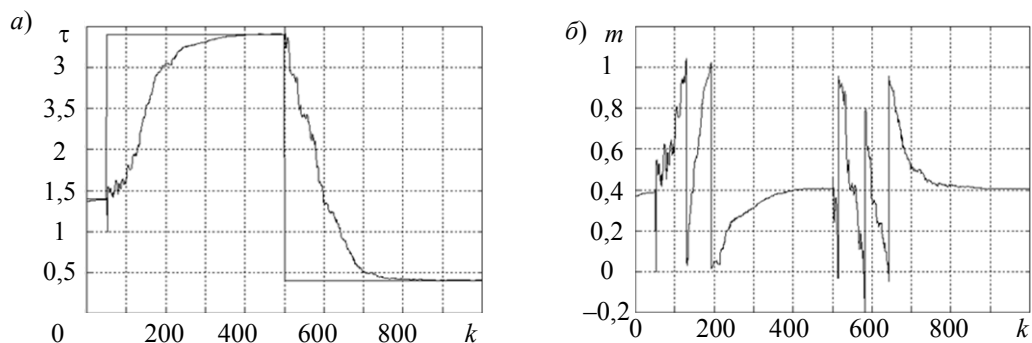


Рис. 6

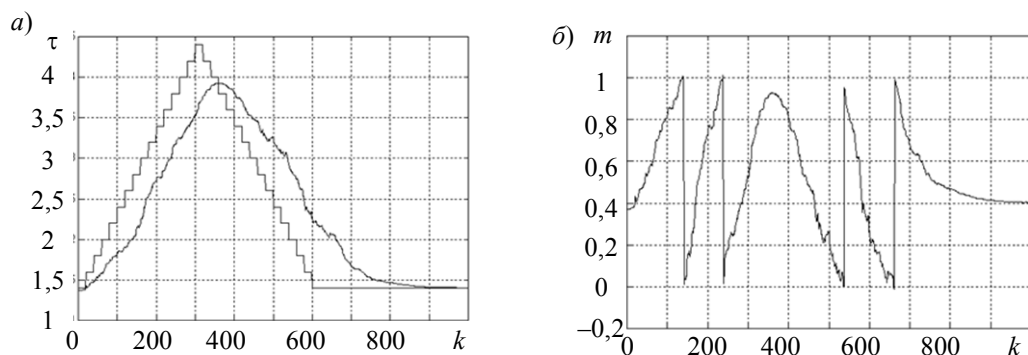


Рис. 7

**Выводы.** Предложен разработанный на основе рекуррентного метода наименьших квадратов алгоритм текущей идентификации объектов управления с переменным запаздыванием, описываемых дискретной системой, состоящей из идеального импульсного элемента, экстраполятора нулевого порядка и линейной непрерывной части.

Алгоритм не накладывает дополнительных ограничений на синтез систем управления и может применяться в замкнутом контуре [16], кроме того, алгоритм достаточно просто реализуется и не требует значительных вычислительных затрат.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Льюнг Л.* Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с англ.; Под ред. *Я. З. Цыпкина*. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. *Изерман Р.* Цифровые системы управления: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 541 с.
3. *Richard J. P.* Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems // *Automatica*. 2003. Vol. 39. P. 1667—1694.
4. *Björklund S.* A survey and comparison of time-delay estimation methods in linear systems // PhD Thes.: Division of Automatic Control. Linköping, Sweden, 2003.
5. *O'Dwyer A.* Time delayed process model parameter estimation: a classification of techniques // Proc. of UKACC Intern. Conf. on Control, Sept. 4—7, 2000. Cambridge, England, 2000.
6. *Roe J., Gao R., O'Dwyer A.* Identification of a time-delayed process model using an overparameterisation method // Proc. of the China — Ireland Intern. Conf. on Information and Communications Technologies (CICT), DCU, Aug. 2007.
7. *Торгашов А. Ю.* Адаптивный идентификатор переменного технологического запаздывания // Тр. VII Междунар. конф. „Идентификация систем и задачи управления SICPRO'08“. М.: Ин-т проблем управления, 2008. С. 185—191.
8. *Карташов В. Я., Сахнин Д. Ю.* Структурно-параметрическая идентификация дискретных моделей объектов с запаздыванием для настройки регуляторов Смита // Управление, вычислительная техника и информатика: Изв. Томск. политехн. ун-та. 2007. Т. 311, № 5. С. 19—23.
9. *Yang Z.-J., Hachino T., Tsuji T.* On-line identification of continuous time-delay systems combining least-squares techniques with a genetic algorithm // Intern. J. of Control. 1997. Vol. 66(1). P. 23—42.
10. *Bedoui S., Ltaief M., Abderrahim K.* Representation of linear time delay systems: multimodel approach // Intern. J. of Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering (IJ-STA). 2012. Vol. 6(1). P. 1692—1705.
11. *De la Sen M.* Robust adaptive control of linear time-delay systems with point time-varying delays via multiestimation // Applied Mathematical Modelling. 2009. Vol. 33(2). P. 959—977.
12. *Ren X. M., Rad A. B., Chan P. T., Lo W. L.* On-line identification of continuous-time systems with unknown time delay // IEEE Transact. on Automatic Control. 2005. Vol. 50(9). P. 1418—1422.
13. *Orlov Y., Belkoura L., Richard J. P., Dambrine M.* Adaptive identification of linear time-delay systems // Intern. J. on Robust and Nonlinear Control. 2003. Vol. 13(9). P. 857—872.
14. *Wong K. Y., Bayoumi M. M.* A self-tuning control algorithm for systems with unknown time delay // Proc. IFAC Identification and System Parameter Estimation Conf. 1982. P. 1193—1198.
15. *Kaur D., Dewan L.* Identification of delayed system using instrumental variable method // J. of Control Theory and Applications. 2012. Vol. 10(3). P. 380—384.
16. *Ахметсафин Р. Д., Брейкин Т. В., Куликов Г. Г., Файзуллин А. Н.* Идентификация параметров управляемого объекта с запаздыванием в замкнутом контуре // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1999. № 3. С. 38—43.
17. *Цыпкин Я. З.* Теория линейных импульсных систем. М.: Физматгиз, 1963.
18. *Джури Э.* Импульсные системы автоматического регулирования: Пер. с англ. М.: Физматгиз, 1963. 455 с.
19. *Острем К., Виттенмарк Б.* Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 480 с.
20. *Липский В.* Комбинаторика для программистов: Пер. с польск. М.: Мир, 1988. 213 с.
21. *Литвинов А. П.* О машинном вычислении передаточных функций дискретных систем управления // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1973. Т. 16, № 12. С. 31—34.



22. Chang F.-C., Mott H. On the matrix related to the partial fraction expansion of a proper rational function // Proc. of the IEEE. 1974. Vol. 62(8). P. 1162—1163.

*Сведения об авторах*

- Раис Дахиевич Ахметсафин** — канд. техн. наук, доцент; ООО „Газпромгеоресурс“, Москва; заместитель начальника управления; E-mail: akhmetsafinrd@mail.ru
- Римма Закиевна Ахметсафина** — канд. техн. наук, доцент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва; E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

Рекомендована  
НИУ „Высшая школа экономики“

Поступила в редакцию  
06.03.13 г.

УДК 004.852, 004.931

П. Н. ДРУЖКОВ

## УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРИЗНАКОВЫХ ОПИСАНИЙ В ЗАДАЧЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Предлагается модификация алгоритма детектирования объектов на изображениях методом бегущего окна, основанная на выборе подмножества признаков с помощью ансамблей деревьев решений. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по сокращению времени детектирования при сохранении качества на примере гистограмм ориентированных градиентов в задаче детектирования пешеходов.

**Ключевые слова:** детектирование объектов, детектирование пешеходов, гистограммы ориентированных градиентов, выбор признаков, деревья решений.

**Введение.** Детектирование объектов на изображениях — одна из важнейших задач компьютерного зрения. Алгоритмы, используемые для решения данной задачи, лежат в основе современных интерфейсов взаимодействия с компьютерными системами и применяются, в частности, в робототехнике, следящих системах и т.д.

Перспективные алгоритмы детектирования основаны на извлечении из изображения (или его части) признаков, характеризующих наличие или отсутствие искомого объекта. На этой основе с помощью алгоритма классификации принимается решение о наличии объекта. В работах [1, 2] было показано, что одновременное использование нескольких признаков описаний позволяет улучшить качество детектирования. Однако это приводит к резкому росту размерности решаемых задач, что увеличивает время настройки детектора и его дальнейшей работы. Таким образом, возникает задача понижения размерности, для решения которой используются алгоритмы извлечения (feature extraction) и отбора (feature selection) признаков.

Для автоматического извлечения и отбора признаков используются различные подходы. Среди них отметим методы генерирования новых признаков путем их проецирования на некоторые направления в пространстве признаков, например, найденные с помощью метода главных компонент или частичных наименьших квадратов [3]. Данные методы, успешно используемые при исследовании пространств высокой размерности, не позволяют, однако, сократить время детектирования. Подход, основанный на поиске значимых признаков в многомерных (вплоть до бесконечномерных) пространствах, предложен в работе [4]; алгоритм генерации признаков, описывающих части объектов, рассматривается в работе [5].

**Постановка задачи и метод ее решения.** Задача детектирования объектов на изображениях заключается в поиске положений всех объектов заданного класса, при этом под положением объекта понимаются координаты обрамляющего его прямоугольника. Входными

данными алгоритма детектирования является изображение  $I$ , заданное в виде матрицы интенсивностей пикселей, а выходными данными — совокупность прямоугольников, обрамляющих изображения всех имеющихся объектов исследуемого класса, и соответствующих им числовых показателей надежности детектирования. Таким образом, задача заключается в максимизации количества правильно детектированных объектов при минимизации числа ложных срабатываний. Как правило, баланс между этими двумя показателями выбирается исходя из требований к конкретной системе детектирования.

Одним из наиболее популярных и перспективных подходов к детектированию объектов на изображении является метод бегущего окна (sliding window) [1], основанный на экстенсивном поиске объектов определенного размера  $w \times h$ , в пикселях. В рамках данного метода задано отображение  $\varphi: I_{w \times h} \rightarrow X = F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_d$  множества всех изображений размером  $w \times h$  во множество их признаковых описаний  $X$ , где  $F_i$  — множество допустимых значений  $i$ -го признака. Требуется решить задачу обучения с учителем [6], т.е. найти (обучить) классифицирующую функцию  $\psi: X \rightarrow \{0,1\}$  из заданного класса  $K$ , такую что  $L(\psi, T) \rightarrow \min$ , где  $L$  — функция штрафа,  $T = \{(x_i, y_i) : x_i \in X, y_i \in \{0,1\}, i = \overline{1, n}\}$  — выборка векторов признаков для изображений при наличии объекта ( $y_i=1$ ) и его отсутствии ( $y_i=0$ ).

Задачу отбора признаков можно формализовать как нахождение такого подмножества признаков  $M$ , при котором целевой признак (класс)  $y$  условно не зависит от признаков  $\{1, 2, \dots, d\} \setminus M$  при заданном  $M$ . На практике точное нахождение такого подмножества сопряжено с существенными трудностями, и задачу можно понимать как нахождение такого подмножества  $M'$  признаков, при котором классификатор, построенный только на этом подмножестве, по качеству не уступает классификатору, использующему все признаки.

**Алгоритм настройки детектора.** В работе [7] предложен алгоритм определения подмножества признаков, использующий ансамбли деревьев решений и итерационно удаляющий лишние признаки из описания  $X$ , а также отсеивающий маскированные (зависимые) признаки и устраняющий влияние выбранных признаков на целевой. Таким образом, на каждой итерации алгоритма осуществляется добавление новых признаков в множество выбранных признаков, изначально предполагаемое пустым. На основе результатов экспериментального сравнения, приведенных в работе [7], можно сделать вывод о том, что указанный алгоритм является одним из лучших.

Общая схема предлагаемого в настоящей статье подхода к решению задачи детектирования на основе метода бегущего окна представляет собой последовательность определенных шагов: обучение детектора с использованием всех признаков с помощью итерационной процедуры дополнения выборки примерами изображений фона [1, 8]; запуск алгоритма выбора подмножества признаков по полученной выборке; обучение классификатора по выборке только с отобранными признаками. При этом на первом и третьем этапах могут быть использованы различные алгоритмы классификации.

**Вычислительный эксперимент.** Рассмотрим результаты экспериментов по обучению детекторов, а также оценке качества и скорости детектирования при использовании подмножеств признаков на примере задачи детектирования пешеходов — одной из ключевых для интеллектуальных систем помощи водителю.

Для обучения детекторов использовалась база TUD-MotionPairs [1], а для тестирования — самая большая на настоящий момент база детектирования CalTech [2]. Тестирование проводилось на каждом тридцатом кадре каждого видеоизображения из наборов set00-set05 в соответствии с методологией, предложенной в работе [2], общее число тестовых изображений 4250. Измерение показателей качества детекторов было реализовано с помощью программных средств базы CalTech.

В качестве признаков описаний использовались гистограммы ориентированных градиентов (HOG — Histograms of Oriented Gradients) [8], являющиеся признанным стандартом в области детектирования пешеходов. Извлечение HOG-признаков осуществлялось с помощью открытой эффективной программной реализации [9]. В качестве классификатора использовались алгоритмы машинного обучения SVM с линейным ядром (Support Vector Machine — метод опорных векторов) [6] и GBT (Gradient Boosting Trees — градиентный бустинг деревьев решений), реализованные в библиотеке OpenCV [10, 11]. Во всех описанных экспериментах использовались детекторы с шагом окна детектирования по вертикали и горизонтали 8 пикселей, и мультипликативным шагом по масштабу 1,1, при этом изначально изображение увеличивалось в 2,5 раза для поиска небольших объектов.

В ходе эксперимента была обучена модель GBT с помощью итерационной процедуры. Данный подход позволяет в результате получить выборку меньшего объема, чем при использовании SVM. На полученной выборке был запущен алгоритм отбора признаков. Затем на выбранном подмножестве признаков и все той же выборке была обучена модель SVM с линейным ядром. Как отмечалось выше, на каждой итерации алгоритма выбора признаков формируется некоторое подмножество. График, представленный на рис. 1, демонстрирует, что рост мощности подмножества ( $N$ ) постепенно замедляется, и при этом даже после 18 итераций величина  $N$  существенно меньше общего количества признаков, равного 3024 (здесь  $n$  — количество итераций).

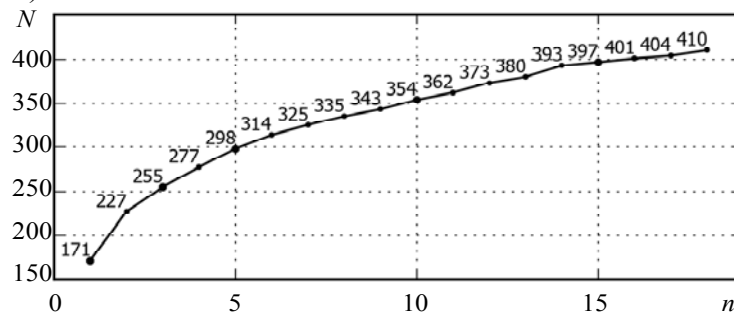


Рис. 1

На подмножествах, полученных после итераций 1, 3, 5, 10 и 15, были обучены линейные модели SVM. Показатели качества детекторов ( $Q(e)$ , где  $Q$  — доля необнаруженных пешеходов,  $e$  — количество ложных срабатываний на одно изображение), использующих данные подмножества, а также детекторов, полученных при обучении моделей SVM и GBT без отбора признаков, и HOG-детектора из библиотеки OpenCV, приведены на рис. 2.

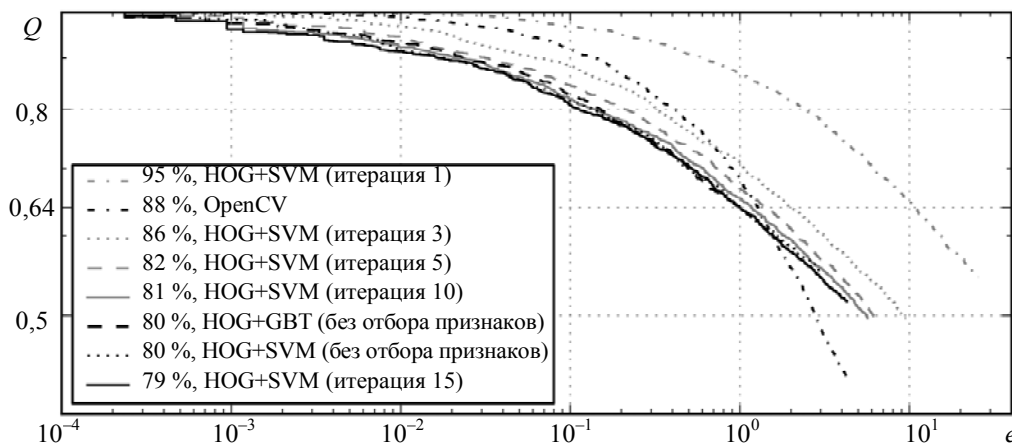


Рис. 2

Кривые получены при варьировании порога по значению надежности детектирования. Анализ графиков показывает, что большинство компонентов HOG-описания являются избыточными и не влияют на качество решения задачи.

HOG-признаки вычисляются блоками по 36 компонентов, в связи с чем при вычислении лишь некоторого подмножества признаков возникают существенные трудности, так как даже блоки для определенного окна детектирования, не содержащие значимых признаков, необходимы при использовании других окон. Однако, во-первых, сокращение размерности может быть использовано для ускорения классификации, а не для вычисления признаков, и, во-вторых, декомпозиция множества вариантов (в частности, принимаемых пешеходом положений/поз) на отдельные случаи может позволить еще больше снизить размерность признаков для каждого из этих случаев.

В ходе экспериментов в качестве конечного классификатора использовалась модель SVM с линейным ядром, позволяющая построить гиперплоскость, разделяющую признаки объектов (пешеходов) и фона. Таким образом, с помощью этого алгоритма требуется определить, с какой стороны от данной гиперплоскости лежит точка в пространстве признаков, что сводится к вычислению скалярного произведения координаты точки и нормали к гиперплоскости. При детектировании объектов методом бегущего окна осуществляется классификация порядка сотни тысяч окон. За счет уменьшения времени вычисления скалярных произведений можно существенно сократить время работы детектора. Так, был проведен эксперимент с использованием 354 признаков, отобранных после 10 итераций работы алгоритма. Описанная модификация позволила уменьшить среднее (по 360 изображениям из набора CalTech set01) время детектирования с 1,54 до 1,15 с (т.е. почти на 25 %). Для экспериментов использовался компилятор Intel C++ Compiler 13.1.0, измерения времени работы детектора проводились с использованием одного ядра процессора Intel Xeon X5570, 12ГБ RAM.

**Заключение.** Рассмотренный алгоритм отбора признаков для построения детектора объектов на изображениях является удобным инструментом анализа признаковых описаний и позволяет ускорить работу детектора при сохранении качества, что подтверждается результатами экспериментов по выделению HOG-признаков в задаче детектирования пешеходов с использованием алгоритма SVM с линейным ядром.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 гг.“, гос. контракт № 11.519.11.4015.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wojek C., Walk S., Schiele B.* Multi-cue onboard pedestrian detection // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'09). 2009. P. 794—801.
2. *Dollár P., Wojek C., Schiele B., Perona P.* Pedestrian detection: an evaluation of the state of the art // Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011. Vol. 34, N 4. P. 743—761.
3. *Schwartz W., Kembhavi A., Harwood D., Davis L.* Human detection using partial least squares analysis // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computer Vision (ICCV). 2009. P. 24—31.
4. *Dollár P., Tu Z., Tao H., Belongie S.* Feature mining for image classification // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'07). 2007. P. 1—8.
5. *Bar-Hillel A., Levi D., Krupka E., Goldberg C.* Part-based feature synthesis for human detection // Proc. of European Conf. on Computer Vision (ECCV'10). 2010. P. 127—142.
6. *Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. Springer, 2009.
7. *Tuv E., Borisov A., Runger G.* Feature selection with ensembles, artificial variables, and redundancy elimination // J. of Machine Learning Research. 2009. N 10. P. 1341—1366.
8. *Dalal N., Triggs B.* Histograms of oriented gradients for human detection // Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05). 2005.

9. Piotr's Image & Video MatLab Toolbox [Электронный ресурс]: <<http://vision.ucsd.edu/~pdollar/toolbox/doc/index.html>, free>.
10. OpenCV Library [Электронный ресурс]: <<http://opencv.org>, free>.
11. *Druzhkov P. N., Eruhimov V. L., Kozinov E. A., Kustikova V. D., Meyerov I. B., Polovinkin A. N., Zolotykh N. Yu.* On some new object detection features in OpenCV Library // Pattern Recognition and Image Analysis. 2011. Vol. 21, N 2. P. 377—379.

**Сведения об авторе**

**Павел Николаевич Дружков** — аспирант; Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, кафедра математической логики и высшей алгебры;  
E-mail: [druzhkov.paul@gmail.com](mailto:druzhkov.paul@gmail.com)

Рекомендована кафедрой  
математического обеспечения ЭВМ

Поступила в редакцию  
07.10.13 г.

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 527.62:523.2+623.466.33

Т. В. ДАНИЛОВА

## АВТОНОМНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ ОРБИТЫ И ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ОТСУТСТВИИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Предлагается метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата относительно осей подвижной орбитальной системы координат на основе анализа годографов его осей, сформированных в результате астроизмерений оптико-электронным прибором, жестко закрепленным на корпусе аппарата под известными углами.

*Ключевые слова:* автономная навигация и ориентация, астроизмерения, годограф оси, оптико-электронный прибор, распознавание звезд.

Предлагается метод автономного определения приблизительных оценок всех неизвестных оскулирующих элементов (ОЭ) орбиты — большой полуоси ( $a$ ), эксцентриситета ( $e$ ), наклонения плоскости орбиты ( $i$ ), аргумента восходящего узла ( $\Omega$ ), аргумента перигея ( $\omega$ ) и истинной аномалии ( $\theta$ ), а также параметров ориентации корпуса космического аппарата (КА) относительно осей текущей орбитальной системы координат (ТОСК) на основе анализа годографов осей КА. Годографы на всем мерном интервале формируются в результате измерений звездных величин и координат звезд, наблюдаемых в поле зрения оптико-электронного прибора (ОЭП), и последующего их распознавания [1].

Под годографом оси КА понимается массив ортов системы координат  $X_{св} Y_{св} Z_{св}$ , связанной с корпусом КА (связанная система координат — ССК). Ось  $X_{св}$  (продольная) ориентирована по трансверсали (ось  $T$  ТОСК), ось  $Z_{св}$  (боковая) — по радиус-вектору (ось  $S$  ТОСК), ось  $Y_{св}$  (также боковая), дополняющая систему до правой, — по бинормали к плоскости орбиты (ось  $W$  ТОСК) [2, 3]. Степень расхождения соответствующих осей ССК и ТОСК определяется погрешностями системы стабилизации.

Рассматриваемый метод разработан при следующих условиях. Во-первых, предполагается, что корпус КА, находящегося в состоянии орбитального полета, стабилизирован относительно осей ТОСК с некоторой постоянной или меняющейся в малом диапазоне погрешностью. Эта погрешность может достигать  $10\text{--}15^\circ$ . Во-вторых, на корпусе КА жестко закреплены  $q$  ОЭП под известными углами  $\lambda_i, \rho_i$ , где  $\lambda_i$  — угол в плоскости  $X_{св} Y_{св}$ , отсчитываемый от оси  $X_{св}$ ,  $\rho_i$  — угол в плоскости  $X_{св} Z_{св}$ , отсчитываемый от оси  $X_{св}$ ,  $i = 1, 2, \dots, q, q \geq 1$ .

Задача определения оценок параметров орбиты и ориентации КА может быть решена в одном из двух режимов:

— режим 1, когда оптические оси двух ОЭП совпадают с осями КА (для ОЭП 1  $\lambda_1 = 0$ ,  $\rho_1 = 90^\circ$ ; для ОЭП 2  $\lambda_2 = 90^\circ$ ,  $\rho_2 = 0$ );

— режим 2, когда один ОЭП закреплен на корпусе под произвольными углами, при этом орты осей КА рассчитываются через орты осей приборной системы координат (ПСК) [1].

Режим 1 обеспечивает более точный расчет параметров ориентации КА в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат (ГЭИСК), но режим 2, как менее требовательный к количеству измерителей и углам их закрепления, предпочтительней.

Орты осей ССК, составляющие годографы, рассчитываются на основе распознавания и последующего анализа звездного поля, наблюдаемого в ОЭП [1]. Для решения задачи используются годографы осей  $Y_{св}$  и  $Z_{св}$  (соответственно годографы  $W$  и  $S$ ).

Алгоритм расчетов заключается в следующем: выбирается момент времени  $t_1$ , для которого будут выработаны оценки ОЭ и который принимается за начало мерного интервала (начало витка), от этого момента ведется относительный отсчет времени. Измерения производятся через равные промежутки времени, с установленным шагом  $dt$ .

*Формирование годографов, фиксирование конца витка.* На каждом измерительном сеансе с номером  $j$  в момент времени  $t_j$ ,  $t_j = t_1 + (j - 1)dt$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots$ , каждым из задействованных ОЭП измеряются звездные величины и приборные координаты звезд, находящихся в поле зрения прибора. После этого производится распознавание звезд и определяется ориентация осей ОЭП в ГЭИСК [1]. В режиме 1 орты оптических осей ОЭП 1 и ОЭП 2 ( $\zeta_{1j}$  и  $\zeta_{2j}$ ) являются ортами осей  $Z_{св}$  и  $Y_{св}$  (обозначим их как  $\mathbf{c}_{1j}$  и  $\mathbf{c}_{2j}$  соответственно), т.е.  $\mathbf{c}_{1j} = \zeta_{1j}$  и  $\mathbf{c}_{2j} = \zeta_{2j}$ ; в режиме 2 векторы  $\mathbf{c}_{1j}$  и  $\mathbf{c}_{2j}$  рассчитываются через орты осей ПСК и углы закрепления ОЭП [1]. Таким образом формируются годографы  $S$  и  $W$ , элементами которых являются векторы  $\mathbf{c}_{1j}$  и  $\mathbf{c}_{2j}$ , относящиеся к моментам времени  $t_j$ .

Пусть угол между начальным и текущим положениями направления оси  $Z_{св}$

$$\varphi_j = \arccos(\mathbf{c}_{11}, \mathbf{c}_{1j}). \quad (1)$$

Очевидно, что на первой половине витка этот угол увеличивается, а на второй уменьшается. Измерения заканчиваются в момент  $t_2$ , когда угол  $\varphi_j$  уменьшается и достигает своего минимума, т.е. выполняется условие

$$\varphi_j > \varphi_{j-1}, \quad (2)$$

при этом можно сделать вывод о завершении витка.

Обозначим через  $N$  номер сеанса, на котором выполняется условие (2), тогда  $t_2 = t_N$ . Время  $T = t_2 - t_1$  принимается в качестве начальной оценки периода орбиты, которая впоследствии уточняется.

*Оценки параметров ориентации плоскости орбиты.* Оценки наклона плоскости орбиты ( $i$ ) и аргумента восходящего узла ( $\Omega$ ) однозначно определяются вектором нормали  $\mathbf{n}$  к плоскости орбиты, который определяется на основе анализа годографа  $W$ . В идеальном случае, при нулевых погрешностях системы стабилизации, элементы годографа  $W$  практически идентичны на всех измерительных сеансах и совпадают с искомым вектором  $\mathbf{n}$ .

В реальных условиях, при наличии постоянных или изменяющихся в малом диапазоне погрешностей стабилизации, орт оси  $Z_{св}$  описывает конус, направление в центр основания которого и есть искомым вектор нормали, а годограф  $W$  представляет собой замкнутую кривую, близкую к окружности с центром  $\alpha_0$ ,  $\delta_0$  (где  $\alpha$  — прямое восхождение,  $\delta$  — склонение). При постоянных погрешностях системы стабилизации центр этой окружности может быть определен как среднее наименьшего и наибольшего значений соответствующих

координат, а при вариации погрешностей — через метод наименьших квадратов — как центр окружности, наилучшим образом аппроксимирующей линию годографа  $W$ . При этом нормаль  $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3) = (\cos \delta_0 \cos \alpha_0, \cos \delta_0 \sin \alpha_0, \sin \delta_0)$ .

Примеры построения годографа оси  $Z_{св}$  приведены на рис. 1, где контур  $A$  получен при погрешностях системы стабилизации по углам тангажа, рыскания и крена, равных  $0,1^\circ$ ; контур  $B$  — то же, при  $3,0^\circ$ ; контур  $C$  — то же, при  $10,0^\circ$ .

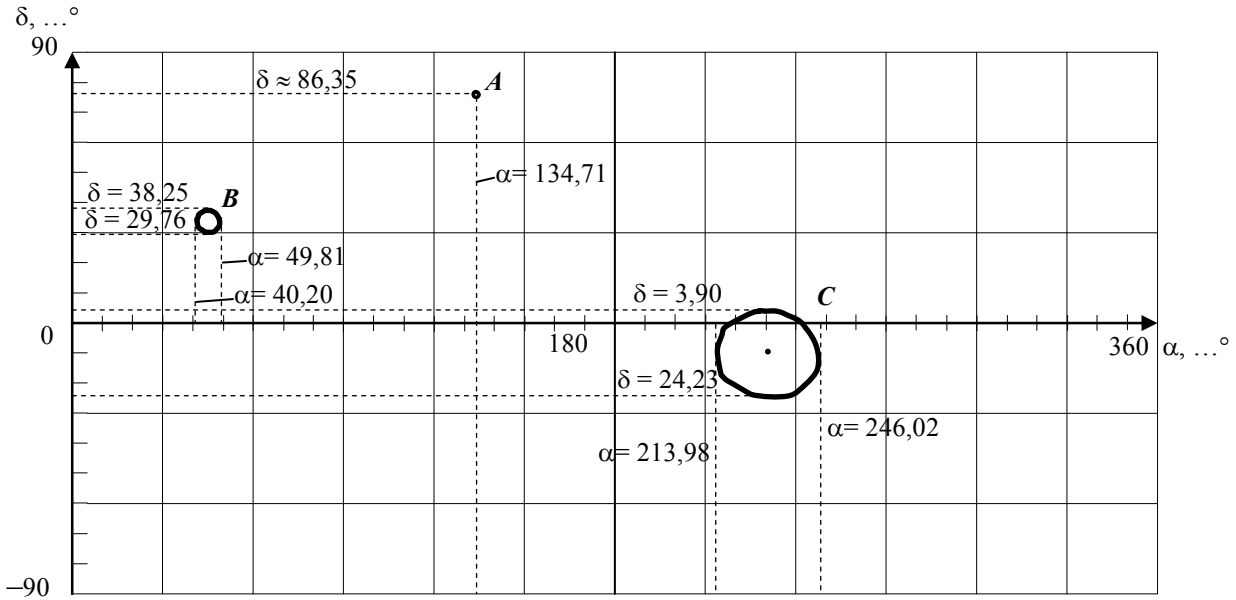


Рис. 1

Наклонение орбиты равно углу между нормалью  $\mathbf{n}$  и осью  $Z$  ГЭИСК, т.е.  $i = \arccos n_3$ .

Направление в точку восходящего узла определяется векторным произведением

$$\mathbf{c}_\Omega = \mathbf{k} \cdot \mathbf{n}, \tag{3}$$

где  $\mathbf{k}$  — орт оси  $Z$ ,  $\mathbf{k} = (0,0,1)$ .

Алгоритм расчета величин  $i$  и  $\Omega$ , а также аргумента перигея  $\omega$  и истинной аномалии  $\theta$  иллюстрируется рис. 2, здесь  $\mathbf{c}_P$  — единичный вектор, направленный в точку перигея;  $\mathbf{c}_\Omega$  — единичный вектор, направленный в точку восходящего узла.

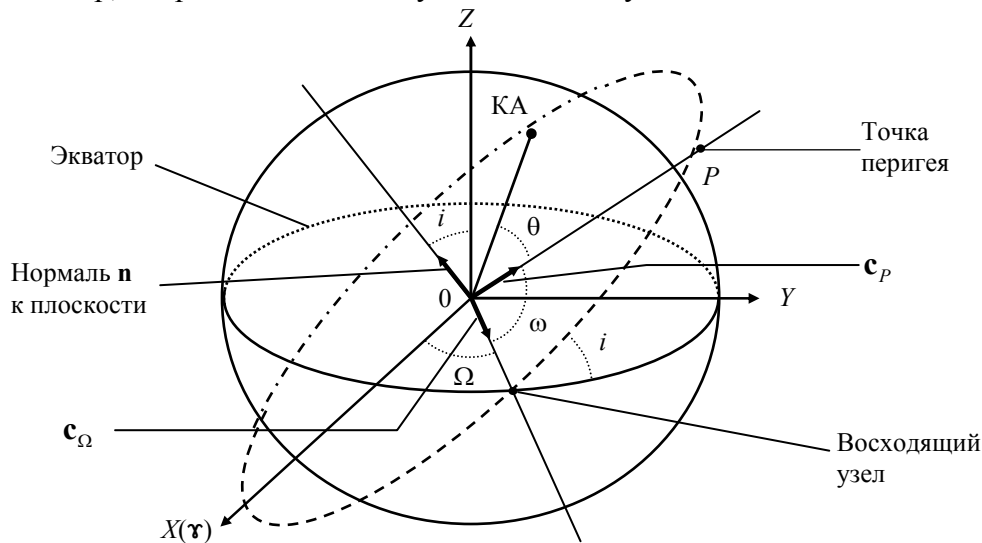


Рис. 2

Оценки периода и большой полуоси орбиты. Уточнение периода поясним рис. 3, где представлены два возможных варианта взаимного расположения векторов  $\mathbf{c}_{11}$ ,  $\mathbf{c}_{1N-1}$  и  $\mathbf{n}$ .



Если смешанное произведение этих векторов  $u = [\mathbf{n} \mathbf{c}_{1N-1} \mathbf{c}_{11}] < 0$ , то имеет место вариант А, в противном случае — вариант Б. При варианте Б полагается  $T = T - dt$ , а  $N = N - 1$ .

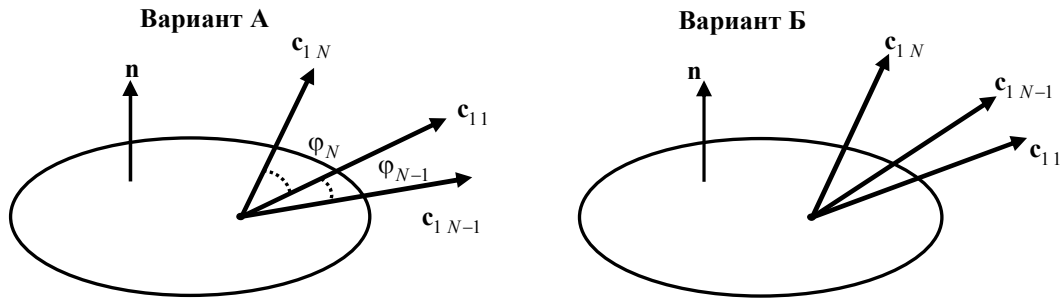


Рис. 3

Далее, для обоих вариантов положим  $\Delta t = \frac{\varphi_N}{\varphi_{N-1} + \varphi_N} dt$ , где углы  $\varphi_N$  и  $\varphi_{N-1}$  определены

в уравнении (1), и получим следующее уточнение оценки периода:  $T = T - \Delta t$ , после чего известным образом определяется приблизительное значение большой полуоси:

$$a \approx \left( \sqrt[3]{\frac{\mu T}{2\pi}} \right)^2.$$

*Оценка эксцентриситета орбиты.* Оценка эксцентриситета рассчитывается из соотношения наименьшего и наибольшего углов между соседними элементами годографа  $S$ :

$$\beta_j = \arccos(\mathbf{c}_{1j-1}, \mathbf{c}_{1j}), \quad j=1, \dots, N. \tag{4}$$

Наименьший ( $\beta'$ ) и наибольший ( $\beta''$ ) углы, „описываемые“ осью  $Z_{св}$  за равные промежутки времени, соответственно равны

$$\beta' = \min_j \beta_j, \quad \beta'' = \max_j \beta_j. \tag{5}$$

В силу того что измерительные сеансы проводились через равные интервалы времени, радиус-вектор орбиты описывает в течение этих интервалов и равные площади (второй закон Кеплера). Аналогичное заключение справедливо (с некоторой погрешностью) и в отношении оси  $Z_{св}$  (вектор  $\mathbf{c}_{1j}$ ), ориентированной по оси  $S$  ТОСК с погрешностью, определяемой функционированием системы стабилизации.

На рис. 4 схематично представлено положение вектора  $\mathbf{c}_{1j}$  в идеальном случае, при малых погрешностях. Направляющие векторы прямых  $AB$ ,  $AC$ ,  $AD$  и  $AE$  — есть положения вектора  $\mathbf{c}_{1j}$ , соответствующие областям перигея и апогея; при этом  $\angle BAC = \beta''$  — наибольший,  $\angle DAE = \beta'$  — наименьший.

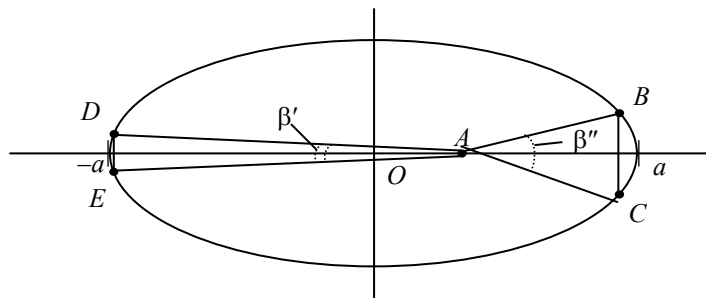


Рис. 4

Для эллипса справедливо равенство  $OA = ae$ , кроме того, согласно закону Кеплера

$$S_{\Delta ABC} \approx S_{\Delta ADE}. \tag{6}$$

Если  $h_1$  — высота  $\triangle ABC$ ,  $h_2$  — высота  $\triangle ADE$ , то из выражения (6) следует, что  $h_1^2 \operatorname{tg}(\beta''/2) \approx h_2^2 \operatorname{tg}(\beta'/2)$ ; отсюда

$$b \approx \frac{h_1}{h_2} = \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\beta'/2)}{\operatorname{tg}(\beta''/2)}}. \quad (7)$$

Так как  $\beta' < \beta''$ , то  $0 < b < 1$ . Исходя из свойств эллипса

$$\left. \begin{aligned} h_1 + h_2 &= 2a; \\ h_2 - h_1 &= 2ae, \end{aligned} \right\}$$

отсюда  $e = \frac{1-b}{1+b}$ , где  $b$  определено согласно выражению (7).

Оценки аргумента перигея и истинной аномалии орбиты. Пусть максимум угла  $\beta_j$ , определенного в выражении (4), достигается при  $j = j'$ , при этом в качестве начальной оценки направления в точку перигея принимается вектор

$$\mathbf{c}_P = \frac{p_2}{p_1 + p_2} \mathbf{c}_{1j'-1} + \frac{p_1}{p_1 + p_2} \mathbf{c}_{1j'},$$

где  $p_1 = \operatorname{tg}\left(\frac{\beta'' - \beta_{j'-1}}{2}\right)$ ,  $p_2 = \operatorname{tg}\left(\frac{\beta'' - \beta_{j'+1}}{2}\right)$ , угол  $\beta''$  определен в выражении (5).

Вектор  $\mathbf{c}_P$  для орбит с эксцентриситетом  $e > 0,1$  уточняется путем формирования аппроксимирующего полинома третьей степени  $f(t) = at^3 + bt^2 + ct + d$ , минимизирующего сум-

му квадратов невязок  $F(a, b, c, d) = \sum_{j=1, N} (f(t) - \beta_j)^2$ . Из условия

$$\left. \begin{aligned} F'_a &= 0 \\ F'_b &= 0 \\ F'_c &= 0 \\ F'_d &= 0 \end{aligned} \right\}$$

определяются коэффициенты полинома, время прохождения перигея определяется как точка максимума  $f(t)$ .

Применение аппроксимации для околокруговых орбит не приносит положительного эффекта, и поэтому аппроксимация не производится.

Оценка аргумента перигея формируется как угол между векторами, направленными в точку восходящего узла и в точку перигея (см. рис. 2), т.е.

$$\omega = \arccos(\mathbf{c}_\Omega, \mathbf{c}_P).$$

Оценка истинной аномалии зависит от момента времени  $t_j$ , в который этот параметр формируется, и рассчитывается как функция  $F_\theta$  вектора  $\mathbf{c}_{1j}$  и вектора  $\mathbf{c}_P$ , т.е.

$\theta_j = F_\theta(\mathbf{c}_{1j}, \mathbf{c}_P)$ . Функция  $F_\theta$  определяется следующим образом:

1) первоначально полагается

$$\theta_j = \arccos(\mathbf{c}_{1j}, \mathbf{c}_P); \quad (8)$$

2) далее рассчитывается смешанное произведение векторов

$$s = [\mathbf{n} \mathbf{c}_P \mathbf{c}_{1j}]; \quad (9)$$

3) оценка истинной аномалии уточняется в зависимости от знака  $s$ :

$$\theta_j = 360 - \theta_j \text{ при } s < 0. \quad (10)$$

Для определяемой точки орбиты (начало витка,  $t = t_1$ ) полагаем  $\theta = \theta_1 = F_0(\mathbf{c}_{11}, \mathbf{c}_P)$ , для конечной точки мерного интервала  $\theta = \theta_N = F_0(\mathbf{c}_{1N}, \mathbf{c}_P)$ .

*Уточнение оценок аргумента перигея и истинной аномалии на основе формирования оценок погрешностей системы стабилизации.* Точность оценок  $\omega$  и  $\theta$  значительно ухудшается с ростом погрешностей стабилизации. Для нивелирования этого эффекта разработан итеративный алгоритм. Прежде всего, известным образом по сформированным оскулирующим элементам определяемой точки орбиты рассчитывается ее радиус-вектор  $\mathbf{R}$  и вектор скорости  $\mathbf{V}$  [2, 3]. Далее выполняются следующие действия.

**Шаг 1.** Расчет оценок погрешностей стабилизации. На каждой точке мерного интервала ( $j = 1, \dots, N$ ) формируются матрицы перехода  $G_j$  (из ГЭИСК в ССК) и  $H_j$  (из ГЭИСК в ТОСК): строки матрицы  $G_j$  состоят из ортов осей ССК в ГЭИСК, при этом орты осей  $Z_{\text{СВ}}$  и  $Y_{\text{СВ}}$  — элементы годографов  $S$  и  $W$  соответственно (векторы  $\mathbf{c}_{1j}$  и  $\mathbf{c}_{2j}$ ), а орт оси  $X_{\text{СВ}}$  — их векторное произведение; матрица  $H_j$  известным образом [2, 3] определяется через наклонение  $i$ , аргумент восходящего узла  $\Omega$ , аргумент перигея  $\omega$  и истинную аномалию  $\theta$ , при этом оценки первых трех углов сформированы и полагаются одинаковыми для всех  $j$ , а истинная аномалия для каждого  $j$  рассчитывается через вектор  $\mathbf{c}_{1j}$  согласно выражениям (8)—(10). В силу того что изменяемым параметром при расчете матрицы  $H_j$  является истинная аномалия  $\theta$ , обозначим

$$H_j = H(\theta_j). \quad (11)$$

Из условия  $G_j = B_j H_j$ , где  $B_j$  — матрица перехода из ТОСК в ССК, получаем  $B_j = G_j H_j^T$ . С другой стороны, элементы матрицы  $B_j$  могут быть выражены через углы тангажа ( $\vartheta_j$ ), рыскания ( $\psi_j$ ) и крена ( $\gamma_j$ ) [2, 3]:

$$B_j = \begin{vmatrix} -\sin \vartheta_j \cos \psi_j & \cos \vartheta_j \cos \psi_j & \sin \psi_j \\ \cos \vartheta_j \sin \gamma_j + \sin \vartheta_j \sin \psi_j \cos \gamma_j & \sin \vartheta_j \sin \gamma_j - \cos \vartheta_j \sin \psi_j \cos \gamma_j & \cos \psi_j \cos \gamma_j \\ \cos \vartheta_j \cos \gamma_j - \sin \vartheta_j \sin \psi_j \sin \gamma_j & \sin \vartheta_j \cos \gamma_j + \cos \vartheta_j \sin \psi_j \sin \gamma_j & -\cos \psi_j \sin \gamma_j \end{vmatrix}.$$

Отсюда рассчитываются  $\vartheta_j$ ,  $\psi_j$  и  $\gamma_j$ , например,  $\psi_j = \arcsin\left(\left(B_j\right)_{1,3}\right)$ . Окончательные оценки углов  $\vartheta$ ,  $\psi$  и  $\gamma$  на всем мерном интервале рассчитываются как сглаженные по методу наименьших квадратов текущие значения  $\vartheta_j$ ,  $\psi_j$  и  $\gamma_j$  [2, 3].

**Шаг 2.** Расчет матрицы поворота вокруг осей ТОСК. С использованием полученных значений углов  $\vartheta$ ,  $\psi$  и  $\gamma$  рассчитывается матрица поворотов  $M_R$  на противоположные углы ( $-\vartheta$ ,  $-\psi$  и  $-\gamma$ ) в целях виртуального приближения оси  $Z_{\text{СВ}}$  к оси  $S$ :

$$M_R = \begin{vmatrix} \cos \vartheta \cos \gamma - \sin \vartheta \sin \psi \sin \gamma & \sin \vartheta \cos \gamma + \cos \vartheta \sin \psi \sin \gamma & -\cos \psi \sin \gamma \\ -\sin \vartheta \cos \psi & \cos \vartheta \cos \psi & \sin \psi \\ \cos \vartheta \sin \gamma + \sin \vartheta \sin \psi \cos \gamma & \sin \vartheta \sin \gamma - \cos \vartheta \sin \psi \cos \gamma & \cos \psi \cos \gamma \end{vmatrix}.$$

**Шаг 3.** Поворот векторов  $\mathbf{c}_P$ ,  $\mathbf{c}_{11}$ ,  $\mathbf{c}_{1N}$ . Над каждым из векторов  $\mathbf{c}_P$ ,  $\mathbf{c}_{11}$ ,  $\mathbf{c}_{1N}$  производится операция, в результате которой формируются их новые значения:

$$\mathbf{c}_{P,\text{New}} = H_0^T M_R H_0 \mathbf{c}_P; \quad \mathbf{c}_{11,\text{New}} = H_1^T M_R H_1 \mathbf{c}_{11}; \quad \mathbf{c}_{1N,\text{New}} = H_N^T M_R H_N \mathbf{c}_{1N},$$

где матрица  $H_j$  определена в выражении (11), для точки перигея полагается  $H_0 = H(0)$ .

**Шаг 4.** Уточнение аргумента перигея и истинной аномалии:

$$\omega_{\text{New}} = \arccos(\mathbf{c}_{\Omega}, \mathbf{c}_{P, \text{New}}), \quad \theta_{\text{New}} = \theta_1 = F(\mathbf{c}_{11, \text{New}}, \mathbf{c}_{P, \text{New}}).$$

Дополнительно определяется  $\theta_N = F(\mathbf{c}_{1N, \text{New}}, \mathbf{c}_{P, \text{New}})$ .

**Шаг 5.** Расчет поправок. Рассчитываются радиус-вектор  $\mathbf{R}_{\text{New}}$  и вектор скорости  $\mathbf{V}_{\text{New}}$  в предположении  $\omega = \omega_{\text{New}}$ ,  $\theta = \theta_{\text{New}}$ , а также поправки  $\Delta R = |\mathbf{R} - \mathbf{R}_{\text{New}}|$ ,  $\Delta V = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_{\text{New}}|$ . Если  $\Delta R < \varepsilon_R$  и  $\Delta V < \varepsilon_V$  ( $\varepsilon_R$ ,  $\varepsilon_V$  — малые числа), то итеративный процесс завершается, в противном случае повторяются шаги 1—5.

Опыт моделирования показал, что, во-первых, применение рассмотренного итеративного алгоритма позволяет повысить точность определения орбиты в несколько раз, а во-вторых, алгоритм сходится, и количество итераций обычно не превышает 10.

Количественными характеристиками точности определения орбиты являются  $dR = |\mathbf{R}_p - \mathbf{R}_\phi|$  и  $dV = |\mathbf{V}_p - \mathbf{V}_\phi|$ , где  $\mathbf{R}_p$  и  $\mathbf{V}_p$  — радиус-вектор и вектор скорости в определяемой (рассчитываемой) точке орбиты,  $\mathbf{R}_\phi$  и  $\mathbf{V}_\phi$  — радиус-вектор и вектор скорости в начальной точке мерного интервала фактической орбиты, последняя задается в исходных данных задачи и применяется для моделирования измерений.

Моделирование проводилось в режиме 2 при постоянных погрешностях стабилизации (до  $15^\circ$  по каждому из углов: тангаж, рыскание и крен), погрешности ОЭП от 0,1 до 30" и шаге между измерительными сеансами от 150 до 500 с. При этом число измерительных сеансов в зависимости от орбиты составляло от нескольких десятков до нескольких сотен.

В таблице приведены результаты моделирования подсистемы автономной навигации на основе разработанного метода для различных орбит и погрешностей системы стабилизации при среднеквадратической погрешности измерений 0,5" и шаге измерений 300 с.

Определяемые параметры	Фактическая орбита	Фактические погрешности системы стабилизации ( $\vartheta$ ; $\psi$ ; $\gamma$ , ... °)					
		0; 0; 0	1; 1; 1	3; 3; 3	5; 5; 5	10; 10; 10	15; 15; 15
$a$	6780	6796,178	6796,170	6796,212	6796,208	6796,244	6796,270
$e$	0,01	0,011	0,010	0,011	0,011	0,011	0,011
$i$	85	85,002	85,003	85,005	85,003	85,006	84,996
$\Omega$	120	119,977	119,975	119,988	119,988	119,967	119,981
$\omega$	10	17,860	20,575	20,257	20,257	17,324	18,679
$\theta$	80	72,143	70,222	72,567	72,567	72,013	69,403
$dR$		6,000	94,066	168,960	333,586	78,859	226,825
$dV$		3,990	106,760	191,593	377,108	90,472	257,381
$\Delta\vartheta$		0,023	2861,823	5139,055	10156,060	2338,726	6491,062
$\Delta\psi$		27,937	2,788	3,749	6,552	5,170	9,684
$\Delta\gamma$		25,349	22,866	22,492	22,258	22,639	22,825
$a$	7378	7388,272	7388,289	7388,302	7388,312	7388,366	7388,367
$e$	0,01	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
$i$	85	85,002	85,003	85,004	84,994	85,009	84,996
$\Omega$	45	44,980	44,986	44,985	44,987	44,974	44,993
$\omega$	20	25,242	25,366	26,325	25,361	26,123	23,493
$\theta$	100	94,759	95,201	94,737	96,120	93,249	93,243
$dR$		3,507	73,169	136,788	190,945	81,307	421,018
$dV$		3,910	75,186	138,200	192,296	78,556	415,675
$\Delta\vartheta$		0,023	2035,873	3811,885	5326,479	2153,942	11035,158
$\Delta\psi$		24,835	11,379	11,458	13,847	12,067	16,350
$\Delta\gamma$		23,405	16,300	15,756	16,285	15,398	12,789

Продолжение таблицы

Определяемые параметры	Фактическая орбита	Фактические погрешности системы стабилизации ( $\vartheta$ ; $\psi$ ; $\gamma$ , ... °)					
		0; 0; 0	1; 1; 1	3; 3; 3	5; 5; 5	10; 10; 10	15; 15; 15
$a$	25478	25480,749	25480,774	25480,837	25480,818	25480,900	25480,939
$e$	0,01	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
$i$	63	63,001	63,001	63,001	63,001	63,000	63,002
$\Omega$	0	359,991	359,991	359,990	359,990	359,992	359,990
$\omega$	20	20,979	16,576	22,630	24,812	18,119	22,336
$\theta$	70	69,025	74,121	68,648	66,369	71,580	66,381
$dR$		2,564	307,716	564,271	521,282	135,531	570,728
$dV$		0,840	46,675	88,090	82,024	22,044	88,775
$\Delta\vartheta$		0,171	2494,113	4583,133	4234,567	1020,494	4205,770
$\Delta\psi$		9,279	0,145	0,007	0,633	1,207	1,840
$\Delta\gamma$		8,831	8,606	8,490	8,859	8,705	8,879
$a$	29000	29013,428	29013,429	29013,457	29013,476	29013,510	29013,537
$e$	0,75	0,751	0,751	0,751	0,751	0,751	0,751
$i$	63	63,005	63,004	63,004	63,006	63,004	63,020
$\Omega$	0	9,966	9,980	9,976	9,968	9,933	9,872
$\omega$	40	39,886	40,192	39,467	40,985	41,733	37,812
$\theta$	85	85,130	85,131	85,133	85,135	85,075	84,966
$dR$		9,541	65,520	85,825	229,917	369,504	474,157
$dV$		11,063	30,689	62,269	131,302	219,766	291,963
$\Delta\vartheta$		0,083	1125,230	1484,515	3950,626	5446,038	8539,232
$\Delta\psi$		52,636	25,395	33,395	42,869	115,116	216,787
$\Delta\gamma$		62,750	26,591	34,007	49,589	96,044	212,305
$a$	42400	42397,905	42398,022	42397,974	42397,934	42397,968	42397,857
$e$	0,01	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
$i$	0,01	0,009	0,009	0,009	0,009	0,010	0,009
$\Omega$	0	3,198	0,094	1,039	0,648	4,220	4,821
$\omega$	70	63,590	61,221	71,571	62,917	72,682	69,960
$\theta$	90	93,212	99,738	89,544	99,439	87,188	89,579
$dR$		21,982	783,321	1593,673	2225,894	3024,949	3225,699
$dV$		1,756	55,732	114,372	160,394	218,547	232,434
$\Delta\vartheta$		0,001	3109,282	7752,554	10819,721	14788,638	16138,712
$\Delta\psi$		1,367	0,551	0,317	0,562	0,600	0,591
$\Delta\gamma$		1,566	1,126	1,124	1,258	1,112	1,151
$a$	27800	27753,026	27753,028	27753,019	27749,603	27749,593	27749,523
$e$	0,75	0,751	0,751	0,751	0,750	0,750	0,750
$i$	0,01	0,010	0,009	0,011	0,013	0,046	0,012
$\Omega$	120	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\omega$	60	60,099	60,417	59,758	60,497	58,365	56,101
$\theta$	60	59,900	59,903	59,903	59,995	59,974	59,783
$dR$		43,706	64,497	66,247	77,084	256,931	635,218
$dV$		24,607	57,537	52,515	75,625	251,382	613,992
$\Delta\vartheta$		0,001	1150,473	1219,514	1758,297	6017,102	14840,379
$\Delta\psi$		1,328	1,608	1,528	3,004	33,708	0,806
$\Delta\gamma$		0,997	2,055	3,294	6,895	90,974	4,205

Примечание. Параметр  $a$  измеряется в километрах; параметры  $i$ ,  $\Omega$ ,  $\omega$ ,  $\theta$  — в градусах;  $dR$  — в километрах;  $dV$  — в метрах в секунду;  $\Delta\vartheta$ ,  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\gamma$  — в угловых секундах.

Представленные в таблице оценки использовались в качестве априорных данных при решении задачи навигации и ориентации методом виртуальных измерений зенитных расстояний звезд [4, 5]. Точность решения задачи согласуется с точностью, полученной при произвольном назначении априорных данных, как правило, близких к фактической орбите.

Таким образом, точность выработанных с использованием предложенного метода приближительных оценок параметров орбиты и ориентации корпуса КА достаточна для того, чтобы принять их в качестве опорных значений и тем самым восстановить функционирование системы автономной навигации и ориентации в нештатных ситуациях, связанных с отсутствием данных об орбите.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилова Т. В., Арихипова М. А. Определение ориентации космического аппарата в геоцентрической экваториальной системе координат на основе астроизмерений при отсутствии данных о параметрах орбиты // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 13—20.
2. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автоматизированная система исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006.
3. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Монография. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010.
4. Пат. 2454631. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов на основе виртуальных измерений зенитных расстояний звезд / В. И. Кузнецов, Т. В. Данилова, Д. М. Косулин. 28 окт. 2010 г.
5. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космические исследования. 2011. Т. 49, № 6. С. 551—562.

#### *Сведения об авторе*

**Тамара Валентиновна Данилова** — канд. техн. наук; Военный институт Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург; E-mail: danitoma58@yandex.ru

Рекомендована  
Военным институтом ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию  
18.06.13 г.

УДК 004.3

А. И. ПОСЯГИН, А. А. ЮЖАКОВ

### САМОМАРШРУТИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ В АНАЛОГО-ЦИФРОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Рассматривается аналого-цифровой преобразователь на основе нейронной сети. Для предложенной структуры описываются принципы самомаршрутизации сигналов и образования индивидуальных аналого-цифровых преобразователей для каждого входного сигнала.

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь, самомаршрутизация, нейронная сеть.

В настоящее время актуальность разработки аналого-цифровых преобразователей новых современных архитектур не вызывает сомнений. Наиболее важные проблемы при построении данных устройств — повышение точности, надежности и отказоустойчивости, а также умень-

шение ресурсоемкости [1]. В работах [2, 3] рассмотрена возможность создания архитектуры аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на основе нейронной сети (НС), одним из ключевых принципов функционирования которого является самомаршрутизация сигналов. Самомаршрутизация позволяет выделить во всем объеме НС некоторое количество нейронов, необходимое для реализации индивидуального АЦП для каждого входного сигнала. В общем случае предлагаемый АЦП представляет собой  $n$ -отказоустойчивую систему, т.е. позволяет выполнять требуемые задачи даже при отказе  $n$  элементов. Таким образом, система самомаршрутизации сигналов должна учитывать наличие отказавших элементов и иметь возможность исключения их из состава индивидуального АЦП с сохранением заданных параметров.

Структура АЦП (рис. 1) представляет собой блок компараторов, на которые поступают входные аналоговые сигналы, схему вычисления требуемой разрядности индивидуального АЦП для обработки каждого входного сигнала и собственно нейронную сеть, основная задача которой — образование индивидуальных АЦП по каждому входному сигналу [2, 3].

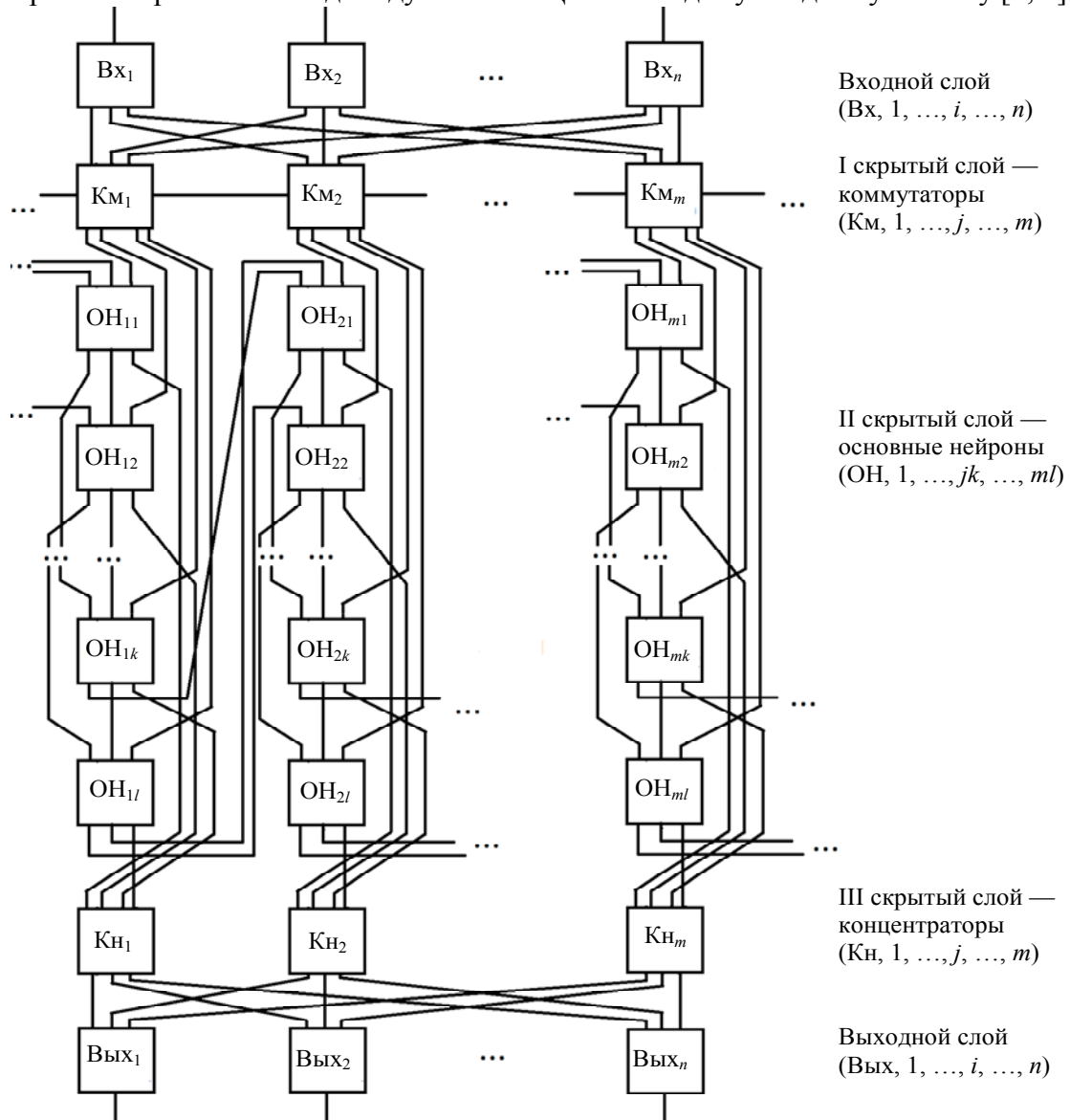


Рис. 1\*

Входные сигналы НС определяют разрядность индивидуального АЦП для конкретного входного сигнала; на выходе компараторов формируются уравнивающие напряжения,

\* На рис. 1:  $n$  — количество входных сигналов,  $m$  — количество коммутаторов,  $l$  — количество основных нейронов, подключенных к одному коммутатору.

а также значения отсчетов обрабатываемого входного сигнала. Уравновешивающие напряжения генерируются при помощи эталонного напряжения и матрицы R-2R, реализованной на нейронах.

В настоящей статье описывается принцип самомаршрутизации сигналов в НС, а также представлены схемы определения приоритетов и переключения коммутаторов. Система самомаршрутизации сигналов должна при поступлении нового входного сигнала обеспечить образование индивидуального АЦП заданной разрядности, используя свободные основные нейроны (ОН). Для этого требуется определить наличие свободных основных нейронов и их количество, чтобы проверить возможность образования индивидуального АЦП на данном участке НС.

Проведя анализ структуры НС рассматриваемого АЦП [3] (см. рис. 1), выделим требуемые служебные сигналы различных типов нейронов для обеспечения самомаршрутизации (рис. 2).

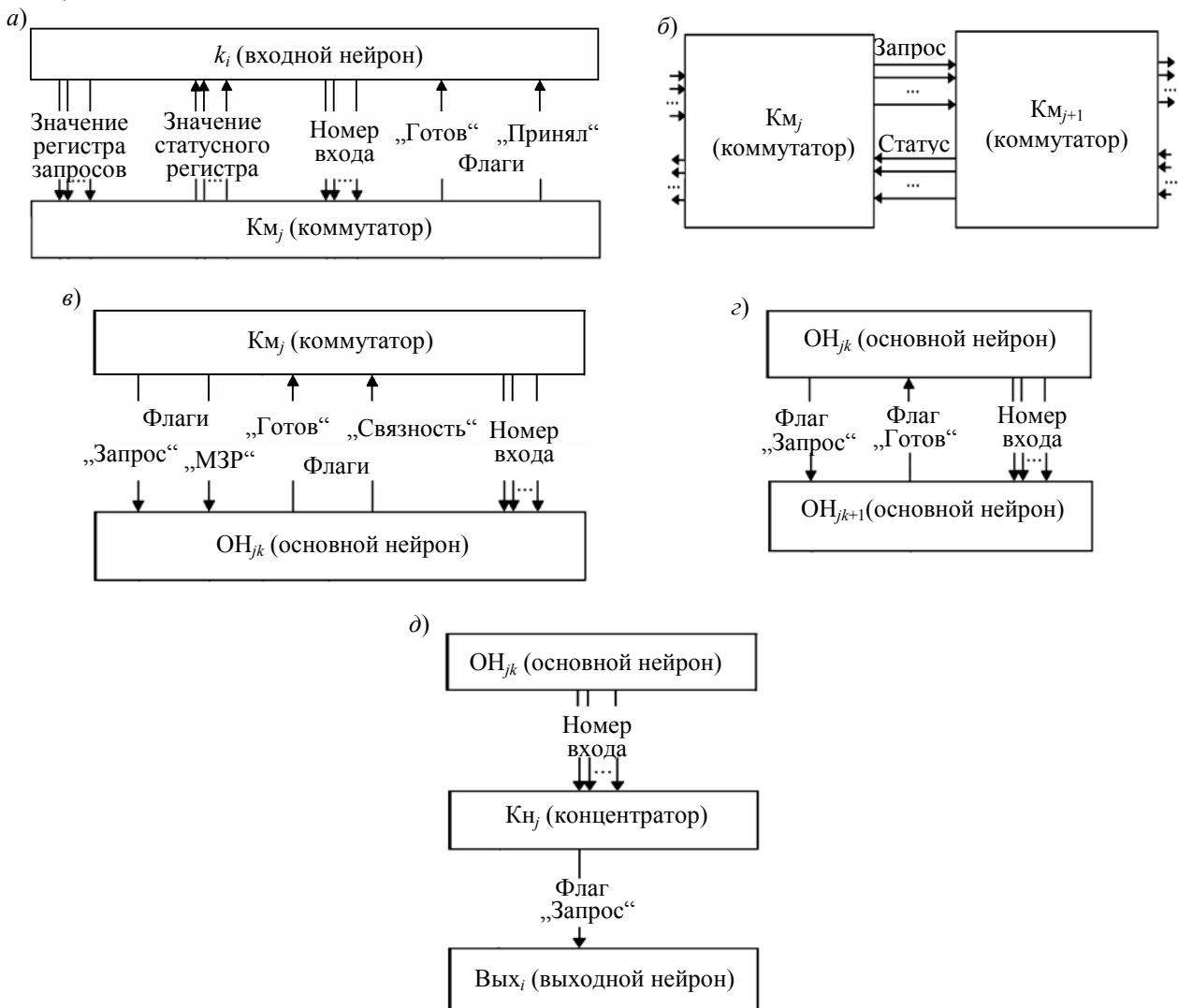


Рис. 2

Рассмотрим назначение данных сигналов и принцип взаимодействия нейронов. Запрос входного нейрона (см. рис. 2, а) соответствует значению  $k_i$ . Для каждого коммутатора во входном нейроне существуют отдельные регистры запроса, изначально значения которых устанавливаются в нуль. Входной сигнал  $k_i$  приводит в действие схему управления приоритетами, которая определяет, в какой из регистров будет записано значение  $k_i$ . Критериями работы этой схемы служат три фактора.



1. Порядок коммутаторов в НС заранее определен; так как каждый коммутатор связан с соседними (см. рис. 1), то они образуют замкнутый круг. Поэтому необходимо заранее определить условно „первый“ коммутатор (т.е. его статус), являющийся точкой входа в НС. Соответственно схема управления приоритетами будет „пытаться“ отправить запрос на  $K_m$ , расположенный наиболее близко к точке входа в НС.

2. Коммутаторы „сообщают“ входным нейронам свое состояние с помощью флага „готов“ (см. рис. 2, а). В случае его отсутствия схема управления приоритетами не будет посылать запрос на данный коммутатор, так как он либо неисправен, либо занят обработкой другого индивидуального АЦП.

3. Схема управления приоритетами учитывает значение статуса коммутатора, которое показывает, сколько основных нейронов может быть объединено в индивидуальном АЦП при формировании через данный коммутатор.

Таким образом, схема управления приоритетами сравнивает значение входного запроса  $k_i$  со значениями статусов всех коммутаторов и записывает  $k_i$  в регистр запроса коммутатора, позволяющего сформировать АЦП соответствующей разрядности.

В результате на коммутатор, расположенный ближе всего к точке входа в НС и обладающий возможностью подключить максимальное количество свободных основных нейронов, с большой вероятностью может поступить несколько запросов одновременно. Но в данном случае поток поступающих входных сигналов можно считать ординарным, и поэтому необходимо предусмотреть срабатывание коммутатора на прием запроса, который приходит первым по времени. Для решения конфликтной ситуации между поступившими запросами вводится „ответная“ часть схемы управления приоритетами, реализуемая непосредственно в самом коммутаторе. Эта часть схемы выделяет один из поступивших запросов и запрещает коммутатору обработку других запросов. В результате коммутатор обрабатывает выбранный запрос, а входному нейрону, от которого он получен, выставляется флаг „принял“, при этом флаг „готов“ этого коммутатора снимается. Таким образом, коммутатор „сообщает“ всем входным нейронам, что он занят обработкой индивидуального АЦП и не может быть задействован другими входными нейронами. В результате устанавливается соединение между конкретными входным нейроном и коммутатором.

Входные нейроны, не получившие флага „принял“, считают данный коммутатор неработоспособным и на следующем такте формируют запрос для другого коммутатора. При этом для ускорения процесса формирования индивидуальных АЦП требуется реализовать „быструю“ передачу запросов между коммутаторами (см. рис. 2, б) с использованием только комбинационной логики. Таким образом, если индивидуальному АЦП требуется задействовать основные нейроны, принадлежащие нескольким последовательным коммутаторам, то все коммутаторы, которые в результате „теряют“ все „свои“ основные нейроны, также „сбрасывают“ флаг „готов“. Для исключения конфликтов между запросом от коммутатора и запросом от входного нейрона запросы коммутатора обрабатываются в первую очередь. Это также позволяет исключить обратную связь между коммутаторами, которая реализована на стыке „входной нейрон — коммутатор“ с помощью флагов.

Информация о номере входа поступает на коммутатор вместе с входным запросом и записывается в специально отведенный для этого регистр. Запись происходит одновременно с установкой флага „принял“, так что в регистр поступает номер входа, запрос которого выбран коммутатором для обработки. В дальнейшем информация о номере входа транслируется основным нейроном до концентратора, который выбирает, какому из выходных нейронов отправить запрос для окончания формирования индивидуального АЦП и направления всех сигналов на соответствующие входной нейрон и выходы АЦП [3].

Формирование значения статусного регистра коммутатора связано с рядом трудностей. Во-первых, необходимо учитывать работоспособность „своих“ основных нейронов, а также

порядок следования неработоспособных основных нейронов, чтобы проверить возможность образования связей между оставшимися нейронами. Во-вторых, необходимо учитывать значение статусного регистра соседнего коммутатора для оценки общего количества основных нейронов, которые можно будет объединить в индивидуальный АЦП, используя данный коммутатор. При этом требуется определить наличие связи между основными нейронами, принадлежащими данному и соседнему коммутаторам. В-третьих, так как схема управления приоритетами во входном нейроне представляет собой комбинационное устройство, то значение статусного регистра, поступающее от коммутатора во время коммутации и после нее, для входного нейрона, запрос которого поступил в обработку, должно сохраняться. Но в то же время статус, передаваемый соседнему коммутатору, должен показывать происходящие изменения.

Решение всех поставленных задач потребовало изменения системы флагов, которыми обменивается коммутатор со „своими“ основными нейронами (см. рис. 2, в). От основного нейрона необходимо поступление двух флагов. Флаг „готов“ показывает исправность нейрона, при этом не учитывается, задействован ли он в индивидуальном АЦП или нет, а также этот флаг передается не только коммутатору, но и другим основным нейронам, подключенным выходами к данному. Флаг „связность“ показывает, есть ли исправные основные нейроны, к которым может подключиться данный. Значение этого флага формируется на основе флагов „готов“, при этом не учитывается, присоединены основные нейроны к одному коммутатору или к разным. Флаг „связность“ поступает только к коммутатору. Коммутатор на основе флагов „готов“ и „связность“ ведет подсчет доступных ему „своих“ основных нейронов. Подсчет осуществляется двумя сумматорами, один из которых считает основные нейроны, начиная от первого и до потери связности, а второй — от последнего и до потери связности. Таким образом, определяются два значения, одно из которых показывает, сколько основных нейронов можно подключить к индивидуальному АЦП, формируемому через соседние коммутаторы, а второе — сколько основных нейронов может быть использовано при формировании индивидуального АЦП через данный коммутатор. Это приводит к необходимости разделения статусных регистров для входного нейрона и для соседнего коммутатора, значения которых будут различными при потере связности среди „своих“ нейронов. Для ускорения работы АЦП при этом решено, аналогично формированию запросов, отказаться от статусного регистра между коммутаторами (см. рис. 2, б) и использовать только комбинационную логику. Кроме того, такая система подсчета доступных основных нейронов позволяет решить вопрос о добавлении значения статуса соседнего коммутатора. При потере связности в последнем из работоспособных „своих“ нейронов добавления вообще не происходит, значение статусного регистра обнуляется, а значение статуса соседнего коммутатора будет соответствовать значению, полученному первым сумматором флагов. При потере связности в любом другом нейроне значение статусного регистра формируется из значений, полученных вторым сумматором, и значения статуса соседнего коммутатора, а само же значение статуса также соответствует значению, полученному первым сумматором.

Между собой основные нейроны связаны флагами „готов“ и „запрос“ (см. рис. 2, г), количество которых определяется отказоустойчивостью схемы. На основе этих флагов происходит маршрутизация всех остальных сигналов, обеспечивающих непосредственно работу индивидуального АЦП. „По умолчанию“ каждый основной нейрон подключает выходы к наиболее близкому нейрону с учетом флага „готов“ и выставляет для него флаг „запрос“. По приходу флага „запрос“ основной нейрон подключает входы к нейрону, выставившему этот флаг. Коммутатор, начинающий формирование индивидуального АЦП, выставляет собственный флаг „запрос“ для основного нейрона, который является работоспособным и обладает связностью со всеми последующими, что определяется на основе значения, полученного вторым сумматором. Если основной нейрон получает флаг „запрос“ от коммутатора, то он считается

первым в индивидуальном АЦП и подключает входы к выходу коммутатора. Так как основные нейроны „по умолчанию“ соединены между собой, то необходимо лишь определить последний основной нейрон в сформированном индивидуальном АЦП. Этот нейрон определяется коммутатором, который, получив запрос от входного нейрона либо от соседнего коммутатора, подсчитывает, что ему достаточно „своих“ основных нейронов для удовлетворения запроса. Этот коммутатор выставляет флаг „МЗР“ (младший значащий разряд) для последнего основного нейрона, выявление которого происходит на основе данных первого сумматора.

При получении флага „МЗР“ основной нейрон подключает выходы к „своему“ концентратору (см. рис. 2, *д*). Таким образом, информация о номере входа, транслируемая между нейронами, попадает на концентратор, который формирует запрос соответствующему входному нейрону. В результате образуется связь между выходным и входным нейронами, что позволяет считать индивидуальный АЦП сформированным и обеспечивает возможность проведения аналого-цифровых преобразований в соответствии с алгоритмами, описанными в работе [3].

Итак, сформулированы основные принципы самомаршрутизации сигналов в АЦП на основе нейронной сети и представлено возможное решение, а именно:

— предложена схема управления приоритетами при установлении связи „входной нейрон — коммутатор“;

— определены порядок формирования значений регистра запроса и статусного регистра, а также система передачи их между коммутаторами;

— реализована связь между основными нейронами.

Полученные результаты позволяют реализовать индивидуальные АЦП на основе заданной НС, что соответствует первому этапу работы основного АЦП [3]. При дальнейших исследованиях необходимо аппаратно реализовать данную систему, при этом снижая по возможности аппаратные затраты, а также решить проблему обеспечения отказоустойчивости коммутаторов и концентраторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдеев Б. Я., Белоусов В. В. и др.* Цифровые адаптивные информационно-измерительные системы / Под ред. *Б. Я. Авдеева, Е. А. Чернявского.* СПб: Энергоатомиздат, 1997.
2. *Матушкин Н. Н., Южаков А. А.* Измерительные преобразователи на основе потоковой динамической архитектуры // Изв. вузов. Приборостроение. 1994. Т. 37, № 1. С. 16—21.
3. *Посягин А. И., Южаков А. А.* Разработка аналого-цифрового преобразователя на основе нейронной сети // Электротехника. 2012. № 11. С. 18—24.

#### *Сведения об авторах*

**Антон Игоревич Посягин**

— Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра автоматизации и телемеханики; ассистент;  
E-mail: [posyagin.anton@gmail.com](mailto:posyagin.anton@gmail.com)

**Александр Александрович Южаков**

— д-р техн. наук, профессор; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра автоматизации и телемеханики

Рекомендована кафедрой  
автоматики и телемеханики

Поступила в редакцию  
31.10.13 г.

Г. Е. Журов, М. Ю. Цивинский

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДУЛЬНАЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ И МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Рассматривается реконфигурируемая система, состоящая из набора универсальных функциональных модулей, обеспечивающих весь цикл обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени.

*Ключевые слова:* встроенные реконфигурируемые вычислительные системы, тепловизионные приборы, многоканальные приборы.

Современные тепловизионные и многоканальные приборы характеризуются постоянно возрастающими требованиями к системе обработки входного потока данных. Эти требования обусловлены такими факторами, как:

- большие размерности современных и перспективных приемников излучения в используемом спектральном диапазоне;
- высокая частота кадров;
- тенденция к увеличению числа параллельно обрабатываемых каналов, особенно для мульти- и гиперспектральных систем;
- необходимость использования сложных и ресурсоемких алгоритмов цифровой обработки сигналов;
- необходимость реализации значительной части вычислений в реальном масштабе времени;
- необходимость уменьшения энергопотребления.

Исходя из перечисленных требований и анализа тенденций развития тепловизионных и многоканальных систем можно сделать вывод о возрастающей сложности системы обработки данных, что при превышении некоторого порога требует перехода к новым принципам построения вычислительной системы приборов [1, 2]. Порог в данном случае качественно определяется количеством пикселей в приемниках, количеством параллельно обрабатываемых каналов, темпом поступления данных (определяется кадровой частотой в каждом канале), сложностью алгоритмов обработки изображения, используемых в каждом конкретном случае.

Решение таких задач с помощью процессоров общего назначения, а также цифровых сигнальных процессоров (Digital Signal Processors) труднореализуемо вследствие невозможности обеспечить требуемую вычислительную мощность и требуемое энергопотребление (не выше некоторого заданного).

При альтернативном подходе основной объем вычислений выполняется реконфигурируемой системой, состоящей из набора функциональных модулей и реализованной на базе FPGA (Field-Programmable Gate Array).

Типичная система (см. рисунок) содержит следующие функциональные модули.

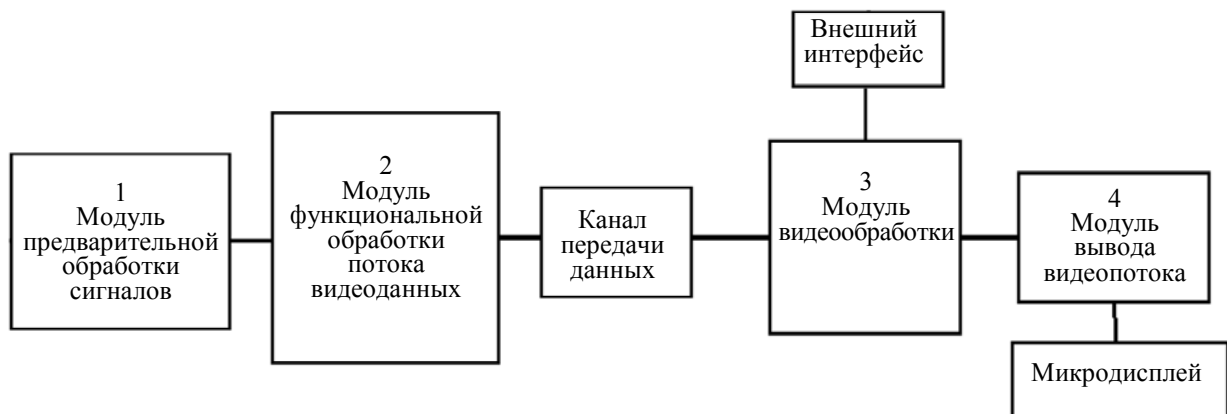
1. Модуль предварительной обработки сигналов приемника инфракрасного или видимого диапазона спектра.

2. Модуль функциональной обработки потока видеоданных. Назначение модуля — обработка потока данных с учетом специфики прибора, например с учетом особенностей микроболометрических матриц (таких как существенная неравномерность характеристик по отдельным элементам матрицы, необходимость коррекции уровней опорных напряжений

матрицы в зависимости от ряда внешних факторов и т. д.). Данный модуль позволяет формировать, наряду с потоком первичных видеоданных, потоки вторичных (информационных) видеоданных, используемых для отображения меню.

3. Модуль видеообработки. Обмен данными между модулем видеообработки и модулем функциональной обработки осуществляется с использованием многоуровневого помехозащищенного стека протоколов. Такое решение позволяет указанные модули разнести в пространстве, например в приборах, устанавливаемых на подвижных управляемых объектах. Назначение данного модуля — обработка изображения без привязки к конкретному спектральному диапазону и подготовка видеопотока для вывода на устройство отображения. Данный модуль имеет высокоскоростной канал передачи цифровых данных для связи с внешними устройствами.

4. Модуль вывода видеопотока на устройство отображения. В качестве устройства отображения в данном случае используется микродисплей или выносной дисплей.



Обработка данных в реальном времени означает, что все необходимые вычисления (обработка текущего набора входных данных, например считанных с матричных приемников кадров) заканчиваются раньше, чем на вход системы поступят новые данные. Это, в свою очередь, достигается путем обеспечения соответствующей вычислительной мощности тракта обработки данных.

С практической точки зрения, рассмотренный подход к решению данной задачи (построение вычислительного устройства на базе FPGA) не нов и используется большинством разработчиков в течение ряда лет. Более широкий взгляд на представленную структуру позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, реализованное на базе FPGA высокопроизводительное вычислительное устройство построено не на основе классической фоннеймановской архитектуры. Под архитектурой фон Неймана здесь понимается общая парадигма построения всех современных компьютеров (принцип хранимой программы и т. д.), а не фоннеймановская организация компьютера в более узком смысле (программа и данные в общей памяти). Фоннеймановская парадигма предполагает, что вычислительным процессом управляет поток команд, а данные выбираются из систем хранения или из памяти. Альтернативная схема основана на том, что процессом вычислений „управляют“ входные потоки данных, которые на входе системы попадают в подготовленную вычислительную инфраструктуру, обладающую естественным параллелизмом. Такая концепция построения вычислительных систем известна давно, но по ряду принципиальных ограничений не применялась на практике [3].

Во-вторых, данная система относится к классу реконфигурируемых вычислительных систем (устоявшийся англоязычный термин — Reconfigurable Computing). Парадигма построения реконфигурируемых (вычислительных) систем сочетает в себе одновременно гибкость программного подхода и высокую производительность аппаратного решения [1].

Представленная линейка модулей в силу своей универсальности была использована без какой либо аппаратной модификации (для некоторых модулей и без программной модификации) для целого ряда приборов, работающих в различных спектральных диапазонах.

Одно из направлений применения рассмотренных модулей — тепловизионные прицелы [4] и приборы наблюдения. Унификация модулей позволяет легко переконфигурировать систему применительно к использованию приемников различных форматов и, в том числе, различного производства.

Другое направление — применение данного решения в системах с приемниками видимого диапазона. При этом переход от использования такой линейки модулей в тепловизионном приборе к использованию в приборе телевизионном сводится к модификации только одного модуля — модуля предварительной обработки сигналов.

Для дальнейшего усовершенствования системы предполагается проведение исследований по уменьшению габаритов и снижению энергопотребления при одновременном увеличении вычислительной мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reconfigurable Computing: the Theory and Practice of FPGA-Based Computation / Ed: S. Hauck, A. Dehon. Burlington, MA: Elsevier, 2008.
2. Raytheon Develops World's First Polymorphic Computer. Military Embedded Systems [Электронный ресурс]: <<http://www.mil-embedded.com/news/db/?5784>>.
3. Hartenstein R. Keynote Addresses [Электронный ресурс]: <<http://www.hartenstein.de/keynotes.htm>>.
4. Голицын А. В., Журов Г. Е., Цивинский М. Ю., Голицын А. А., Яшина Т. В., Навражных В. А., Мишанин С. С. Тепловизионный прицел для стрелкового оружия // Тез. докл. Рос. конф., 22—26 авг. 2011 г. Новосибирск, 2011. С. 148.

#### Сведения об авторах

**Гарри Евгеньевич Журов**

— Филиал Института физики полупроводников СО РАН „Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники“, Новосибирск; начальник сектора; E-mail: hz@oesd.ru

**Михаил Юрьевич Цивинский**

— Филиал Института физики полупроводников СО РАН „Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники“, Новосибирск; ведущий инженер; E-mail: m\_tsiv@mail.ru

Рекомендована  
научно-техническим советом  
Института

Поступила в редакцию  
27.06.13 г.

В. М. ШАРАПОВ, О. Н. ПЕТРИЦЕВ, А. М. ПРОХОРЕНКОВ,  
К. В. БАЗИЛО, Ж. В. СОТУЛА

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ МОНОМОРФНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается эффект возникновения низкочастотных колебаний в мономорфных пьезоэлементах. Предложены два способа повышения уровня звукового давления, создаваемого в этом случае: разделение электродов пьезоэлемента и использование дополнительного колебательного контура на его входе.

**Ключевые слова:** мономорфный пьезоэлемент, низкочастотные колебания, звуковое давление, амплитудно-частотная характеристика.

Пьезоэлектрические преобразователи широко применяются в электро- и гидроакустике, в частности для излучения и приема акустических колебаний в воздушной или водной среде, а также в измерительной технике, при неразрушающем контроле, в пьезодвигателях, в сканерах наномикроскопов и в других областях [1—6].

Для изготовления таких преобразователей используются мономорфные пьезоэлементы, а также биморфные, состоящие из двух пьезоэлементов или пьезоэлемента и металлической пластины, соединенных с помощью клея или припоя [2, 4].

Традиционно считается, что в свободно расположенных мономорфных пьезоэлементах в виде пластин, брусков, дисков изгибные (низкочастотные) колебания не возникают [3, 4]. Между тем авторами настоящей статьи обнаружено возникновение таких колебаний в мономорфных пьезоэлементах, однако уровень создаваемого ими звукового давления относительно невелик [7].

Низкочастотный звук распространяется в водной среде практически без затухания на расстояние до нескольких тысяч километров благодаря формированию в верхнем слое подводного звукового канала — акустического волновода рефракционного типа, что обеспечивает очевидные преимущества низкочастотной акустики при решении широкого круга задач [8, 9]. Однако рабочие частоты мономорфных пьезоэлементов составляют в зависимости от их размера от единиц до десятков килогерц.

В настоящей статье рассматриваются методы повышения уровня звукового давления, создаваемого мономорфными пьезоэлементами на низких частотах.

На рис. 1 приведены схема подключения мономорфного пьезоэлемента  $\varnothing 66 \times 3$  мм, изготовленного из пьезокерамики ЦТС-19 (рис. 1, а), и графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) по звуковому давлению  $p_{зв}(f)$  в низкочастотной и высокочастотной областях (рис. 1, б, в соответственно). Резонансу соответствует резонансное давление  $p_r = 76,5$  дБ при сопротивлении  $r_0 = 8,44$  кОм.

Пьезоэлемент возбуждался от генератора (G) электрических колебаний типа ГЗ-109 напряжением 1 В, которое подводилось к электродам  $I—I'$ . Звуковое давление измерялось шумомером фирмы RFT (Германия).

Как видно из графиков (см. рис. 1, б, в), уровень звукового давления, создаваемого в низкочастотной области, почти на 20 дБ ниже уровня звукового давления на частоте 34 кГц.

Для увеличения уровня изгибных колебаний предложено создать в пьезоэлементе электрическое поле, стимулирующее эти колебания, для чего электроды на пьезоэлементе были разделены на кольца (1, 1') и диски (2, 2'): см. рис. 2. Генератор подключался к электродам 1 и 2' (рис. 2, а) или 1 и 2 (рис. 2, б). В этом случае вектор электрического поля  $\mathbf{E}$  возбуждающего напряжения составлял угол  $\alpha$ ,  $0 < \alpha \leq 90^\circ$ , с вектором поляризации  $\mathbf{P}$ .

При использовании этих схем в пьезоэлементах возможны два конкурирующих процесса — усиление изгибных колебаний за счет расположения вектора возбуждающего поля и одновременно уменьшение этих колебаний за счет увеличения собственного сопротивления пьезоэлемента. Это потребовало экспериментальной проверки предложенной идеи.

Для преобразователей II и III (см. рис. 2, а, б) были измерены амплитудно-частотные характеристики по звуковому давлению. Одновременно на резонансной частоте измерялось внутреннее трение в пьезоэлементе [2]. Результаты измерений приведены на рис. 3, а, б соответственно.

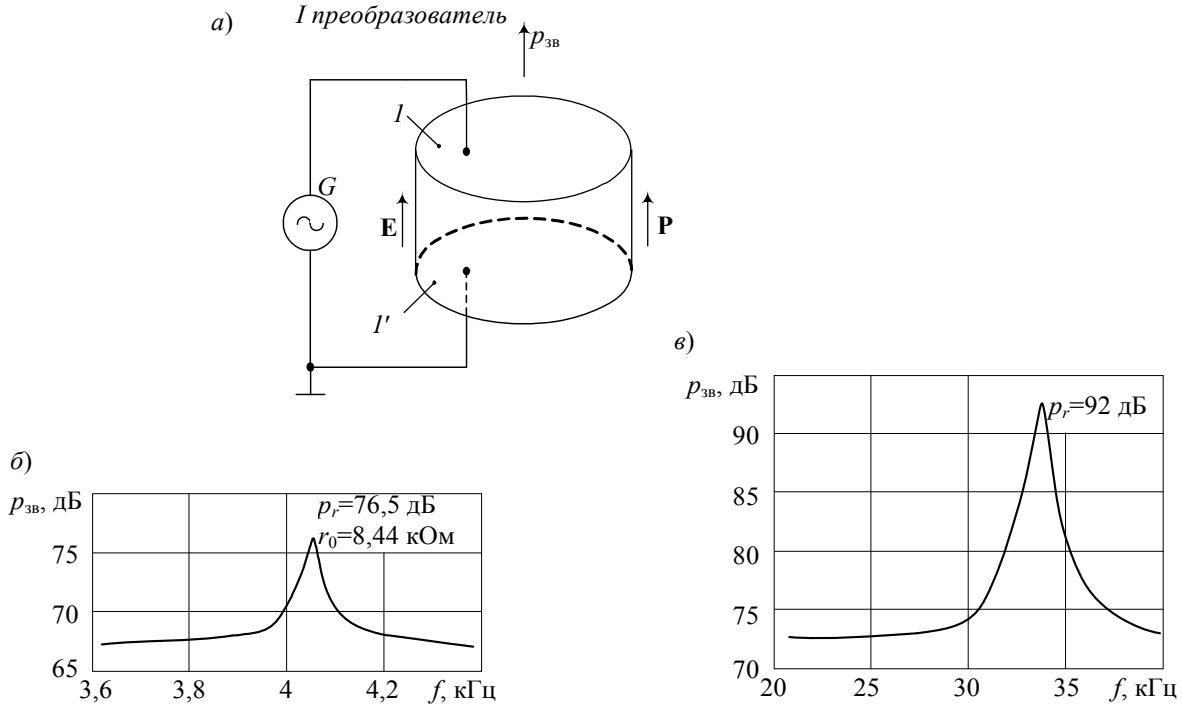


Рис. 1

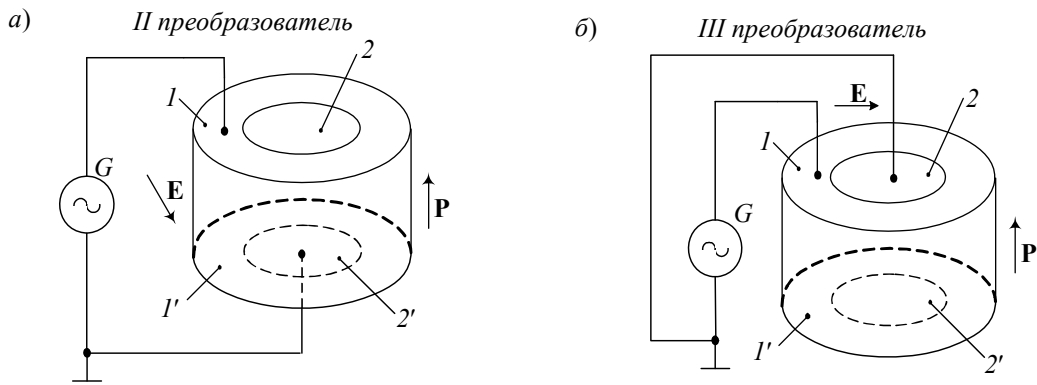


Рис. 2

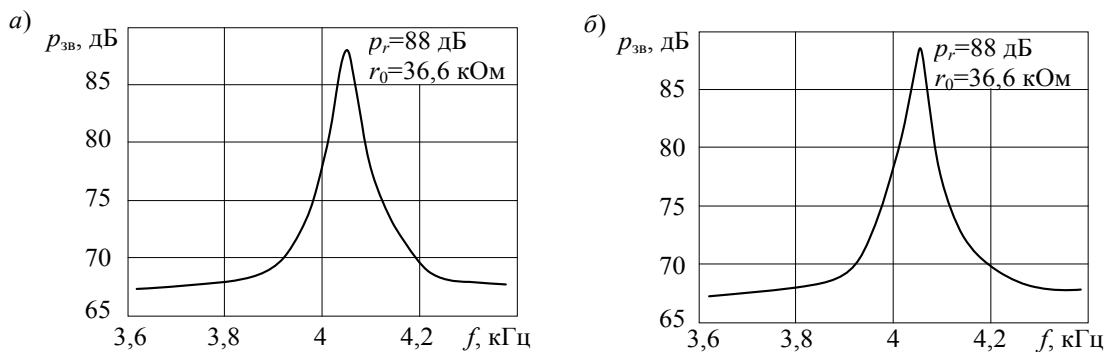


Рис. 3



Анализ рис. 3 показывает, что для преобразователей II и III ( $\alpha \approx 90^\circ$ ) уровень звукового давления возрос примерно на 12 дБ, резонансная частота не изменилась, а значение  $r_0$  увеличилось примерно в 4 раза по сравнению с преобразователем I ( $\alpha=0$ , см. рис. 1, а).

Для дальнейшего увеличения звукового давления предложено создать на входе пьезоэлемента колебательный контур из добавочной индуктивности  $L_d$  и межэлектродной емкости  $C_{эл}$  пьезоэлемента. Индуктивность  $L_d$  определяется выражением [3]

$$L_d = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_{эл}},$$

где  $f_r$  — резонансная частота пьезоэлемента.

Схемы подключения пьезоэлемента при использовании колебательного контура с добавочной индуктивностью и емкостью между электродами 1—2', 1—2 и 1—1' показаны на рис. 4, а—в соответственно.

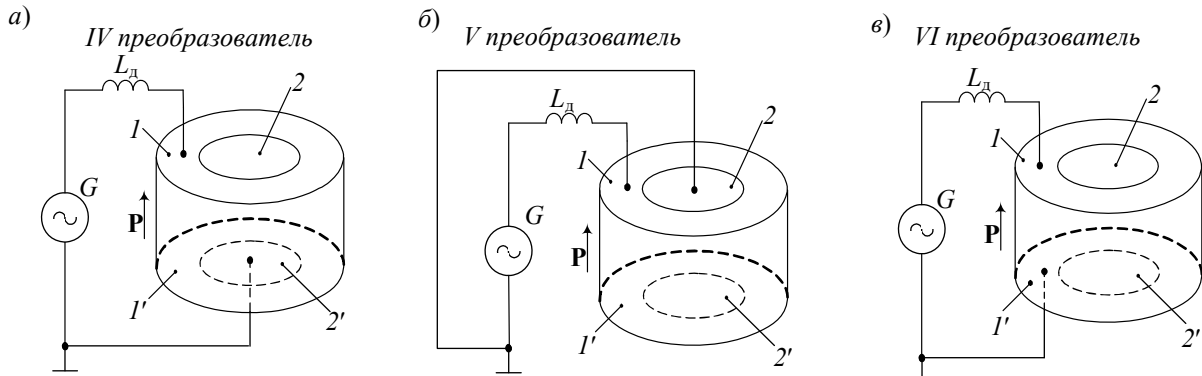


Рис. 4.

Результаты измерений АЧХ преобразователей IV, V, VI (см. рис. 4) показаны на рис. 5, а—в соответственно.

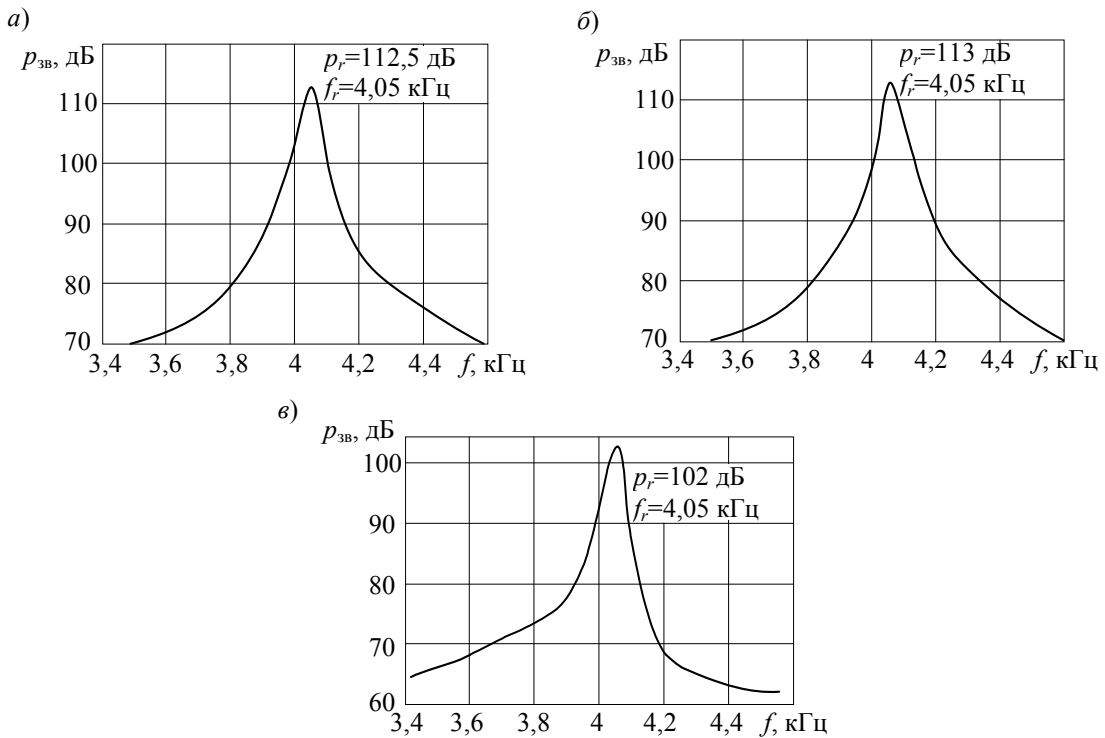


Рис. 5.

Как показывает анализ рис. 5, уровень звукового давления при  $f_r=4,05$  кГц для преобразователей IV—VI увеличился примерно на 24 дБ по сравнению с преобразователями II, III и примерно на 36 дБ по сравнению с преобразователем I.

Итак, рассмотрен эффект возникновения низкочастотных акустических колебаний в мономорфных пьезоэлементах и предложены два способа повышения уровня создаваемого ими звукового давления.

Результаты представленного исследования могут быть использованы при проектировании электроакустических преобразователей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sharapov V.* Piezoceramic Sensors. Heidelberg — Dordrecht — London — New York: Springer Verlag, 2011.
2. *Шарпов В. М., Мусиенко М. П., Шарпова Е. В.* Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006.
3. *Sharapov V., Sotula Zh., Kunitskaya L.* Piezoelectric Electroacoustic Transducers. Heidelberg — Dordrecht — London — New York: Springer Verlag, 2013.
4. *Шарпов В. М., Минаев И. Г., Сотула Ж. В., Куницкая Л. Г.* Электроакустические преобразователи. М.: Техносфера, 2013.
5. *Минаев И. Г., Трофимов А. И., Шарпов В. М.* К вопросу о линеаризации выходных характеристик пьезоэлектрических силоизмерительных преобразователей // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1975. Т. 18, № 3.
6. *Минаев И. Г., Шарпов В. М.* Применение частотно-модулированных колебаний в измерительных преобразователях // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1976. Т. 19, № 8.
7. *Шарпов В. М., Минаев И. Г., Сотула Ж. В., Базило К. В., Самойленко В. В.* Об эффекте возникновения изгибных колебаний в мономорфных пьезоэлементах // Вестн. ЧГТУ. 2011. № 3. С. 60—62.
8. Электронный ресурс: <[www.ipfran.ru](http://www.ipfran.ru)>.
9. Подводные электроакустические преобразователи: Справочник / Под ред. В. В. Богородского. Л.: Судостроение, 1983.

#### *Сведения об авторах*

- Валерий Михайлович Шарпов** — д-р техн. наук, профессор; Черкасский государственный технологический университет, кафедра компьютеризированных и информационных технологий в приборостроении; заведующий кафедрой; E-mail: [v\\_sharapov@gambler.ru](mailto:v_sharapov@gambler.ru)
- Олег Николаевич Петрицев** — д-р техн. наук, профессор; Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт“, кафедра акустики и акустоэлектроники; E-mail: [om.petrishev@aae.kpi.ua](mailto:om.petrishev@aae.kpi.ua)
- Александр Михайлович Прохоренков** — канд. техн. наук, профессор; Мурманский государственный технический университет, кафедра автоматки и вычислительной техники; заведующий кафедрой; E-mail: [prohorenkovam@mstu.edu.ru](mailto:prohorenkovam@mstu.edu.ru)
- Константин Викторович Базило** — канд. техн. наук, доцент; Черкасский государственный технологический университет, кафедра компьютеризированных и информационных технологий в приборостроении; E-mail: [b\\_constantine@mail.ru](mailto:b_constantine@mail.ru)
- Жанна Васильевна Сотула** — канд. техн. наук, доцент; Черкасский государственный технологический университет, кафедра компьютеризированных и информационных технологий в приборостроении; E-mail: [janna-sotula@yandex.ua](mailto:janna-sotula@yandex.ua)

Рекомендована кафедрой  
компьютеризированных  
и информационных технологий  
в приборостроении ЧГТУ

Поступила в редакцию  
20.11.13 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.317

В. В. ЕЖОВА, В. А. ЗВЕРЕВ, И. Н. ТИМОЩУК

## АБЕРРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ В ШИРОКИХ И УЗКИХ ПУЧКАХ ЛУЧЕЙ

Показана возможность и определены условия не только стигматической, но и апланатической коррекции aberrаций третьего порядка в изображении, сформированном системой положительных линз. Приведены соотношения, определяющие положения входного зрачка тонкой линзы, при которых в полученном изображении отсутствуют первичная кома и астигматизм.

*Ключевые слова:* изображение, оптическая система, тонкая линза, aberrации, входной зрачок.

Принципиально задача построения изображения предмета решается с помощью оптической системы, состоящей из одной тонкой линзы. При этом сферическая aberrация, кома и астигматизм изображения определяются оптической силой и формой (прогибом) линзы, поперечным увеличением изображения (положением предмета относительно линзы) и положением входного зрачка. Для достижения требуемого качества изображения оптическую систему объектива, состоящую из одной тонкой линзы, приходится дополнять, как минимум, еще одной линзой. В общем случае это приводит к изменению поперечного увеличения изображения, изменению оптической силы и прогиба линзы и, как следствие, к изменению требуемого положения входного зрачка. Таким образом, изучение aberrационных свойств тонкой линзы можно рассматривать как необходимое условие грамотной композиции оптических систем.

Определим параметры тонкой линзы с помощью углов  $\alpha_i$ , образованных осевым параксиальным лучом с оптической осью (рис. 1):

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = V & & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = \alpha & d = 0 & n_2 = n \\ \alpha_3 = \alpha' = 1 & & n_3 = 1, \end{array}$$

где  $V$  — поперечное увеличение изображения,  $n_i$  — показатель преломления материала линзы,  $d$  — расстояние между компонентами системы.

В области первичных aberrаций влияние конструктивных параметров тонкой линзы на aberrационные свойства изображения определяется коэффициентами сферической aberrации ( $S_I$ ), комы ( $S_{II}$ ) и астигматизма ( $S_{III}$ ) [1]:

$$S_I = hP; \quad (1)$$

$$S_{II} = HP - JW; \quad (2)$$

$$S_{III} = \frac{H^2}{h} P - 2J \frac{H}{h} W + J^2 \varphi, \quad (3)$$

где  $h$  — высота точки пересечения осевого виртуального луча с главными плоскостями тонкой линзы:  $h = 1 - V$ ;  $H$  — высота точки пересечения главного виртуального луча с главными плоскостями тонкой линзы:  $H = a_p \beta_1$ , здесь  $a_p$  — расстояние от тонкой линзы до центра входного зрачка системы,  $\beta_1$  — угол, образованный главным парааксиальным лучом с оптической осью, при  $\beta_1 = 1$  величина  $H = a_p$ ; при принятых величинах параметров линзы инвариант Лагранжа — Гельмгольца равен  $J = Va_p + V - 1$ ; линейные величины целесообразно выразить в масштабе фокусного рассеяния, т.е.  $\varphi = 1$ .

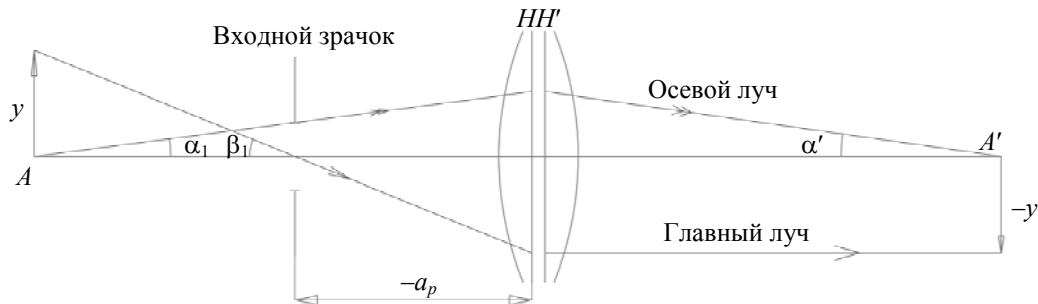


Рис. 1

Полученные соотношения позволяют выражения (1)—(3), определяющие коэффициенты первичных aberrаций, представить в следующем виде:

$$S_I = (1 - V) P, \quad (4)$$

$$S_{II} = a_p P + (1 - V - Va_p) W, \quad (5)$$

$$S_{III} = \frac{a_p^2}{1 - V} P + 2 \frac{1 - V - Va_p}{1 - V} a_p W + (1 - V - Va_p)^2. \quad (6)$$

В результате последующих преобразований получаем [3]

$$P = \frac{n(2+n)(1-V)}{(n-1)^2} \left[ \alpha^2 - \frac{1+2n}{2+n} (1+V) \alpha + \frac{n}{2+n} \frac{1-V^3}{1-V} \right], \quad (7)$$

$$W = -\frac{n+1}{n-1} (1-V) \left[ \alpha - \frac{n}{n+1} (1+V) \right]. \quad (8)$$

При  $P = 0$  получаем уравнение

$$\alpha^2 - \frac{1+2n}{2+n} (1+V) \alpha + \frac{n}{2+n} \frac{1-V^3}{1-V} = 0, \quad (9)$$

решение которого можно представить в виде

$$\alpha = \frac{1}{2(2+n)} \left[ (1+2n)(1+V) \pm \sqrt{(1-4n)V^2 + 2(1+2n^2)V + 1 - 4n} \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) имеет вещественные корни при условии, что подкоренное выражение больше или равно нулю. При равенстве нулю это выражение приобретает вид уравнения, корни которого удовлетворяют условию, т.е. оба решения определяют параметры одной и той же линзы, но в прямом и обратном ходе лучей.

На рис. 2 приведена зависимость  $V(n)$ , определяемая решением подкоренного выражения в уравнении (10). При значениях поперечного увеличения  $V$ , находящихся в области ме-

жду кривыми  $l$  и  $l'$  при углах  $\alpha$ , определяемых уравнением (9), первичная сферическая аберрация изображения точки будет отсутствовать. Кривые  $2$  и  $2'$  соответствуют значениям  $V$ , при которых в изображении отсутствуют первичные аберрации: сферическая аберрация и кома ( $S_I = 0$ ,  $S_{II} = 0$ ) [3].

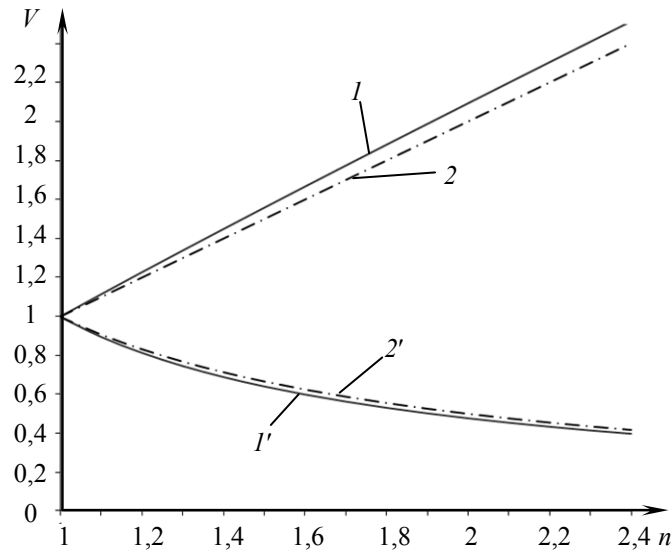


Рис. 2

Производная от функции  $P = P(\alpha, V, n)$  по  $\alpha$  равна

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha} = \frac{n(2+n)(1-V)}{(n-1)^2} \left[ 2\alpha - \frac{1+2n}{2+n}(1+V) \right].$$

Положив  $\frac{\partial P}{\partial \alpha} = 0$ , получим  $\alpha = \frac{1+2n}{2+n} \frac{1+V}{2}$ , а подставив это значение угла  $\alpha$  в формулы (7) и (8), получим

$$P_{\text{extr}} = P_0 = n \frac{1-V}{(n-1)^2} \left[ \frac{(4n-1)(1+V)^2}{4(2+n)} - nV \right], \quad (11)$$

$$W_{\text{extr}} = W_0 = \frac{1-V^2}{2(2+n)}. \quad (12)$$

В общем случае из выражения (8) находим, что угол  $\alpha = \frac{n}{n+1}(1+V) - \frac{n-1}{n+1} \frac{W}{1-V}$ . Подставляя это выражение в формулу (7), в результате последующих преобразований и учитывая соотношения (11) и (12), получаем

$$P = P_0 + a(W - W_0)^2, \quad (13)$$

где

$$a = \frac{n(2+n)}{(n+1)^2(1-V)}, \quad W_0 = \frac{1-V^2}{2(2+n)},$$

$$P_0 = \frac{n(1-V)}{(n-1)^2} \left[ \frac{(4n-1)(1+V)^2}{4(2+n)} - nV \right]. \quad (14)$$

При  $W = 0$

$$P(W = 0) = aW_0^2 + P_0 = \frac{n^3(1-V)}{(n^2-1)^2} \left[ V^2 - \frac{1+n^2}{n}V + 1 \right]. \quad (15)$$

Отсюда следует, что  $P(W = 0) = 0$  при  $V_1 = 0$  и при  $V_{2,3} = \frac{n^2 + 1 \pm (n^2 - 1)}{2n}$ .

В соответствии с выражением (8) при  $W = 0$  угол  $\alpha = \frac{n}{n+1}(1+V)$ . Тогда при  $V_2 = n$  угол  $\alpha = n$ , а при  $V_3 = 1/n$  угол  $\alpha = 1$ . Таким образом, оба решения определяют разное положение одного и того же апланатического мениска.

Пусть  $W = W_0$ , тогда при  $P = P_0$  в соответствии с выражением (4) коэффициент

$$S_1 = \frac{n(1-V)^2}{(n-1)^2} \left[ \frac{(4n-1)(1+V)^2}{4(2+n)} - nV \right], \quad (16)$$

откуда следует, что при  $V = 1^*$  и при равном нулю выражении в квадратных скобках коэффициент  $S_1 = 0$ , т.е. первичная сферическая aberrация изображения точки отсутствует.

Подставив полученные значения  $V$  в формулу (10), находим значения углов  $\alpha$ , определяющих кривизну поверхностей линзы.

Зависимость  $S_1(V)$ , определяемая формулой (16), при трех значениях показателя преломления материала линзы  $n = 1,5$ ,  $n = 1,65$  и  $n = 1,8$  представлена на рис. 3.

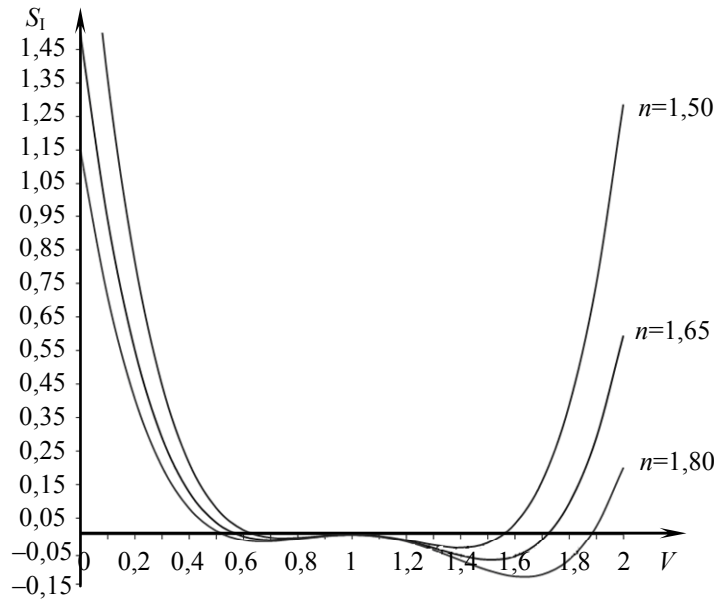


Рис. 3

Частный случай использования тонкой линзы — расположение предмета на бесконечно большом расстоянии от нее ( $V = 0$ ). Тогда  $S_1 = P$  (так как  $h = 1$ ). При  $V = 0$  формулы (13) и (14) принимают следующий вид [2, 4]:

$$P = P_0 + a(W - W_0)^2, \quad (17)$$

где

$$a = \frac{n(2+n)}{(n+1)^2}, \quad W_0 = \frac{1}{2(2+n)}, \quad P_0 = \frac{n(4n-1)}{4(2+n)(n-1)^2}.$$

Рассмотрим оптическую систему, состоящую из  $k$  тонких линз.

Оптическая сила системы  $\varphi = \frac{\alpha_{2k+1} - \alpha_1}{h}$ . При равенстве оптических сил линз в системе  $\varphi_i = \varphi/k$ ; при  $h=1$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\alpha_{2k+1} = 1$  имеем  $\varphi_i = 1/k$ .

Обозначим порядковый номер линзы как  $j$ . Тогда выражение, определяющее величину нечетных углов  $\alpha_i = \alpha_{2j-1}$ , можно представить в виде  $\alpha_{2j-1} = \frac{j-1}{k}$ . Угол  $\alpha_{2j-1+2} = \alpha_{2j+1}$ , при этом  $\alpha_{2j+1} - \alpha_{2j-1} = 1/k$ . Тогда  $\alpha_{2j+1} = j/k$ . Угол прогиба линзы  $\alpha_{i+1} = \alpha_{2j}$ . При этих значениях углов для  $j$ -й тонкой линзы и в результате преобразований имеем

$$S_{1j} = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ n \frac{3j(j-1)+1}{k^3} - (1+2n) \frac{2j-1}{k^2} \alpha_{2j} + \frac{2+n}{k} \alpha_{2j}^2 \right]. \quad (18)$$

Условие минимума сферической аберрации определяется выражением

$$\frac{dS_{1j}}{d\alpha_{2j}} = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ (1+2n) \frac{1-2j}{k^2} + 2 \frac{2+n}{k} \alpha_{2j} \right] = 0.$$

Отсюда находим, что величина четных углов  $\alpha_i = \alpha_{2j}$  определяется выражением  $\alpha_{2j} = \frac{1+2n}{2+n} \frac{2j-1}{2k}$ .

Пусть  $k=2$ , при этом в результате преобразований получаем

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{1}{2k} & d_1 = 0 & n_2 = n \\ \alpha_3 = \frac{1}{k} & d_2 = 0 & n_3 = 1 \\ \alpha_4 = \frac{1+2n}{2+n} \frac{3}{2k} & d_3 = 0 & n_4 = n \\ \alpha_5 = \frac{2}{k} = 1 & & n_5 = 1. \end{array}$$

Сферическая аберрация изображения точки, сформированного полученной системой, определяется коэффициентом  $S_1 = \frac{n}{(n-1)^3} \left[ n - \frac{5}{16} \frac{(2n+1)^2}{n+2} \right]$ . При  $S_1 = 0$  выражение в квадратных скобках принимает вид уравнения  $n^2 - 3n + \frac{5}{4} = 0$ . Отсюда следует, что при  $k=2$  в изображении точки сферическая аберрация третьего порядка отсутствует при  $n = 2, 5$ .

Пусть  $k=3$ . При  $S_1 = 0$  в результате преобразований, подобных предыдущим, имеем  $n^2 - \frac{19}{8}n + \frac{35}{32} = 0$ , откуда находим, что при  $k=3$  в изображении точки сферическая аберрация третьего порядка отсутствует при  $n = 1, 75$ .

При  $k=4$  задача коррекции первичной сферической аберрации решается при  $n = 1, 5$ .

Для  $j$ -й тонкой линзы параметры  $W_i$  и  $P_i$  равны

$$W_i = \frac{1}{n-1} \left[ n(\alpha_{2j+1}^2 - \alpha_{2j-1}^2) - (n+1)(\alpha_{2j+1} - \alpha_{2j-1})\alpha_{2j} \right], \quad (19)$$

$$P_i = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ n(\alpha_{2j+1}^3 - \alpha_{2j-1}^3)^2 - (1+2n)(\alpha_{2j+1}^2 - \alpha_{2j-1}^2)\alpha_{2j} + (n+2)(\alpha_{2j+1} - \alpha_{2j-1})\alpha_{2j}^2 \right]. \quad (20)$$

В результате преобразований для оптической системы, состоящей из  $k$  тонких линз, имеем  $W_k = \frac{\alpha_{2k+1}^2 - \alpha_1^2}{2(n+2)}$ . При  $\alpha_1 = 0$  и  $\alpha_{2k+1} = 1$  параметр  $W_k = \frac{1}{2(n+2)}$ , т.е. значение этого параметра не зависит от числа линз в системе.

При  $W = 0$  параметр  $P(W = 0)$  определяется формулой (15), тогда

$$S_I(W = 0) = \frac{n^3(1-V)^2}{(n^3-1)^2} \left( V^2 - \frac{n^2+1}{n}V + 1 \right), \quad (21)$$

$$S_I(W = 0) = 0 \text{ при } V_1 = 1/n, V_2 = 1^{\times}, V_3 = n.$$

Зависимость  $S_I(W = 0) = S_I(V)$ , определяемая формулой (21), при трех значениях показателя преломления материала линзы  $n = 1,5$ ,  $n = 1,65$  и  $n = 1,8$  представлена на рис. 4.

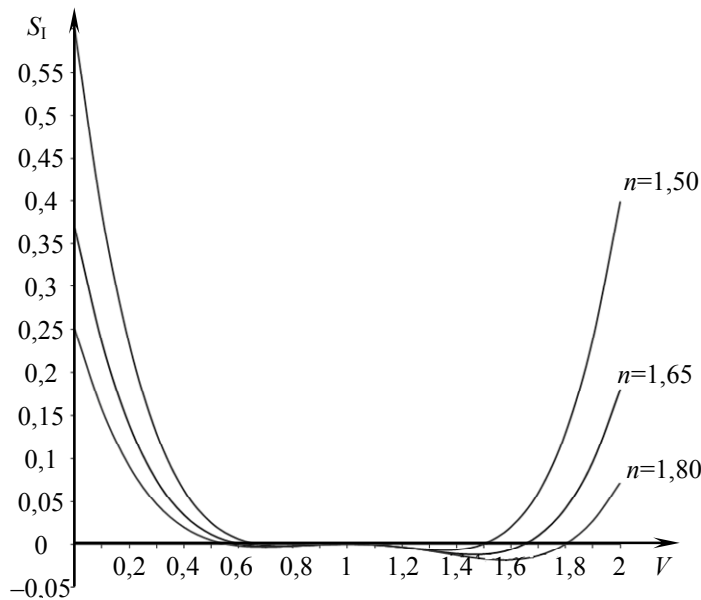


Рис. 4

Из выражения (20) при  $W_i = 0$  находим, что угол  $\alpha_{2j} = \frac{n}{n+1} \frac{2j-1}{k}$ . При этом уравнение (18) принимает вид

$$S_{ij} = \frac{n}{k^3(n^2-1)^2} \left[ n(2j-1)^2 - j(j-1)(n+1)^2 \right].$$

При  $k = 3$  имеем  $S_I = -\frac{n^2}{27(n^2-1)^2} (8n^2 - 19n + 8)$ . Приравняв к нулю выражение в круг-

лых скобках, получим, что апланатическая коррекция первичных aberrаций в изображении, сформированном трехлинзовой оптической системой, достигается при  $n = 1,828$ .

Таким образом, при апланатической коррекции первичных aberrаций показатель преломления материала линз должен быть заметно больше, чем при стигматической.



Первичная кома изображения точки определяется коэффициентом  $S_{II}$  (см. выражение (5)). При  $a_p = 0$  коэффициент  $S_{II} = (1-V)W$ , при этом, как следует из выражения (8), угол  $\alpha = n \frac{1+V}{1+n}$ . В результате преобразований получаем

$$P = \frac{n^3(1-V)}{(n^2-1)^2} \left[ V^2 - \frac{1+n^2}{n}V + 1 \right].$$

Приравняв это выражение к нулю и решив его, находим, что  $V_1 = n, V_2 = 1/n$ , при этом  $\alpha_1 = n$  и  $\alpha_2 = 1$  соответствуют параметрам отрицательного и положительного апланатических менисков.

Из выражения (5) при  $S_{II} = 0$  следует, что расстояние  $a_p$  определяется как

$$a_p = -\frac{(1-V)W}{P-VW}. \quad (22)$$

Выполнив замену параметров  $P$  и  $W$  в уравнении (22) выражениями (7) и (8), в результате преобразований получим

$$a_p = \frac{(n^2-1)\alpha - n(n-1)}{n(n+2)\alpha^2 - n(2n+1)\alpha + n^2}. \quad (23)$$

При изменении угла  $\alpha$  экстремальные значения расстояния  $a_p$  определяются выражением

$$a_p = a_{p\text{extr}} = \frac{n^2-1}{n} \frac{n+1}{n-1 \pm 2n\sqrt{(n+2)}}.$$

Заметим, что при  $\alpha = 0$  величина  $a_p = -\frac{(n-1)}{n}$ ; при  $\alpha = 2$  —  $a_p = \frac{(n-1)}{n} \frac{n+2}{n+6}$ ; при  $\alpha = -2$  —  $a_p = -\frac{(n-1)}{n} \frac{3n+2}{9n+10}$ .

Зависимость  $a_p(\alpha)$ , определяемая формулой (23), при изменении угла  $\alpha$  в интервале  $-2 \leq \alpha \leq 2$  для трех значений показателей преломления  $n = 1,5$ ,  $n = 1,65$  и  $n = 1,8$  представлена на рис. 5.

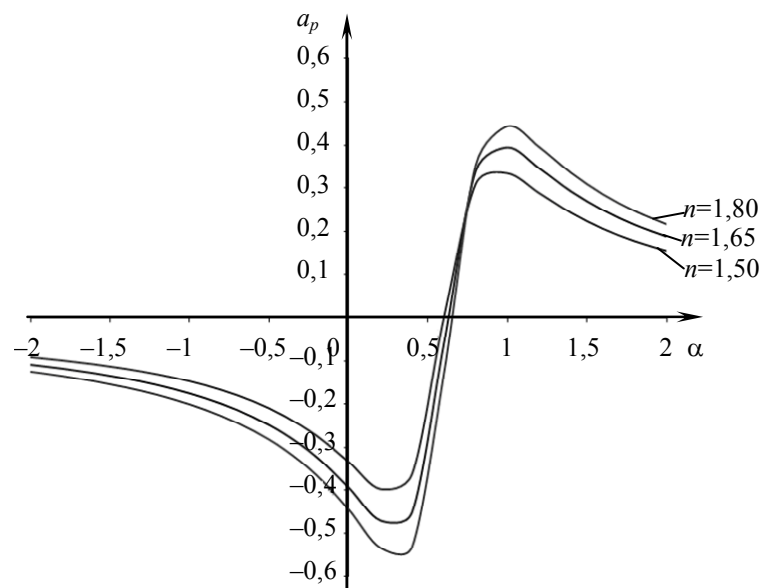


Рис. 5

Аберрации изображения внеосевой точки, сформированного узкими пучками лучей в меридиональной и сагиттальной плоскостях, принято называть кривизной поверхности и астигматизмом. Кривизна поверхности изображения определяется оптической силой линзы и показателем преломления ее материала, первичный астигматизм изображения характеризуется коэффициентом  $S_{III}$ , определяемым формулами (3) и (6).

При  $S_{III} = 0$  выражение (6) можно преобразовать в квадратное уравнение относительно переменной  $a_p$ :

$$a_p^2 + 2(1-V) \frac{W - V(1-V)}{P - 2VW + V^2(1-V)} a_p + \frac{(1-V)^3}{P - 2VW + V^2(1-V)} = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$a_p = -(1-V) \frac{W - V(1-V)}{P - 2VW + V^2(1-V)} \left( 1 \pm \sqrt{1 - (1-V) \frac{P - 2VW + V^2(1-V)}{[W - V(1-V)]^2}} \right), \quad (24)$$

при этом функция  $a_p = a_p(P, W, V)$  однозначно определяется выражением

$$a_p = -\frac{(1-V)^2}{W - V(1-V)}. \quad (25)$$

Приравнивая к нулю подкоренное выражение уравнения (24), определяем параметр  $P = \frac{W^2}{1-V}$ . Тогда согласно выражению (22) можно записать

$$a_p = -\frac{(1-V)^2}{W - V(1-V)}. \quad (26)$$

Из сопоставления выражений (25) и (26) следует, что при однозначном положении входного зрачка, когда в изображении отсутствует первичный астигматизм, отсутствует также и первичная кома.

Используя выражение (8), представим уравнение (7) в виде

$$(1-V)P = W^2 - \frac{(1-V)^2}{(n-1)^2} \left[ \alpha^2 - n(1+V)\alpha + n^2V \right].$$

Подставив это выражение в формулу (24), в результате последующих преобразований получим

$$a_p = -\frac{(n-1)(1-V)}{n+V - (n-1)\alpha \pm \sqrt{(\alpha-n)(\alpha-nV)}}. \quad (27)$$

Для того чтобы выражение (27) имело действительные корни, подкоренное выражение должно быть больше или равно нулю. Отсюда следует, что при  $\frac{\alpha}{n} \geq 1$  угол  $\alpha \geq n$ ; при

$$\frac{\alpha}{n} - V \geq 0 \text{ угол } \alpha \geq nV.$$

Пусть  $\alpha = n$ , при этом  $a_p = \frac{(n-1)(1-V)}{n^2 - V}$ . Радиус кривизны первой поверхности линзы

$r_1 = \frac{(n-1)(1-V)}{n^2 - V}$ , т.е. центр входного зрачка тонкой линзы расположен в центре кривизны ее

первой поверхности. Аберрационные параметры второй поверхности линзы равны  $P_2 = 0$  и  $W_2 = 0$ , т.е. вторая поверхность линзы является апланатической и не вносит первичного

астигматизма в изображение. В результате получена линза, образованная изопланатической и апланатической поверхностями [1, 4].

Пусть  $\alpha = nV$ , при этом  $a_p = \frac{(n-1)(1-V)}{(n^2-1)V - n(1-V)}$ . Радиус кривизны второй поверхности

рассматриваемой линзы  $r_2 = \frac{(n-1)(1-V)}{n^2V-1}$ , т.е. вторая поверхность тонкой линзы концентрична

центру выходного зрачка. Аберрационные параметры первой поверхности линзы равны  $P_1 = 0$  и  $W_1 = 0$ , т.е. первая поверхность линзы является апланатической. Таким образом, и в этом случае тонкую линзу образуют апланатическая и изопланатическая поверхности [1, 4].

При расположении предмета на бесконечно большом расстоянии от линзы ( $V = 0$ ) формула (27) принимает вид

$$a_p = -\frac{n-1}{(n-1)\alpha - n \pm \sqrt{\alpha(\alpha-n)}}. \quad (28)$$

Выражение (28) определяет два значения отрезка  $a_p$ , при которых в изображении отсутствует первичный астигматизм:  $\alpha \leq 0$  или  $\alpha \geq n$ . Входной зрачок линзы, расположенный на меньшем по абсолютной величине расстоянии от ее центра, назван проф. М. М. Русиновым ближним зрачком, а на большем расстоянии — дальним [4].

Заметим, что при  $\alpha = 0$  радиус кривизны первой поверхности  $r_1 = \infty$ , отрезок  $a_p = -\frac{n-1}{n}$ , а  $a'_p = r_2 = 1-n$ ; при  $\alpha = n$  отрезок  $a_p = r_1 = \frac{n-1}{n^2}$ .

Зависимость  $a_p(\alpha)$  при  $-n \leq \alpha \leq 0$  и  $n \leq \alpha \leq 2n$ , где  $n = 1,65$ , представлена на рис. 6, а, б соответственно (при  $S_{III} = 0$ ).

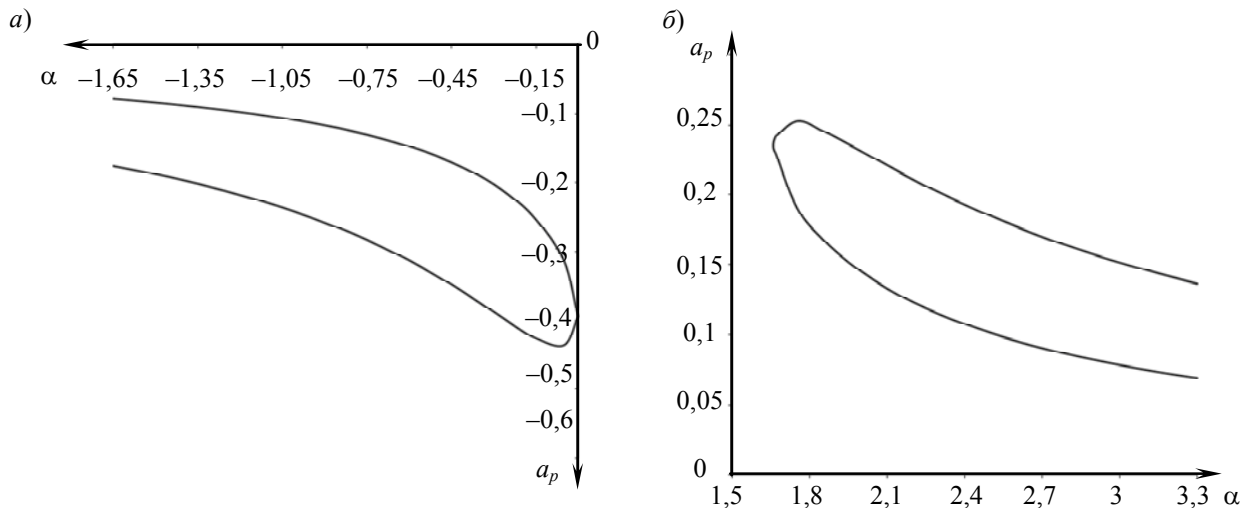


Рис. 6

Пусть  $V = 0$ , тогда выражения (6), (7) и (8) принимают следующий вид:

$$S_{III} = Pa_p^2 + 2Wa_p + 1;$$

$$P = n \frac{2+n}{(n-1)^2} \left( \alpha^2 - \frac{1+2n}{2+n} \alpha + \frac{n}{2+n} \right),$$

$$W = -\frac{n+1}{n-1} \left( \alpha - \frac{n}{n-1} \right).$$

Естественно предположить, что при изменении положения входного зрачка при неизменном значении параметров  $P$  и  $W$  значение коэффициента  $S_{III}$  изменяется, т.е. в общем случае  $S_{III} = S_{III}(a_p) \neq 0$ . Экстремальное значение функции  $S_{III} = S_{III}(a_p)$  находим из условия

$$\frac{\partial S_{III}}{\partial a_p} = 0: S_{III}(a_{p\text{extr}}) = 1 - \frac{W^2}{P}.$$

Исследование абберационных свойств тонкой линзы, выбранной в качестве базовой для построения оптических систем, позволяет дополнять систему требуемыми коррекционными элементами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
2. Зверев В. А. Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.
3. Зверев В. А., Тимощук И. Н. Абберационные свойства тонкой линзы как элемента композиции оптической системы // Оптич. журн. 2010. Т. 77, № 4. С. 10—16.
4. Русинов М. М. Техническая оптика: Учеб. пособие. Л.: Машиностроение, 1979.

#### *Сведения об авторах*

- Василиса Викторовна Ежова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: evv\_foist@mail.ru
- Виктор Алексеевич Зверев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post\_vaz@rambler.ru
- Ирина Николаевна Тимощук** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеoinформатики; E-mail: tim\_ir@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
28.01.14 г.

Н. В. Смирнов, М. С. Лопатина, С. С. Митрофанов

## СЧИТЫВАЮЩАЯ СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматривается алгоритм снятия отчетов устройством считывающей системы инкрементного оптико-электронного преобразователя линейных перемещений, предназначенного для комплектации многокоординатного механообрабатывающего оборудования. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** линейные перемещения, оптико-электронный преобразователь перемещений, инкрементный преобразователь линейных перемещений, штриховая мера длины.

Ускорение темпа развития новых технологий обуславливает постоянное повышение сложности и точности выполнения операций механической обработки деталей на промышленном оборудовании. При этом точность обработки зависит, главным образом, от точности позиционирования исполнительного элемента обрабатывающего комплекса относительно обрабатываемого узла. В свою очередь, задача повышения точности позиционирования рабочего элемента и детали неразрывно связана с задачей контроля их взаимного положения. Обеспечение высокой точности преобразователей линейных перемещений при сохранении уровня надежности и работоспособности систем при высоких скоростях движения контролируемых объектов (обрабатываемых деталей) позволяет повысить экономическую эффективность производства. Таким образом, разработка линейных преобразователей для контроля исполнительных механизмов промышленных станков является крайне важной задачей.

С учетом приведенных факторов в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики разрабатывается преобразователь линейных перемещений, принцип функционирования которого базируется на методе оптоэлектронного сканирования штриховых растров при работе в отраженных пучках лучей. Преобразователь состоит из прецизионной штриховой меры длины, устанавливаемой на подвижной части контролируемого объекта, и считывающей системы, устанавливаемой на неподвижной части объекта. При этом считывающая система содержит канал точного отсчета для анализа положения штрихов меры и канал грубого отсчета для порядковой нумерации штрихов.

Канал (устройство) точного отсчета обеспечивает высокую дискретность измерений порядка 0,05 мкм при диапазоне измерений 1 мм и имеет при этом малые габариты. Функциональная схема канала точного отсчета представлена на рис. 1. Параллельный пучок лучей источника оптического излучения 1, расположенного в фокусе коллимирующего объектива 2, падает на измерительный растр 3 с периодом штриховой меры 1 мм. Отраженные от растра пучки лучей регистрируются фотоприемной камерой, состоящей из объектива 4 с увеличением  $1\times$ , зеркала 5, служащего для уменьшения размеров системы, и КМОП-матрицы 6 с HD-разрешением.

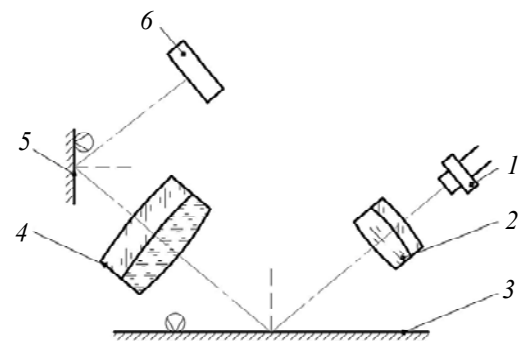


Рис. 1

При высокой скорости перемещения шкалы постоянная подсветка неизбежно вызовет эффект „смаза“ изображения, что пагубно скажется на точностных характеристиках системы. Во избежание этого необходимо использовать осветитель на основе импульсного лазера, так

чтобы длительность освещения штрихов была меньше временного интервала, за который шкала смещается более чем на один пиксел.

Использование фотокамеры, в поле зрения которой находится небольшой участок растра, порядка 3 мм (три штриха), в совокупности с высокой частотой опроса, позволяет определять положения штрихов с точностью до 0,1 мкм.

Все это обуславливает жесткие требования к алгоритму обработки как по точности получаемой информации, так и по времени выполнения алгоритма. Для решения данной проблемы был разработан алгоритм, предназначенный для выделения в кадре изображений штрихов прецизионной меры и определения координат центров изображений на основе вычисления их энергетических центров тяжести. Алгоритм реализуется в электронном блоке линейного преобразователя.

Исходной информацией для расчета является цифровое изображение, регистрируемое фотоприемной камерой в видимом диапазоне длин волн.

Алгоритм включает в себя четыре основные процедуры:

- регистрацию изображения;
- предварительную обработку;
- морфологическую обработку;
- определение координат.

*Процедура регистрации изображения* (рис. 2, а) заключается в преобразовании значения непрерывной энергетической облученности, фиксируемого на поверхности матричного фотоприемника, в двумерный массив дискретных чисел.

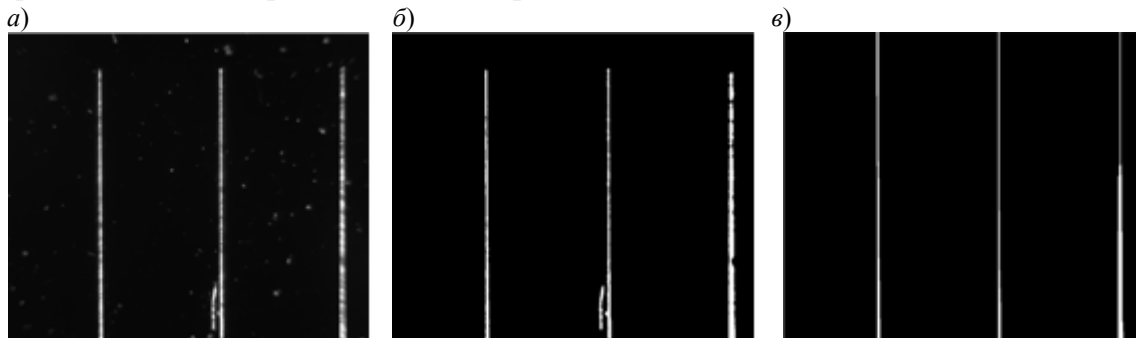


Рис. 2

*Процедура предварительной обработки* предназначена для исключения или частичного уменьшения зашумленности изображения, вызываемой шумом записи, ошибками в передаче данных или загрязнением поверхности штриховой меры. Эта процедура основана на выполнении двух операций:

- адаптивной пороговой фильтрации по методу Отсу;
- медианной фильтрации.

Адаптивная пороговая фильтрация по методу Отсу [1] базируется на анализе гистограммы распределения значений яркости пикселей. Результатом операции является бинарное изображение [2].

Медианная фильтрация предназначена для устранения на изображении точечных и импульсных шумов (см. рис. 2, б). Медианный фильтр представляет собой скользящее окно, охватывающее нечетное число элементов изображения [3].

*Процедура морфологической обработки* предназначена для выделения объекта заданной формы. Эта процедура заключается в выполнении двух операций:

- эрозии;
- замыкания.

Эрозия представляет собой операцию сужения бинарного изображения по заданной маске [4]. В качестве маски был выбран плоский линейный элемент с углом наклона  $90^\circ$  относительно горизонтальной оси и длиной  $l = y/2$ , где  $y$  — высота кадра.

Операция замыкания состоит в устранении разрывов в изображении и „заливке“ изображений штрихов по всей ширине (рис. 2, в). [5]. В качестве маски для выполнения операции замыкания применяется та же маска, что и на этапе операции эрозии.

По результатам суммарной обработки светлые области изображения принимаются за изображения штриха. Далее производится сегментация и маркировка отдельных изображений и для каждого найденного штриха вычисляется значение координаты его центра по горизонтальной оси на основе алгоритма определения координаты  $X_{ц}$  его энергетического центра:

$$X_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^M Q_s(x_i)x_i}{\sum_{i=1}^M Q_s(x_i)},$$

где  $Q_s(x_i)$  — суммарный заряд, полученный в результате сложения элементарных зарядов, формируемых всеми пикселями  $i$ -го столбца матрицы изображения;  $M$  — число строк матрицы;  $x_i$  — дискретные значения пикселей по строкам.

Данный алгоритм позволяет вычислить координату центра изображения с погрешностью, не превышающей десятых или сотых долей размера пиксела [5]. При этом неоспоримым преимуществом алгоритма является возможность реализации посредством выполнения небольшого количества операций за отведенное для измерений время. Следует отметить, что применение процедуры морфологической обработки позволяет обнаружить и распознать штрихи с высокой вероятностью.

Для оценки погрешности разрабатываемого преобразователя необходимо определить погрешности канала точного отсчета как устройства, ограничивающего предельное разрешение и дискретность. С этой целью был разработан и изготовлен макет канала точного отсчета преобразователя, который размещался на испытательном стенде [6], построенном на базе лазерного интерферометра XD-1 фирмы API (США).

Исследование случайной составляющей погрешности преобразований в статике (без перемещений штриховой меры) является основополагающим экспериментом, позволяющим вычислить предельную погрешность определения положения штриха. По значению этой погрешности можно судить о возможности получения требуемого разрешения и дискретности преобразователя.

В процессе экспериментов фотоприемной камерой проводилась многократная съемка изображений штриховой меры с частотой 7 кадров/с. Измерения координаты  $X_{ц}$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma_{X_{ц}}$  проводились в несколько серий (см. таблицу), в каждой из которых фотоприемной камерой регистрировались различные участки штриховой меры.

Исследования, проведенные на макете канала точного отсчета преобразователя, показали хорошую повторяемость результата для разных участков штриховой меры. Таким образом, установлено, что предельная позиционная чувствительность регистрации изображения штриха при измерениях в статике составляет порядка 0,05 пкс. При пересчете в пространство предметов эта величина, с учетом размера пиксела 2 мкм, будет составлять 0,1 мкм. Данные значения получены для макета канала точного отсчета, параметры которого указаны выше, — это позволяет утверждать, что погрешность определения положения штриха не будет превышать 0,1 мкм.

Цель исследования статической характеристики макета канала — определение функциональной зависимости между задаваемым смещением ( $L$ ) штриховой меры и рассчитанными значениями  $X_{ц}$ , а также определение систематической составляющей погрешности макета.

Номер серии	Номер штриха	$X_{ц}$ , пкс	$\sigma_{X_{ц}}$ , пкс
1	1	441,32	0,05
	2	981,73	0,03
	3	1524,41	0,03
2	1	398,61	0,04
	2	938,71	0,04
	3	1481,20	0,05
3	1	343,65	0,03
	2	883,71	0,05
	3	1425,88	0,04
4	1	289,87	0,03
	2	830,05	0,04
	3	1371,85	0,03
5	1	235,94	0,02
	2	776,12	0,01
	3	1317,68	0,04

Подвижная часть объекта с закрепленной на ней штриховой мерой смещалась на минимально возможный шаг, средняя величина которого 10 мкм при диапазоне измерений 0,5 мм. На каждом шаге фотоприемной камерой осуществлялась съемка кадра с изображением трех соседних штрихов меры, при этом пространственное положение определялось только для центрального штриха. На каждом шаге величина смещения штриховой меры контролировалась интерферометром. На основе полученных данных была построена регрессионная зависимость

$$L(X_{ц}) = 543,490362 \cdot \bar{L} + 1052,019976,$$

где  $\bar{L}$  — результат измерений интерферометром величины смещения штриховой меры, мм.

Измеренное отклонение ( $\Delta X$ ) показаний канала точного отсчета преобразователя (рис. 3) от соответствующих значений, принятых в приведенном уравнении, в каждой точке составило не более  $\pm 0,45$  пкс. При этом следует отметить, что данная величина может быть уменьшена на последующем этапе калибровки преобразователя.

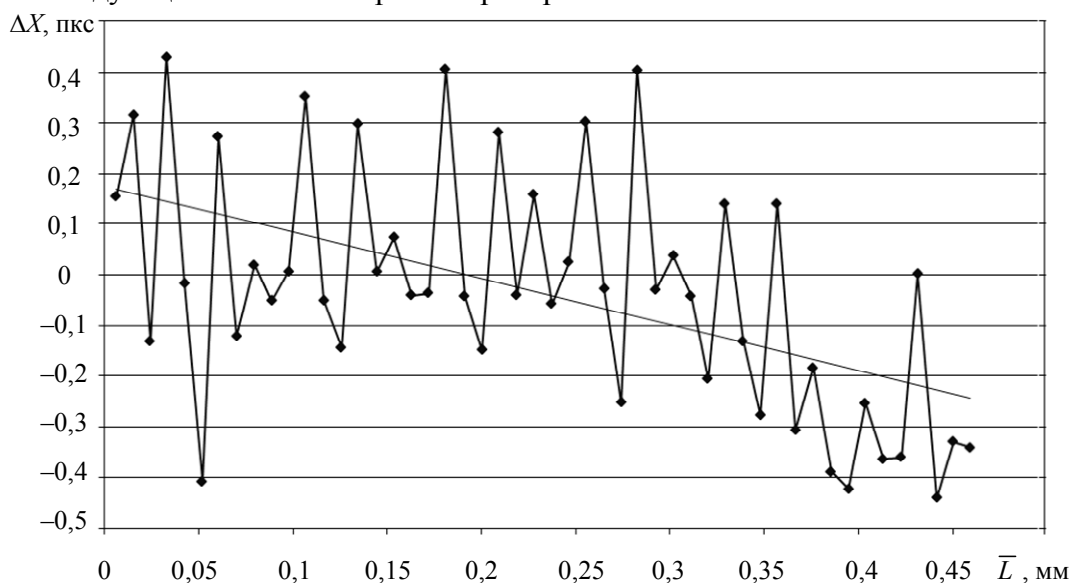


Рис. 3



Несомненный интерес представляют также исследования точностных характеристик преобразователя в динамическом режиме. Для этой цели был собран рабочий макет разрабатываемого преобразователя с диапазоном перемещения 1340 мм. Со схемой установки, методикой проведения исследований и алгоритмом обработки полученных данных можно ознакомиться в работе [6].

Результаты измерений погрешности  $\Delta L = L - \bar{L}$  исследуемого преобразователя для прямого и обратного хода приведены на рис. 4.

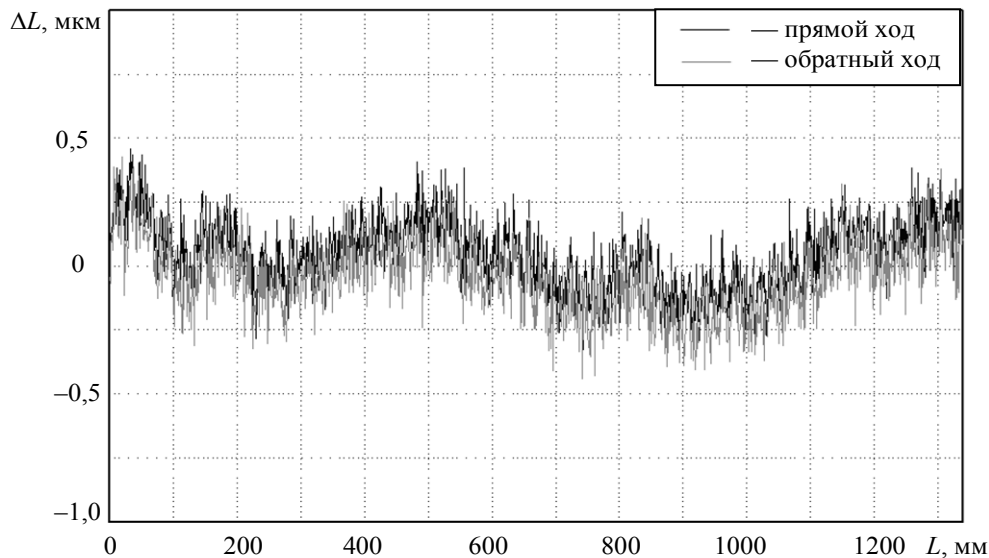


Рис. 4

Как показали результаты многократных измерений, погрешность опытного образца оптико-электронного преобразователя линейных перемещений не превышает  $\pm 0,5$  мкм на всем диапазоне измерений, что отвечает современным требованиям проведения высокоточных операций на механообрабатывающем оборудовании. На этом основании можно сделать вывод о правильности выбора принципа функционирования считывающей системы и схемы ее построения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transact. on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, N 1. P. 62—66.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
3. Яне Б. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2007. 584 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С. Цифровая обработка изображений в среде MatLab. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
5. Андреев А. Л., Ярышев С. Н. Методы моделирования ОЭС с многоэлементными анализаторами изображения: Методические указания к лабораторным работам. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 52 с.
6. Смирнов Н. В., Прокофьев А. В. Оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 27—31.

#### Сведения об авторах

**Николай Викторович Смирнов**

— студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики;  
E-mail: pirate.kolyan@gmail.com

- Мария Сергеевна Лопатина* — ОАО «НПЦ „Завод Ленинец“», Санкт-Петербург; инженер-конструктор; E-mail: gulf\_of\_me\_90@mail.ru
- Сергей Сергеевич Митрофанов* — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: m1990s@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютерной фотоники  
и видеоинформатики НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
17.11.13 г.

УДК 535.317.2

М. Е. ЗАЦЕПИНА, В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ

## ТЕНЕГРАММА ЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКИ КАК ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕРФЕРОГРАММЫ СДВИГА

Исследованы и разъяснены принципы, на основании которых система изофот теневой картины ножа Фуко, сформированная при реализации разработанного количественного теневого метода в виде ряда параллельных полос, близких к прямым, может быть интерпретирована как геометрическая модель интерференционной картины поперечного сдвига.

*Ключевые слова:* теневой метод, нож Фуко, геометрическая модель интерферограммы поперечного сдвига, изофотометрия, деформации волнового фронта.

**Введение.** Теневой метод ножа Фуко, разработанный в 1856 г. и повсеместно применяемый в наши дни в оптическом производстве, определяет функцию искажений волнового фронта как полутоновую картину, позволяющую лишь качественно отображать деформации исследуемой оптической поверхности или волновые аберрации в выходном зрачке исследуемой оптической системы. Способ же количественной расшифровки теневых картин не был развит в метод измерения и соответственно не нашел практического применения [1].

Поэтому главной задачей, стоящей перед исследователями, является создание количественного теневого метода, базирующегося на традиционном качественном теневом методе, но имеющего ряд принципиальных отличий как по структуре, так и по новым непревзойденным возможностям, создаваемым благодаря современным достижениям высоких технологий, в том числе компьютерных.

**Постановка задачи.** Предметом исследования в данной статье является последовательное обстоятельное рассмотрение операций, инструментов и средств, использованных в процессе разработки количественного теневого метода, теоретическое обоснование метода и создание алгоритма его практической реализации. Основой построения такого алгоритма являются следующие этапы:

— подробный анализ теоретических и методических основ разрабатываемого метода на базе построения глубоких логических аналогий между создаваемым количественным теневым методом и традиционным методом двухлучевой интерферометрии;

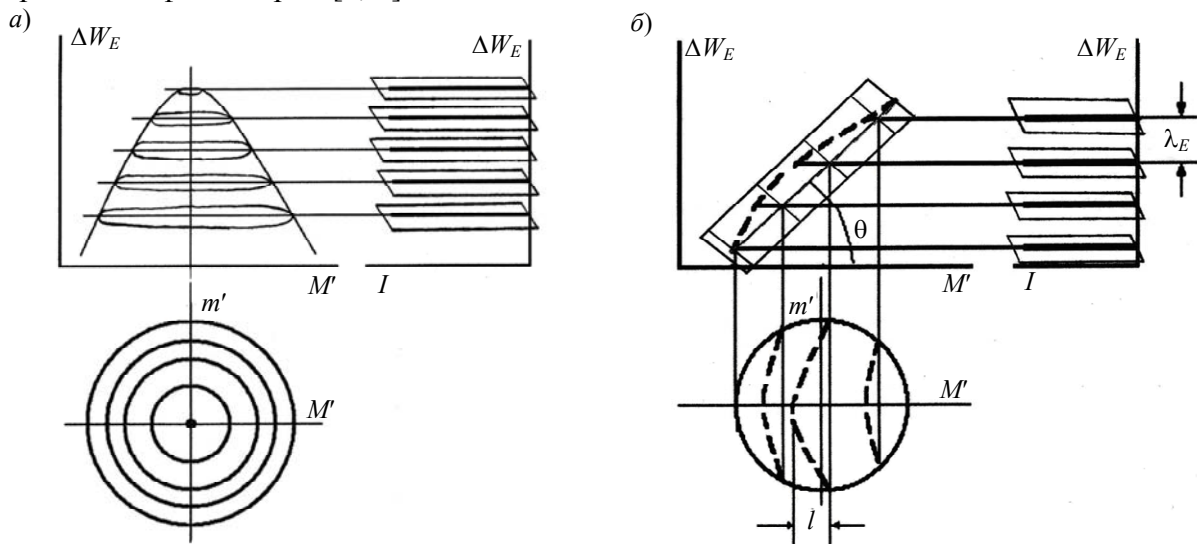
— исследование и количественный анализ связи между деталями полутоновой теневой картины как двумерной функции неравномерности освещенности и деформациями волнового фронта, возникающими при неровностях полированной поверхности или при наличии поперечных аберраций в выходном зрачке исследуемой оптической системы;

— поиск и детальный анализ инструмента визуализации исследуемых деформаций волнового фронта; в качестве такого инструмента выбран разработанный авторами метод компьютерной изофотометрии.

**Модернизация теневого метода ножа Фуко.** Основными достоинствами теневых методов являются их высокая чувствительность (на уровне  $0,1\lambda$ ), простота схемной реализации и интерпретации, высокая экономичность, в том числе и используемой аппаратуры.

Рассматриваемый процесс создания количественного теневого метода можно трактовать как модернизацию традиционного качественного теневого метода ножа Фуко. Основным инструментом модернизации можно считать предложенный и реализованный авторами способ формирования контурной карты теневой картины ножа Фуко в виде тенеграммы линейной решетки (аналогичной геометрической модели интерферограммы поперечного сдвига).

Сущность разрабатываемого изофотометрического теневого метода состоит в трансформации теневой картины ножа Фуко в контурную карту (топограмму) функции распределения освещенности исходной тенеграммы (см. рисунок). В качестве инструмента преобразования теневой картины в контурную карту предлагается метод компьютерной изофотометрии, визуализируемый многоимпульсной функцией преобразования исходного аргумента, получившей название „гребенка“ (англ. — Comb) [2]. Получение контурной карты осуществляется с помощью электронной матричной регистрации тенеграммы и последующей ее трансформации в программе изофотометрии [1, 3].



Деформации волнового фронта, выраженные в виде полутоновых деталей теневой картины, трансформируются в контурную карту с помощью функции „гребенка“ (см. рисунок, а). Функция „гребенка“, взаимодействуя с функцией отображения неровностей на теневой картине (полутоновое пятно), преобразует последнюю в карту, состоящую из контуров как линий (изофот), содержащих точки теневой картины, характеризующиеся одинаковой освещенностью [4]. Контурная карта осесимметричной неровности представляет собой систему замкнутых линий.

Идеология последующей расшивки и математической обработки контурной карты тенеграммы требует преобразования „кольцевой“ топограммы в топограмму как систему прямолинейных параллельных контуров, расположенных периодически с равным интервалом [5].

Для такого преобразования топограммы фотометрический клин, генерированный в компьютере, накладывается на тенеграмму, содержащую полутоновое пятно, соответствующее местной деформации волнового фронта. Далее функция распределения освещенности в тенеграмме, дополненная клином, взаимодействует с функцией преобразования „гребенка“ и образует систему параллельных отрезков прямых линий — геометрическую модель теневой

линейной решетки. На этой модели неровности, отображаемые тенеграммой, будут изображены как соответствующие искривления прямых линий (см. рисунок, б). Такой механизм отображения неровностей в модели линейной решетки аналогичен, по признаку иллюстративного подобия, действию фазового клина в классическом интерферометре.

Для дальнейшей интерпретации оконтуренных теневых картин и восстановления карты неровностей волнового фронта необходимо обеспечить получение и регистрацию двух теневых картин, различающихся поворотом лезвия ножа Фуко на  $90^\circ$ .

**Примечание.** Для всех функций преобразования приняты единые обозначения функции и аргумента (см. рисунок):  $\Delta W_E$  — независимая переменная, соответствующая исследуемому двумерному параметру (здесь — функции распределения относительной освещенности  $W_E$  в тенеграмме);  $I$  — зависимая переменная, соответствующая двумерному распределению относительной освещенности в оконтуренном изображении тенеграммы;  $\theta$  — угол наклона клина, с которым связан период ( $l$ ) полос геометрической модели линейной решетки;  $m'$  и  $M'$  — координаты входного зрачка;  $\lambda_E$  — период импульсов функции преобразования „гребенка“.

В результате при исследовании оптической системы (например, фотообъектива „Индустар-50“) формируются две изофотограммы — карты поверхности поперечных аберраций. Далее эти изофотограммы подвергаются расшифровке с применением специальной программы обработки интерферограмм сдвига „Tiger“ и обрабатываются как пара геометрических моделей теневой линейной решетки.

В результате компьютерной оцифровки пары изофотограмм теневых картин ножа Фуко получаем восстановленную поверхность деформаций волнового фронта (волновых аберраций) в виде профилей по осям  $X$  и  $Y$ , трехмерную диаграмму этой поверхности деформаций, таблицу коэффициентов Цернике, а также ряд функций как характеристик качества изображения, сформированного исследуемой оптической системой или поверхностью [6].

Проведенные сравнительные исследования [6] подтвердили достоверность и высокую эффективность количественного теневого метода на примере подобия двух отображений (интерферограмм) одного и того же волнового фронта, полученного двумя принципиально различными методами — теневой изофотометрии и классической интерферометрии.

**Заключение.** Итак, исследованы и разъяснены принципы, на основании которых система изофот теневой картины ножа Фуко, сформированная при реализации предложенного количественного теневого метода в виде ряда параллельных полос, близких к прямым, может быть интерпретирована как геометрическая модель интерференционной картины поперечного сдвига, пригодной для обработки в соответствующей компьютерной программе.

Впервые в мировой практике после изобретения теневого метода Фуко теневая картина становится источником как качественной, так и количественной информации для оценки и измерения характеристик качества оптической системы и поверхности, получения карты и трехмерного изображения поверхности деформаций волнового фронта, а также системы коэффициентов Цернике и комплекса функций — характеристик качества изображения оптической системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 226—230.
2. Кирилловский В. К. Оптические измерения. Ч. 5. Аберрации и качество изображения. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 115 с.
3. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Современный метод количественной расшифровки теневой картины линейной решетки // Тр. 10-й Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2012“. Т. 2. СПб: Оптич. общ. им. Д. С. Рождественского, 2012. С. 130—133.

4. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. Применение метода изофотометрической фоторегистрации при исследованиях и аттестации главного зеркала БТА // ОМП. 1976. № 12.
5. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Ч. 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 131 с.
6. Зацепина М. Е., Кирилловский В. К. Реализация современного количественного теневого метода // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 3. С. 68—73.

**Сведения об авторах****Марина Евгеньевна Зацепина**

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

**Владимир Константинович Кирилловский**

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

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
10.02.14 г.

УДК 535.317

Ю. В. ФЕДОРОВ, А. Ю. ФЕДОРОВА

**ПЕРФОРАЦИОННЫЕ ОЧКИ**

Описано устройство перфорационных очков, принцип их действия, лечебный и тренажерный эффекты применения, а также их модификации.

**Ключевые слова:** аккомодация, тренажерный эффект, перфорация на цветном поле.

Перфорационные (или дырчатые) очки широко распространены, давно продаются в России и часто позиционируются как универсальное средство улучшения зрения без хирургического вмешательства.

Очки устроены следующим образом. На непрозрачной, например пластиковой, поверхности (основе) выполнены расположенные регулярно отверстия (диаметром от 0,9 до 1,5 мм в разных моделях), подобно сотовой структуре сетчатки глаза.

Поле зрения глаза (рис. 1), „вооруженного“ перфорационными очками [1], меньше, чем при наблюдении без очков и составляет ориентировочно  $70^\circ$  по вертикали и  $90^\circ$  по горизонтали. Каждый элемент пространства предметов может наблюдаться через одно или два-три смежных перфорационных отверстия, соответствующие малой части зрачка глаза.

На рис. 2 представлена схема, иллюстрирующая изменение глубины резкости изображения, формируемого оптической системой, от  $T_1$  до  $T_2$  относительно сопряженной с изображением области пространства предметов при изменении диаметра выходного зрачка от максимального  $D_1$  до минимального  $D_2$ , соответствующего диаметру перфорационного отверстия очков.

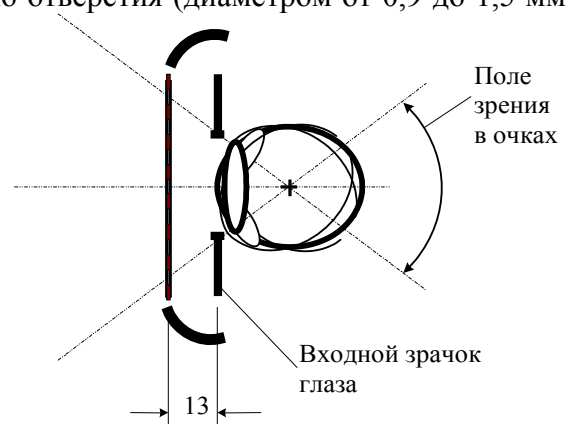


Рис. 1

Как ясно из рисунка, уменьшение диаметра  $D_1$  зрачка оптической системы, частью которой является глаз человека, приводит к расширению границ резкого изображения области пространства предметов, наблюдаемого без напряжения аккомодации. При этом также повышается острота зрения, что обусловлено уменьшением величины относительного отверстия оптической системы.

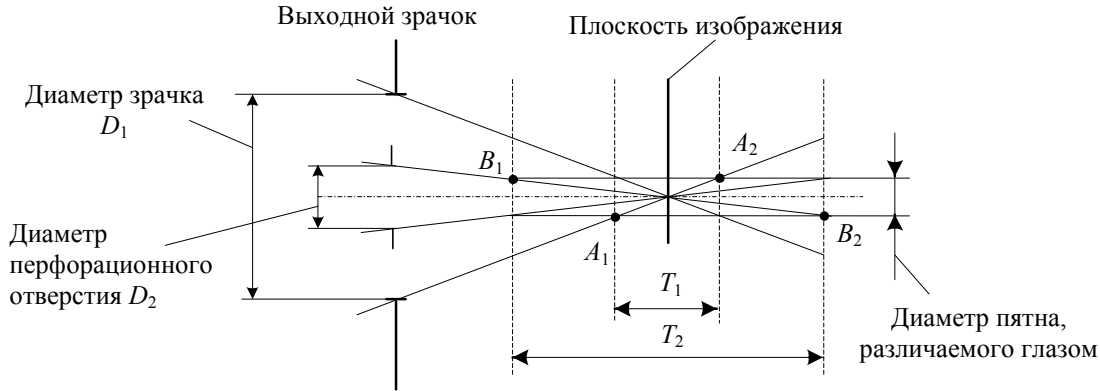


Рис. 2

Исследования принципов формирования изображения с использованием перфорационных очков показали, что после прохождения света через отверстия на сетчатке образуются четкие, а не размытые, когда свет проходит без очков, изображения, в соответствии с числом задействованных отверстий. Если свет проходит на сетчатку сразу через нескольких отверстий (одно центральное и боковые), расположенных в правильном гексагональном порядке, то на сетчатке формируется суммарное изображение. Причем самым четким и в этом случае будет изображение, формируемое центральным отверстием. Глаз ощущает дискомфорт, вызываемый суммарным изображением, и передает информацию в мозг. В результате работы цилиарных мышц глаза кривизна хрусталика изменяется, так что четкое, но раздвоенное изображение, формируемое двумя (или большим количеством) отверстиями, преобразуется в одно еще более четкое изображение.

Описанный эффект обуславливает дополнительную нагрузку на цилиарные мышцы глаза. Если при использовании перфорационных очков постоянно переводить взгляд из одной точки пространства предметов в другую, например с одного предмета на другой, то такая дополнительная работа цилиарных мышц становится непрерывной и приобретает тренировочный (тренажерный) характер. В этом заключается „оптическая“ суть перфорационных очков как глазных тренажеров.

После длительной работы, связанной с чтением, шитьем, работой за компьютером и т. п., для людей как с нормальным зрением, так и людей, страдающих близорукостью или дальнозоркостью, очки служат средством расслабления (релаксации) напряженных и усталых мышц глаз. Ослабление аккомодации зрительного органа приводит к соответствующему снижению напряжения центральной нервной системы, особенно при невротическом состоянии.

Очки рекомендуются к применению при высокой степени миопии, а также в послеоперационный период для тренировки глаз.

Перспективно также сочетание тренажерного эффекта перфорационных очков с физиологическим цветовым воздействием. Такое сочетание обеспечивается при выполнении отверстий в цветной полупрозрачной основе (пленка, полимер).

Многочисленные исследования показали, что монохроматические излучения участвуют в осуществлении гомеостатических реакций на молекулярном, клеточном и тканевом уровне, а также влияют на функциональное состояние систем организма. Установлено, что электромагнитные излучения оптического диапазона являются естественными регуляторами биохимических, биофизических и энергоинформационных процессов в организме человека: таким образом, они способствуют достижению психосоматической гармонии, могут заменять ле-

карства и служить универсальным средством лечения многих заболеваний. При этом каждый цвет оказывает свое специфическое воздействие на организм человека, в том числе и на его психоэмоциональное состояние. В частности, перфорационные очки, выполненные на голубом поле (основе) [2], оказывают успокаивающее действие, способствуют снижению артериального давления и устранению воспалительных процессов, обладают бактерицидным действием.

В настоящее время цветотерапия переживает второе рождение. Увеличение числа хронических иммунодефицитных заболеваний вынуждает ученых искать новые и развивать старые, незаслуженно забытые безвредные и эффективные методы лечения, способные повысить иммунитет и защитные силы организма [3].

Для достижения максимального эффекта от применения очков цвет основы должен подбираться индивидуально в соответствии с патологией в ходе консультации с врачом-офтальмологом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М. — Л.: Машиностроение, 1966.
2. Панков О. П. Очки-убийцы. М.: Метафора, 2005.
3. Федоров Ю. В. Зрение: линзовая коррекция, зрительная гимнастика, цветотерапия. СПб: ООО „НП-Принт“, 2013.

#### *Сведения об авторах*

**Юрий Владимирович Федоров**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: FedorovYV@yandex.ru

**Александра Юрьевна Федорова**

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра экономической теории и бизнеса; ст. преподаватель; E-mail: AYFedorova@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
измерительных технологий  
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию  
01.07.13 г.

Е. И. Яблочников, А. В. Пирогов, А. А. Грибовский

## СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СИСТЕМ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Представлен типовой процесс проектирования литьевых форм с использованием систем виртуального моделирования. Отмечены значение и эффективность совместного применения систем виртуального моделирования и аддитивных технологий. Рассмотрена возможность применения аддитивных технологий для визуализации данных, рассчитываемых в CAE-системах, а также изготовления элементов литьевых форм из полимерных материалов или металлических порошков.

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, CAD/CAM/CAE-системы, литье под давлением, литьевые формы, силиконовые заливочные формы, формообразующие детали, конформные системы охлаждения.*

**Введение.** Технология литья термопластичных полимерных материалов (ТПМ) под давлением является одной из самых массовых технологий производства современных изделий. Пластиковые детали содержатся практически в любом изделии и степень их использования возрастает. При этом процесс подготовки производства средств технологической оснастки для литья изделий достаточно трудоемок и требует существенных временных затрат, которые могут не только повлиять на коммерческую успешность новых продуктов, но и поставить под сомнение целесообразность выпуска изделия как такового.

Применение методов и средств виртуального моделирования на различных этапах интегрированного процесса в сочетании с использованием технологий быстрого производства (аддитивных технологий) существенно увеличивает вероятность вывода на рынок новых изделий в приемлемые сроки и с требуемым качеством.

**Виртуальное моделирование и аддитивные технологии.** Процесс проектирования и производства изделия из ТПМ (рис. 1) характеризуется участием различных специалистов и принятием множества решений на каждом из этапов, что, в свою очередь, на практике приводит к множеству итераций.

Выбор аддитивных технологий для использования на разных этапах данного процесса зависит от различных факторов (применяемого материала, точности размеров, требований к качеству поверхностей, скорости изготовления) [1]. Современное оборудование на базе аддитивных технологий обеспечивает точность изделий до нескольких десятков микрон. Такой уровень точности в сочетании с высоким качеством поверхности позволяет использовать полученное изделие, например, в качестве мастер-модели при литье под вакуумом в силиконовые формы [2]. Применение данной технологии обеспечивает возможность получения небольших партий изделий с заданными параметрами (шероховатость поверхности, цвет и т.п.), вы-



полненных из разнообразных материалов-имитаторов промышленных ТПМ. Используя одну силиконовую форму, можно получить несколько десятков отливок (в зависимости от сложности мастер-модели и типа материала-имитатора), при этом за счет литья под вакуумом обеспечивается хорошая заполняемость даже форм со сложной геометрией. Использование литья в силиконовые формы совместно с аддитивными технологиями позволяет производить уникальные изделия с достаточно низкой себестоимостью, поэтому можно рекомендовать применение данного способа при производстве малых серий изделий из ТПМ. При увеличении размера партии деталей литье в силиконовые формы становится неэффективным вследствие повышения материальных и временных затрат на создание и тиражирование форм.



Рис. 1

Выделим следующие аспекты применения систем виртуального моделирования в сочетании с использованием аддитивных технологий: моделирование на этапах разработки и согласования конструкции изделия; моделирование конструкции литейной формы; моделирование процессов литья под давлением.

**Моделирование на этапах разработки и согласования конструкции изделия.** Для моделирования используются САЕ-системы (Computer Aided Engineering — системы инженерного анализа), получившие широкое распространение во множестве областей, связанных с производством и эксплуатацией изделий. Результаты расчетов в САЕ-системах обладают большой информативностью, которая выражается в виде графиков, таблиц и диаграмм. Однако для начальных этапов процесса проектирования и подготовки производства (маркетинговые исследования, выбор технологии производства) необходим такой вид представления информации, который будет максимально нагляден для руководителей проекта, маркетологов и других заинтересованных специалистов. Например, технология InkJet (или 3DP — трехмерная струйная печать — технология, основанная на послойном соединении порошкообразных материалов специальным клеевым составом) позволяет изготавливать наглядный трехмерный образец изделия (или формообразующих деталей литейных форм) с полноцветным (16 бит) представлением отклонений геометрических размеров изделия от исходных, а также значений напряжений или распределения давлений, полученных при расчетах в САЕ-системе.

**Моделирование конструкции литейной формы.** Виртуальное моделирование с использованием САЕ-систем, например Moldex3D, не ограничивается анализом „поведения“ изделия при его эксплуатации, но и позволяет изучить процесс его производства путем заполнения литейной формы расплавленным ТПМ. На этапе проектирования формообразующих деталей (ФОД) литейной формы целесообразно оценить потенциальные напряжения, вызванные повышенным давлением и температурой, и проанализировать их влияние на литейную форму. По диаграмме распределения давления (рис. 2, а) при заполнении формы и выдержке можно не только выяснить, справится ли форма с нагрузкой, но и определить предельную продолжительность цикла литья, при которой произойдет необратимое нарушение геометрии формы или ее разрушение. Также результаты анализа позволяют определить

максимальную температуру расплава, впрыскиваемого в полость (рис. 2, б), и оценить стабильность геометрии формы при ее нагреве.

Использование аддитивных технологий на стадии технологической подготовки производства литьевых форм обеспечивает возможность не только визуально оценить ФОД, но и изготовить реальные детали из стандартного ТПМ. При этом виртуальное моделирование (см. рис. 2) позволяет предварительно оценить давление внутри формы и подобрать такой материал (и соответствующую ему аддитивную технологию), который, с одной стороны, будет достаточно стоек к нагрузкам, а с другой — обеспечит приемлемое качество для проведения полноценных испытаний.

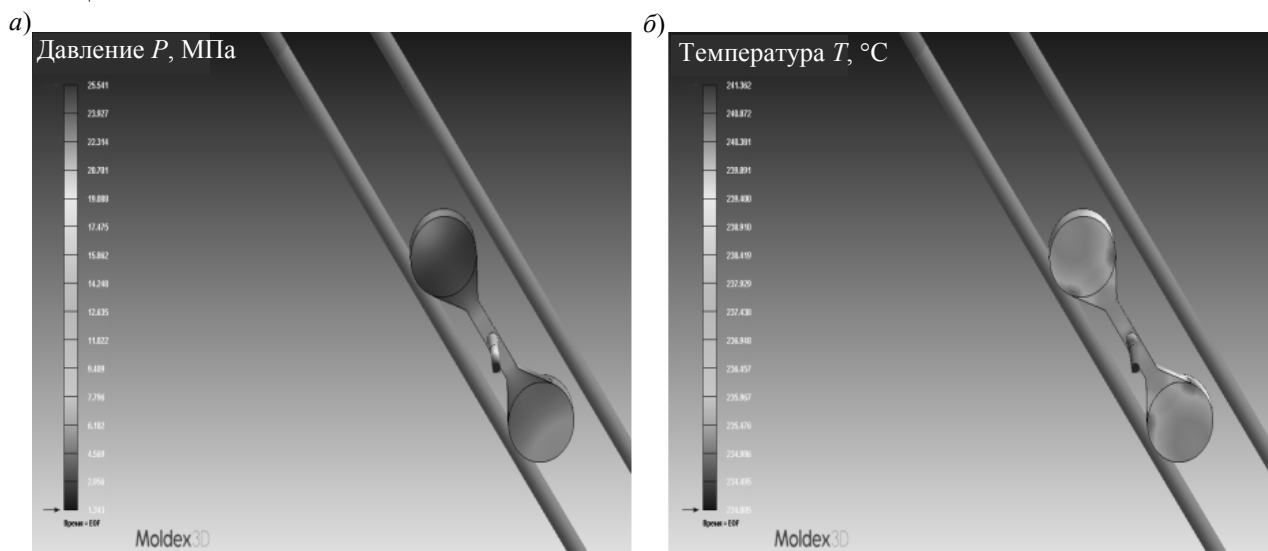


Рис. 2

Возможности получения ФОД из полимерных материалов в настоящее время широко исследуются разработчиками и производителями, хотя номенклатура соответствующих материалов сравнительно небольшая. В качестве примера можно привести материал Digital ABS компании “Stratasys”. В большей степени освоенными при изготовлении ФОД являются аддитивные технологии, использующие спекание или сплавление металлических порошков. В настоящее время это наиболее экономически выгодный вариант при изготовлении литьевых форм с конформными системами охлаждения.

**Моделирование процессов литья под давлением.** Применение конформных систем охлаждения литьевых форм позволяет максимально повысить эффективность охлаждения за счет сокращения времени цикла литья и улучшить качество деталей со сложной геометрией и при наличии разнотолщинности. Данные системы охлаждения проектируются таким образом, чтобы их контур по возможности эквидистантно повторял геометрию отливаемой детали. За счет такого расположения обеспечивается более равномерное охлаждение при литье. Геометрия конформных каналов охлаждения намного более сложная, чем каналов обычного охлаждения, соответственно их проектирование и изготовление является задачей повышенной сложности. Для примера на рис. 3, а показан внешний вид формообразующих деталей, а на рис. 3, б — 3D модель с выделенными конформными каналами охлаждения.

Использование конформных систем охлаждения позволяет создать эффективное равномерное тепловое поле (распределение температур в объеме или на поверхности тела) ФОД литьевой формы. В результате такие дефекты изделия, как коробление и усадка, а также возникающие остаточные напряжения могут быть устранены или существенно снижены.

Проектирование подобных систем охлаждения ФОД литьевых форм невозможно без применения специализированных CAE-систем анализа литьевых процессов. Например, примененная при моделировании система Moldex3D [3] позволяет проанализировать эффектив-

ность работы системы охлаждения литьевой формы как по величине перепада температур в разных частях отливки, так и по длительности цикла и соответственно оценить качество отливки. Использование результатов CAE-анализа и построение конформной сбалансированной системы, обеспечивающей равномерное и быстрое охлаждение всего изделия [4], позволяет значительно уменьшить время цикла (по результатам Moldex3D на 30—40 %). Для создания стойкой к температуре и высокому давлению оснастки рекомендуется использовать аддитивные технологии EBM (Electron Beam Melting — создание изделий за счет расплавления порошкового материала под действием пучка электронов) и LENS (Laser Engineered Net Shaping — создание изделий за счет спекания порошкового материала лазерным лучом).

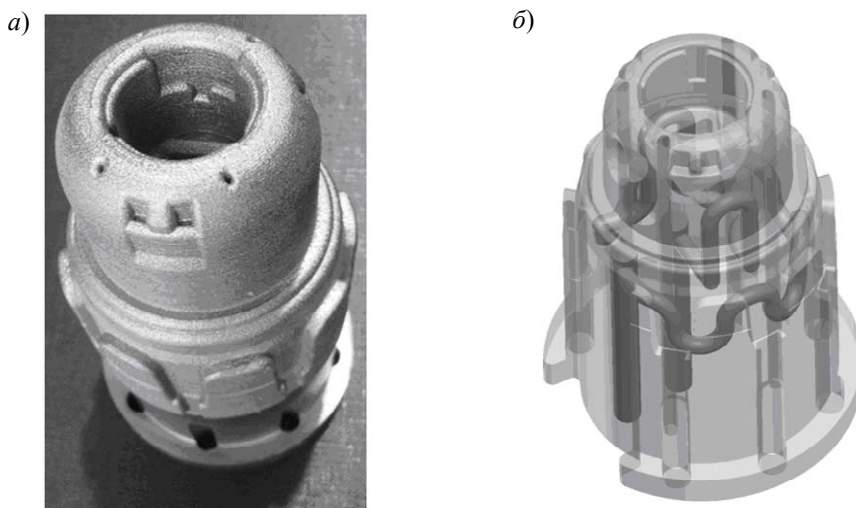


Рис. 3

**Заключение.** Применение аддитивных технологий совместно со средствами виртуального моделирования при проектировании и производстве изделий из термопластичных полимерных материалов позволяет существенно сократить время от начала разработки до выпуска конечного изделия. Эффективность такого подхода подтверждается его использованием при проведении опытно-конструкторских и технологических работ, выполняемых на кафедре технологии приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В качестве экспериментальной базы применялись установки Eden 350V и Dimension 1200s (производства фирмы “Stratasys”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибовский А. А., Тамбовцева Н. А. Алгоритмы выбора технологий быстрого прототипирования для единичного и мелкосерийного производства изделий // Сб. тез. докл. конф. молодых ученых. Вып. 2. Труды молодых ученых / Под ред. В. О. Никифорова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. С. 207—209.
2. Яблочников Е. И., Пирогов А. В., Васильков С. Д., Восоркин А. С., Кушнаренко А. А. Принципы проектирования литьевых форм для производства пилотных серий деталей оптических приборов из термопластичных полимерных материалов // Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. „Современное машиностроение. Наука и образование“. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 409—417.
3. Яблочников Е. И., Брагинский В. А., Восоркин А. С. Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 75—80.
4. Moldex3D [Электронный ресурс]: Direct Metal Laser Sintering Technology Applications on Conformal Cooling System Development, 2013; <<http://www.moldex3d.com/en/assets/2012/01/Direct-Metal-Laser-Sintering-Technology-Applications-on-Conformal-Cooling-System-Development.pdf>>.

**Сведения об авторах**

- Евгений Иванович Яблочников** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения;  
E-mail: eugeny@beepitron.com
- Александр Владимирович Пирогов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения;  
E-mail: avpir@mail.ru
- Андрей Александрович Грибовский** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения;  
E-mail: griandrey@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения

Поступила в редакцию  
05.02.14 г.

## SUMMARY

**P. 5—10.**

### **COMPLEXITY AND EFFICIENCY OF INFORMATION NETWORKS**

Efficiency-related features of information network are considered. The concept of efficiency is refined. Volume of information work carried out by a network is proposed for a numeric characteristic of the network efficiency. An important property of a network - interaction between its components is analyzed. A model is proposed for calculation of probability of executed work volume for simple and complex network structure. Information efficiency of a network is shown to increase considerably when the network complexity grows. Recommendations for practical use of the results are formulated.

**Keywords:** complexity, efficiency, information network, work, interaction, iteration, probability, topology, hyper-delta distribution.

#### *Data on authors*

**Ivan Yu. Paramonov** — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, St. Petersburg; Doctorant;  
E-mail: ivan\_paramonov@mail.ru

**Vladimir A. Smagin** — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Support, St. Petersburg; E-mail: va\_smagin@mail.ru

**P. 11—14.**

### **MULTI-LEVEL OPTIMIZATION METHOD IN THE PROBLEM OF SEPARATE ELEMENT RESERVATION**

A method is developed to derive the optimal solution to the multi-level optimization problem based on consideration of separate element reservation as an example. Genetic method of search for solution in many-colonies modification is analyzed. The lines of further investigation of the genetic method for multi-level problems are described.

**Keywords:** genetic algorithm, optimization, multilevel system, reservation, many-colonies algorithm, colony, generation.

#### *Data on author*

**Igor B. Bondarenko** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Design and Security of Computer Systems;  
E-mail: igorlitmo@rambler.ru

**P. 15—25.****INVERSE Z-TRANSFORM IN IDENTIFICATION OF DISCRETE SYSTEMS WITH DELAY**

An algorithm for current identification of discrete system with variable delay is proposed. The system under consideration is supposed to consist of ideal pulse element, zero-order extrapolator, and linear continuous component. The algorithm employs assessment of the delay parameter for a grid function (the fractional part of the delay parameter value) in modified inverse Z-transform based on condition of zero value of continuous component transient in the delay point.

**Keywords:** identification, delay, modified inverse Z-transform.

**Data on authors**

- Rais D. Akhmetsafin** — Cand. Techn. Sci.; Gazprom Georesurs Ltd., Moscow; Deputy Director;  
E-mail: akhmetsafinrd@mail.ru
- Rimma Z. Akhmetsafina** — Cand. Techn. Sci.; National Research University “Higher School of Economics”,  
Moscow; E-mail: rakhmetsafina@hse.ru

**P. 25—29.****REDUCTION OF FEATURE DESCRIPTION DIMENSIONALITY IN THE PROBLEM OF OBJECT DETECTION IN IMAGES**

A modification of sliding-window algorithm for object detection based on feature selection with the use of decision trees ensemble is proposed. Reduction in detection time without a loss in quality is demonstrated by the example of digital simulation of HOG-features in the problem of pedestrian detection.

**Keywords:** object detection, pedestrian detection, histograms of oriented gradients, feature selection, decision tree.

**Data on author**

- Pavel N. Druzhkov** — Post-Graduate Student; Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Department of  
Mathematical Logic and Higher Algebra; E-mail: druzhkov.paul@gmail.com

**P. 30—38.****AUTONOMOUS METHOD FOR ESTIMATION OF ORBITAL PARAMETERS AND SPACECRAFT ORIENTATION IN THE ABSENCE OF A PRIORI INFORMATION**

A method for estimation of orbit elements and spacecraft (SC) orientation parameters relative to a moving orbital coordinate system is proposed. The method is based on analysis of spacecraft axes hodograph formed with the use of astronomic measurements carried out with an optical-electronic device rigidly fixed on the SC body at known angles.

**Keywords:** autonomous navigation and orientation, astronomic measurement, hodograph of axis, optical-electronic device, identification of stars.

**Data on author**

- Tamara V. Danilova** — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Military Institute Department,  
St. Petersburg; E-mail: danitoma58@yandex.ru

**P. 38—43.****SELF-ROUTING OF SIGNALS IN ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER BASED ON NEURAL NETWORK**

Analog-to-digital converter based on neural network is considered. An algorithm of self-routing and a method of organization of individual analog-to-digital converter for each input signal are proposed.

**Keywords:** analog-to-digital converter, self-routing, neural network.

*Data on authors*

- Anton I. Posyagin* — Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Telemechanics; Assistant Lecturer; E-mail: posyagin.anton@gmail.com
- Alexander A. Yuzhakov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of Automation and Telemechanics

**P. 44—46.****UNIVERSAL MODULAR RECONFIGURABLE SYSTEM FOR REAL-TIME PROCESSING OF THERMAL AND MULTICHANNEL IMAGE**

A reconfigurable system of universal functional modules designed for full cycle processing of signal from thermal and multichannel imagers is described. The system of modules may be treated as a set of macro pipeline elements.

**Keywords:** embedded reconfigurable computing systems, thermovision devices, multichannel imaging devices, image processing.

*Data on authors*

- Harry E. Zhurov* — Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, “Design-and-Technology Institute of Applied Microelectronics”, Novosibirsk; Head of Department; E-mail: hz@oesd.ru
- Mikhail Yu. Tsvinsky* — Branch of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, “Design-and-Technology Institute of Applied Microelectronics”, Novosibirsk; Leading Engineer; E-mail: m\_tsv@mail.ru

**P. 47—50.****METHODS OF SOUND PRESSURE AMPLIFICATION IN MONOMORPHIC PIEZOELECTRIC ELEMENTS**

The effect of low-frequency oscillation in monomorphic piezoelectric elements is considered. Two methods of sound pressure amplification are proposed: separation of piezoelectric element electrodes, and employment of additional oscillatory circuit at the piezoelectric element input.

**Keywords:** monomorphic piezoelectric element, low-frequency oscillations, sound pressure, amplitude-frequency characteristic.

*Data on authors*

- Valery M. Sharapov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Cherkasy State Technological University; Department of Instrument Making; E-mail: v\_sharapov@rambler.ru
- Oleg N. Petrishchev* — Dr. Techn. Sci., Professor; National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”; Department of Acoustics and Acoustoelectronics; E-mail: om.petrishchev@aae.kpi.ua
- Alexander M. Prohorenkov* — Cand. Techn. Sci., Professor; Murmansk State Technical University; Department of Automation and Computer Engineering; E-mail: prohorenkovam@mstu.edu.ru
- Konstantin V. Bazilo* — Cand. Techn. Sci.; Cherkasy State Technological University; Department of Instrument Making; E-mail: b\_constantine@mail.ru
- Zhanna V. Sotula* — Cand. Techn. Sci.; Cherkasy State Technological University; Department of Instrument Making; E-mail: janna-sotula@yandex.ua

**P. 51—60.****ABERRATION PROPERTIES OF THIN LENS IN WIDE AND NARROW RAY BEAM**

The possibility is shown and conditions are formulated for both stigmatic and aplanatic correction of third-order aberrations in image formed by positive lens system. Relations are obtained which determine position of thin lens entrance pupil to avoid primary coma and astigmatism in the image.

**Keywords:** image, optical system, thin lens, aberrations, entrance pupil.

*Data on authors*

- Vasilisa V. Ezhova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: evv\_foist@mail.ru
- Viktor A. Zverev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: post\_vaz@rambler.ru
- Irina N. Tymoshchuk* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Photonics and Video Informatics; E-mail: tim\_ir@rambler.ru

**P. 61—66.****SENSING SYSTEM OF LINEAR DISPLACEMENT CONVERTER**

An algorithm is proposed to take readings from incremental optoelectronic linear displacement converter to be used in multi-coordinate machining tools. Results of experimental study are presented.

**Keywords:** linear displacements, optoelectronic encoder, incremental encoder, dashed measure.

*Data on authors*

- Nikolay V. Smirnov* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Photonics and Video Informatics; E-mail: pirate.kolyan@gmail.com
- Maria S. Lopatina* — Open Joint Stock Company “Special Design Bureau of Machine Information and Measuring Systems with a Pilot Production” (OJSC “SKB IS”), St. Petersburg; Design Engineer; E-mail: gulf\_of\_me\_90@mail.ru
- Sergey S. Mitrofanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Photonics and Video Informatics; E-mail: m1990s@mail.ru

**P. 66—69.****SHADOW IMAGE OF LINEAR GRATING AS A GEOMETRICAL MODEL OF SHEARING INTERFEROGRAM**

A fundamental analogy between classical interferogram and system of shadow image isophotes obtained by Foucault knife-edge method is discussed.

**Keywords:** shadow method, Foucault knife-edge, geometrical model of the shear cross interferogram, isophotometry, wavefront deformation.

*Data on authors*

- Marina E. Zatsepina* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: marichka\_za@list.ru
- Vladimir K. Kirillovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: vkkir@mail.ru



P. 69—71.

### PINHOLE EYEGLASSES

Construction, principle of operation of pinhole glasses, as well as therapeutic and training effects of their application are described, several modifications of the glasses are considered.

**Keywords:** accomodation, training effect, colored field perforation.

#### *Data on authors*

- Yury V. Feodorov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technology and Computer Tomography; E-mail: FedorovYV@yandex.ru
- Alexandra Yu. Feodorova* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Business and Commerce; Senior Lecturer; E-mail: AYFeodorova@gmail.com

P. 72—76.

### COMBINED APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES AND VIRTUAL SIMULATION IN POLYMER MANUFACTURE PREPRODUCTION

A typical process of mold design is analyzed with the use of virtual simulation systems. Advantages of combined application of additive technologies and virtual simulation systems are noted. The possibility to employ additive technologies in calculations performed with CAE-systems for data visualization and in mold manufacturing for plastics and metal powders.

**Keywords:** additive technologies, CAD / CAM / CAE-systems, injection molding of thermoplastic polymer materials, injection mold, silicone casting form, form-building component, conformal cooling system.

#### *Data on authors*

- Eugeny I. Yablochnikov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrumentation Technology; E-mail: eugeny@beepitron.com
- Aleksander V. Pirogov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrumentation Technology; E-mail: avpir@mail.ru
- Andrey A. Gribovsky* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrumentation Technology; E-mail: griandrey@yandex.ru