

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А.** Прогнозирование районов падения отделяемых частей ракет-носителей с учетом информации измерительных средств..... 3
- Стародубцев В. Г.** Проверочные полиномы последовательностей Гордона—Миллса—Велча... 7
- Виноградова А. А., Казначеева А. О., Мусалимов В. М.** Фрактальный анализ томограмм головного мозга ..... 14
- Леохин Ю. Л., Дворецкий И. Н.** Тенденции развития науки и техники в области производства серверного оборудования для дата-центров..... 20
- Свитенков А. И., Спельников Д. М., Маслов В. Г., Бухановский А. В.** Параллельное решение задачи Хартри—Фока для молекулы графена: масштабируемость и гиперэффективность..... 25

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Андрянов А. И., Краснов Н. А.** Нейросетевая система управления нелинейной динамикой непосредственного понижающего преобразователя напряжения..... 33
- Абдуллин А. А., Поляков Н. А.** Синтез системы фазовой автоподстройки частоты для трехфазного активного выпрямителя напряжения ..... 38
- Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватутин М. А., Кузьмичев Ю. А., Ключников А. И., Ефимов В. П.** Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра ..... 43

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Борзов С. М., Козик В. И., Феоктистов А. С.** Исследование эффективности коррекции данных тепловизионных камер..... 47
- Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И.** Методика расчета нестационарных температур космического объекта на круговых орбитах ..... 51

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Вейко В. П., Шахно Е. А., Синев Д. А.** Повышение разрешающей способности лазерной термохимической записи на тонких пленках хрома путем многократного воздействия..... 57
- Баля В. К., Денисюк И. Ю., Шекланова Е. Б., Ворзובה Н. Д.** Нерегулярная дифракционная решетка для лазерного генератора линии ..... 61

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Иванов С. В., Бухановский А. В.** Анализ неопределенности предсказательного моделирования сложных систем: усвоение данных и ансамблевые технологии ..... 66
- Плотников М. Ю., Дейнека И. Г.** Разработка блока генерации гармонических сигналов для схемы цифровой обработки информации волоконно-оптического гидрофона ..... 68
- SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) ..... 72
- УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2013 г. .... 78

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Averkiev N. F., Bulekbaev D. A.** Area Prediction of Launcher Detachable Element Fall Based on Measured Data ..... 3
- Starodubtsev V. G.** Test Polynomials of Gordon—Mills—Welch Sequences..... 7
- Vinogradova A. A., Kaznacheeva A. O., Musalimov V. M.** Fractal Analysis of Brain Tomograms ..... 14
- Leokhin Yu. L., Dvoretzky I. I.** Trends in Science and Technology Progress in the Field of Servers Manufacturing for Data Centers ..... 20
- Svitenkov A. I., Spelnikov D. M., Maslov V. G., Bukhanovsky A. V.** Parallel Solution of the Hartree—Fock Problem for Graphene Molecule: Scalability and Hyperefficiency ..... 25

### INSTRUMENTS AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Andriyanov A. I., Krasnov N. A.** Neural Network Control System of Nonlinear Dynamics of Buck Converter ..... 33
- Abdullin A. A., Polyakov N. A.** Phase Locked Loop System Synthesis for Three-Phase Active Voltage Rectifier Control System..... 38
- Luchko S. V., Baluev S. Yu., Vatutin M. A., Kuzmichev Yu. A., Klyuchnikov A. I., Efimov V. P.** Accuracy Parameters of a Nonlinear Link for Self-Oscillatory Accelerometer..... 43

### HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Borzov S. M., Kozik V. I., Feoktistov A. S.** Analysis of Efficiency of Infrared Imagers Data Correction ..... 47
- Bayova Yu. V., Lapovok E. V., Khankov S. I.** A Method for Calculation of Non-Stationary Temperature of Space Object on a Circular Orbit ..... 51

### INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Veiko V. P., Shakhno E. A., Sinev D. A.** Improvement of Laser Thermochemical Recording on Thin Chromium Films Using Repeated Processing..... 57
- Balya V. K., Denisyuk I. Yu., Shekhanova E. B., Vorzobova N. D.** Nonregular Diffraction Grating for Laser Line Generator ..... 61

### BRIEF NOTES

- Ivanov S. V., Bukhanovsky A. V.** Uncertainty Analysis of Prediction Modeling of Complex Systems: Data Understanding and Ensemble Technologies ..... 66
- Plotnikov M. Yu., Deyneka I. G.** Design of Harmonic Signal Generation Block of Digital Signal Processing Circuit in Fiber-Optic Hydrophone ..... 68

SUMMARY ..... 72

THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2013 ..... 78

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

Н. Ф. АВЕРКИЕВ, Д. А. БУЛЕКБАЕВ

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЙОНОВ ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЕМЫХ ЧАСТЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ИНФОРМАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Рассматривается задача повышения точности прогнозирования районов падения отделяемых частей ракет-носителей. Представлен метод уточнения модели движения отделяемых частей с использованием результатов измерений технических средств, располагаемых вдоль трассы запуска космического аппарата.

*Ключевые слова:* ракета-носитель, отделяемая часть, район падения, функционал, измерение.

Обеспечение безопасности вдоль трасс запусков космических аппаратов и в районах падения отделяемых частей (ОЧ) ракет-носителей является важной задачей при осуществлении космической деятельности. От ее решения зависит возможность выполнения космодромами поставленных задач по формированию орбитальных группировок космических аппаратов.

Необходимость научного сопровождения и совершенствования методического обеспечения решения баллистических задач при проведении пусков ракет-носителей определяется объективными обстоятельствами. Случаи падения фрагментов ОЧ ракет-носителей вне отведенных районов — показатель недостаточной отработки расчетных моделей прогнозирования их движения [1, 2].

Преодолеть несоответствие математических моделей движения ОЧ реальным результатам пусков позволит использование информации от измерительных средств именно на конечном участке полета, когда ОЧ входят в плотные слои атмосферы и возможно их разрушение на фрагменты. В настоящее время прорабатываются вопросы размещения на этом участке полета различных типов технических средств измерений. Получаемая информация позволит уточнить модель движения ОЧ и данные о фактических точках падения ОЧ, а также сократить время работы поисковых групп по утилизации фрагментов конструкции ракет-носителей.

Рассмотрим метод уточнения параметров движения ОЧ на основе привлечения измерений. Пусть движение ОЧ ракет-носителей описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t), \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  — вектор фазовых координат;  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$  —  $n$ -мерная вектор-функция от  $\mathbf{x}$  и времени  $t \in [t_0, t_k]$ ;  $t_0$  — время начала движения ОЧ на пассивном участке траектории;  $t_k$  — время достижения ОЧ поверхности Земли.

Воздействие возмущающих факторов, не учтенных в системе (1), приводит к отклонению траектории движения ОЧ от расчетной. Запишем математическую модель движения ОЧ ракеты-носителя для возмущенного случая [3]

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t), \quad (2)$$

где  $\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_r)^T$  — вектор возмущающих факторов;  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t)$  — функция, характеризующая влияние возмущающих факторов.

Тогда уравнения движения представим следующим образом:

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}, t), \quad (3)$$

а для конкретной реализации  $\boldsymbol{\xi}^*$ :

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}^*, t). \quad (4)$$

Отклонение возмущенной траектории от номинальной найдем из соотношения

$$\delta \mathbf{x} = \int_{t_0}^t \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tau) d\tau - \int_{t_0}^t \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}^*, \tau) d\tau = \boldsymbol{\omega}(t). \quad (5)$$

Пусть на конечном участке траектории имеются оценки вектора фазовых координат  $\hat{\mathbf{x}}(t_i)$  в моменты времени  $t_i$  ( $i = \overline{1, N}$ ), подставив полученные значения в формулу (5), получим:

$$\int_{t_0}^{t_i} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tau) d\tau - \hat{\mathbf{x}}(t_i) = \hat{\boldsymbol{\omega}}(t_i). \quad (6)$$

При оценке отклонений  $\hat{\boldsymbol{\omega}}(t_i)$  возникает методическая ошибка вследствие несоответствия математической модели реальному движению, а также из-за ошибок измерений. Исследуем отклонения в рамках линейного регрессионного анализа, для чего аппроксимируем каждую составляющую отклонения с помощью ортогональных многочленов Чебышева:

$$\omega_j(t) = \sum_{h=1}^{k_j} a_{jh} \psi_{jh}(t). \quad (7)$$

Ортогональные многочлены Чебышева при  $m \neq h$  удовлетворяют условиям

$$\sum_{i=1}^N \psi_{jm}(t_i) \psi_{jh}(t_i) = 0, \quad j = \overline{1, n}; \quad m, h = \overline{1, k_j}, \quad (8)$$

благодаря чему удобны для статистического анализа при использовании их с целью сглаживания дискретных измерений. Для них, в отличие от алгебраических многочленов, не требуется решать систему уравнений большой размерности, и появление новых измерений не требует пересчета всех коэффициентов.

Многочлены Чебышева  $\psi_{jm}(t)$  могут быть представлены следующим образом [4, 5]:

$$\psi_{jm}(t) = t^m - \frac{\sum_{i=1}^N t_i^m \psi_{j(m-1)}(t_i)}{\sum_{i=1}^N \psi_{j(m-1)}^2(t_i)} \psi_{j(m-1)}(t) - \frac{\sum_{i=1}^N t_i^m \psi_{j(m-2)}(t_i)}{\sum_{i=1}^N \psi_{j(m-2)}^2(t_i)} - \dots - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^m. \quad (9)$$

Оценочные значения коэффициентов  $\hat{a}_{jm}$  многочленов (7) получаются методом наименьших квадратов. Предположим, что измерения фазовых координат равноточные и некоррелированные, и получим для каждого  $j$  соответствующую сумму квадратов отклонений значений многочленов  $\omega_j(t)$  в точках  $t_1, t_2, \dots, t_N$ :

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{m=1}^{k_j} a_{jm} \Psi_{jm}(t_i) - \hat{\omega}_j(t_i) \right]^2. \quad (10)$$

Вычислив частные производные от сумм  $\sigma_j$  по всем параметрам  $a_{jk_1}, a_{jk_2}, \dots, a_{jk_j}$  и приравняв их к нулю, из получаемых систем уравнений найдем оценки искомых коэффициентов:

$$\hat{a}_{jm} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{\omega}_j(t_i) \Psi_{jm}(t_i)}{\sum_{i=1}^N \Psi_{jm}^2(t_i)}, \quad j = \overline{1, n}; \quad m = \overline{1, k_j}. \quad (11)$$

В итоге получим вектор  $\omega(t) = (\omega_1(t), \omega_2(t), \dots, \omega_n(t))^T$ , составленный из многочленов  $\omega_j(t)$  ( $j = \overline{1, n}$ ). Используем многочлены  $\omega(t)$  для описания движения ОЧ на конечном участке полета:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \dot{\omega}(t). \quad (12)$$

Уточненная модель движения получена для определенного состава измерительных средств и соответствующих измерений. В этой связи важным направлением исследований является разработка алгоритмов оптимального расположения измерительных средств, плана проведения измерений и соответствующих методов обработки измерительной информации. При решении данной задачи будем исходить из оценки затрат при эксплуатации районов падения (РП) ОЧ ракет-носителей.

Пусть имеется множество технических средств измерений  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_L\}$  ( $l = \overline{1, L}$ ). Предположим, что от  $l$ -го средства поступают данные измерений вектора фазовых координат  $\mathbf{x}$  в моменты времени  $t_{jl} \in [t'_i, t''_i]$  ( $j = \overline{1, M}, l = \overline{1, L}, i = \overline{1, N}$ ), получаемые с соответствующей точностью  $\sigma_l$ . Здесь  $[t'_i, t''_i]$  —  $i$ -й мерный участок,  $N$  — количество мерных участков,  $M$  — число измерений на каждом участке. После совместной обработки на каждом участке измерений от  $L$  средств получим оценки вектора координат  $\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2, \dots, \hat{\mathbf{x}}_N$ . Согласно рассмотренной выше методике можно найти многочлены  $\omega(t)$ , уточнить модель движения ОЧ и получить прогнозируемые значения координат точек падения ОЧ и их фрагментов на поверхности Земли.

Рассмотрим параметр  $C_{\text{ст}}$ , характеризующий стоимость работ поисковых групп в РП по утилизации фрагментов конструкции ракет-носителей. Стоимость работ является функцией от площади  $S$  рассеивания фрагментов в РП ОЧ и зависит от получаемых измерений координат, точности, числа измерений на мерном участке и количества самих участков. Из всех поступающих измерений необходимо выбрать такой вектор фазовых координат, при котором достигается минимум функционала

$$J = C_{\text{ст}}(\mathbf{x}, \sigma_l, M, N) \rightarrow \min_{\substack{\mathbf{x}(t_{jl}) \in X_l, \sigma_l, M, N, t_{jl} \in [t'_i, t''_i], \\ j=1, M, l=1, L, i=1, N}}. \quad (13)$$

Таким образом, сформулирована новая постановка задачи прогнозирования районов падения ОЧ. Предложен метод уточнения координат фактических точек падения ОЧ ракет-носителей и их фрагментов на основе привлечения измерительной информации о параметрах их движения на пассивном участке траектории. Метод позволяет повысить степень соответствия известных моделей движения ОЧ ракет-носителей реальным результатам пусков, получить достоверную информацию о характеристиках районов падения, а также сократить время работы поисковых групп.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куреев В. Д. Введение в теорию синтеза траекторий безопасного выведения космических аппаратов на орбиты. СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999. 111 с.
2. Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А. Задача синтеза экономичных трасс запусков космических аппаратов // Вооружение и экономика. 2012. № 5(21). С. 60—64.
3. Аверкиев Н. Ф., Яфраков М. Ф. Повышение качества управления путем настройки систем управления на действующие возмущения // „Вопросы анализа и синтеза алгоритмического и аппаратного обеспечения систем управления“: Сб. матер. науч.-техн. семинаров. МО СССР, 1983. Вып. 2. С. 93—97.
4. Жданюк Б. Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов. радио, 1978. 384 с.
5. Брандин В. Н., Разоренов Г. Н. Определение траекторий космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.

**Сведения об авторах****Николай Федорович Аверкиев**

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург;  
E-mail: averkievnf@yandex.ru

**Дастанбек Абдыкалыкович Булекбаев**

— канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра высшей математики, Санкт-Петербург; E-mail: atiman@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
навигационно-баллистического  
обеспечения применения  
космических средств и теории  
полета летательных аппаратов

Поступила в редакцию  
16.02.13 г.

В. Г. СТАРОДУБЦЕВ

**ПРОВЕРОЧНЫЕ ПОЛИНОМЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ  
ГОРДОНА—МИЛЛСА—ВЕЛЧА**

Представлен алгоритм синтеза проверочных полиномов последовательностей Гордона—Миллса—Велча, основанный на использовании структурных свойств конечных полей с двойным расширением.

**Ключевые слова:** последовательности с составным периодом, проверочные полиномы, конечные поля, неприводимые и примитивные полиномы.

Одним из перспективных направлений развития сетей мобильной связи является применение технологии многостанционного доступа с кодовым разделением каналов. Эта технология предполагает использование псевдослучайных последовательностей, обладающих требуемыми корреляционными и структурными свойствами.

В современных системах связи применяются М-последовательности (МП), последовательности Голда, малого и большого множеств Касами, последовательности Баркера, Гордона—Миллса—Велча (ГМВ) и др. [1].

Среди циклических последовательностей, обладающих одноуровневой периодической автокорреляционной функцией, можно выделить М-последовательности и ГМВ-последовательности (ГМВП). При этом последние обладают более высокой структурной скрытностью, которая численно характеризуется эквивалентной линейной сложностью (ЭЛС) [2—4]. Это свойство определяет преимущество применения ГМВП в системах связи, к которым предъявляются жесткие требования по конфиденциальности.

ГМВП формируются над конечными полями с двойным расширением вида  $GF[(p^m)^n]$ , вследствие чего период данных последовательностей является составным числом, т.е.  $N = p^{mn} - 1$ , где  $p$  — характеристика поля,  $m, n$  — натуральные числа [5]. Так как ГМВП относятся к классу циклических последовательностей, то они могут формироваться с помощью регистров сдвига с линейной обратной связью [5—7]. Для ГМВП с периодом  $N = p^{mn} - 1$  положение сумматоров в цепи обратной связи определяется коэффициентами проверочных полиномов вида

$$h_{\text{ГМВ}}(x) = x^k + h_{k-1}x^{k-1} + h_{k-2}x^{k-2} + \dots + h_1x + h_0, \quad (1)$$

где  $k$  — степень проверочного полинома, численно характеризующая ЭЛС ГМВП; коэффициенты  $h_i$ , являются элементами поля  $GF(p)$ .

Алгоритм синтеза проверочных полиномов ГМВП в литературе не приводится. Для каждой конкретной последовательности проверочный полином определяется итеративным путем, например, с помощью алгоритма Берлекемпа—Мессис.

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма синтеза проверочных полиномов ГМВ-последовательностей, основанного на использовании структурных свойств конечных полей с двойным расширением, а также составление исчерпывающих перечней проверочных полиномов двоичных ГМВП с периодами  $N = 63$  и  $255$  и троичных — с  $N = 80$ .

Разработка алгоритма выполняется на примере двоичной ГМВП с периодом  $N = 63$ , сформированной на основе М-последовательности с проверочным полиномом  $h_{\text{МП}}(x) = x^6 + x + 1$ . Символы М-последовательности записываются построчно в матрицы размерности  $[J \times S] = [7 \times 9]$ , ненулевые столбцы которой соответствуют различным сдвигам „короткой“ (характеристической) М-последовательности с периодом  $J = 7$ . Параметр  $S$  характеризует число сдвигов:

$$\mathbf{F}_{\text{МП}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

С использованием алгоритма формирования ГМВП, основанного на матричном представлении М-последовательностей с составным периодом [1, 5], формируется ГМВП с  $N = 63$ , которая также представляется в виде матрицы размерности  $[J \times S] = [7 \times 9]$ :

$$\mathbf{F}_{\text{ГМВ}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

С помощью алгоритма Берлекемпа [6, 7] для ГМВП вида (3) определяется проверочный полином

$$h_{\text{ГМВ}}(x) = x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^7 + x^2 + 1. \quad (4)$$

Этот полином является произведением неприводимых над полем  $GF(2)$  полиномов меньшей степени. Для их определения используется полный перечень неприводимых над  $GF(2)$  полиномов степени 6 и ниже, корнями которых являются элементы расширенного поля Галуа  $GF(2^6)$ . Данные полиномы, их корни, а также периоды корней представлены в табл. 1. Искомые неприводимые полиномы определяются путем последовательного деления  $h_{\text{ГМВ}}(x)$  на  $h_i(x)$ . В результате получим, что  $h_{\text{ГМВ}}(x)$  вида (4) может быть представлен в виде произведения двух полиномов  $h_{ci}(x)$  шестой степени (здесь  $ci$  —  $i$ -й сомножитель):

$$h_{\text{ГМВ}}(x) = h_{c1}(x)h_{c2}(x) = h_2(x)h_3(x) = (x^6 + x^4 + x^2 + x + 1)(x^6 + x^5 + x^2 + x + 1) \quad (5)$$

Таблица 1

Полиномы $h_i(x)$	Корни полиномов (показатели степени)	Периоды корней $\varepsilon$
$h_1(x) = x^6 + x + 1$	$\alpha^1, \alpha^2, \alpha^4, \alpha^8, \alpha^{16}, \alpha^{32}$	63
$h_2(x) = x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$	$\alpha^3, \alpha^6, \alpha^{12}, \alpha^{24}, \alpha^{48}, \alpha^{33}$	21
$h_3(x) = x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$	$\alpha^5, \alpha^{10}, \alpha^{20}, \alpha^{40}, \alpha^{17}, \alpha^{34}$	63
$h_4(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$	11, 22, 44, 25, 50, 37	63
$h_5(x) = x^6 + x^5 + 1$	31, 62, 61, 59, 55, 47	63
$h_6(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$	15, 30, 60, 57, 51, 39	21
$h_7(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$	23, 46, 29, 58, 53, 43	63
$h_8(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$	13, 26, 52, 41, 19, 38	63
$h_9(x) = x^6 + x^3 + 1$	7, 14, 28, 56, 49, 35	9
$h_{10}(x) = x^3 + x + 1$	9, 18, 36	7
$h_{11}(x) = x^3 + x^2 + 1$	27, 54, 45	7
$h_{12}(x) = x^2 + x + 1$	21, 42	3
$h_{13}(x) = x + 1$	$\alpha^0$	1

Для поля  $GF(2^6)$  можно показать, что корни полинома  $h_{c1}(x) = h_2(x)$  являются третьими степенями корней полинома  $h_{МП}(x)$ , являющегося примитивным, а корни полинома  $h_{c2}(x) = h_3(x)$  — пятью.

Алгоритм синтеза полной совокупности проверочных полиномов ГМВ-последовательностей основан на предположении о повторяемости соотношений между корнями проверочного полинома  $h_{МП}(x)$  исходной М-последовательности и корнями полиномов  $h_{c1}(x)$  и  $h_{c2}(x)$ , являющихся сомножителями проверочного полинома  $h_{ГМВ}(x)$ .

Известно [6], что для поля  $GF(2^6)$  существует шесть различных примитивных полиномов, которые могут выступать в качестве проверочных полиномов при формировании М-последовательностей. Таким образом, для шести М-последовательностей с периодом  $N=63$  можно получить шесть ГМВП и соответственно шесть проверочных полиномов двенадцатой степени.

В качестве примера сформируем проверочный полином ГМВП, основанной на М-последовательности с  $h_{МП}(x) = h_7(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$ , одним из корней которого является элемент  $\alpha^{23}$  (см. табл. 1).

Полиномы-сомножители для  $h_{ГМВ}(x) = h_{c1}(x) h_{c2}(x)$  определяются следующим образом. Исходный полином  $h_{МП}(x)$  имеет корень  $\alpha^{23}$ . Тогда одним из корней полинома  $h_{c1}(x)$  должен быть элемент  $(\alpha^{23})^3 = \alpha^{69 \bmod 63} = \alpha^6$ , что соответствует  $h_{c1}(x) = h_2(x) = x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$ .

Полином  $h_{c2}(x)$  должен иметь корень  $(\alpha^{23})^5 = \alpha^{115 \bmod 63} = \alpha^{52}$ , что соответствует  $h_{c2}(x) = h_8(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$ .

Искомый проверочный полином для ГМВ-последовательности

$$h_{ГМВ}(x) = h_2(x)h_8(x) = x^{12} + x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + 1. \tag{6}$$

Аналогичные вычисления для остальных примитивных полиномов поля  $GF(2^6)$ , являющихся проверочными для М-последовательностей, позволяют сформировать полную совокупность проверочных полиномов для ГМВ-последовательностей с периодом  $N=63$  (табл. 2).

Таблица 2

$h_{ГМВi}(x)$	Полиномы-сомножители ГМВП $h_{c1}(x) h_{c2}(x)$	Полиномы для исходных М-последовательностей
$h_{ГМВ1}(x)$	$h_2(x) h_3(x) = x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^7 + x^2 + 1$	$h_1(x) = x^6 + x + 1$
$h_{ГМВ2}(x)$	$h_6(x) h_4(x) = x^{12} + x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$	$h_3(x) = x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$
$h_{ГМВ3}(x)$	$h_2(x) h_5(x) = x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$	$h_4(x) = x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ4}(x)$	$h_6(x) h_7(x) = x^{12} + x^{10} + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1$	$h_5(x) = x^6 + x^5 + 1$
$h_{ГМВ5}(x)$	$h_2(x) h_8(x) = x^{12} + x^9 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + 1$	$h_7(x) = x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$
$h_{ГМВ6}(x)$	$h_6(x) h_1(x) = x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	$h_8(x) = x^6 + x^4 + x^3 + x + 1$

Представленный алгоритм может быть использован для формирования совокупности проверочных полиномов ГМВП в виде произведения неприводимых полиномов для произвольного поля  $GF[(p^m)^n]$ . Для полей с характеристикой  $p = 2$  число сомножителей в  $h_{ГМВ}(x)$  может быть равно двум и более. Для полей с  $p > 2$  число сомножителей больше двух.

Применимость представленного алгоритма для определения полной совокупности проверочных полиномов двоичных ГМВ-последовательностей с периодом  $N=255$  проиллюстрируем на примере ГМВП, сформированной на основе М-последовательности с проверочным полиномом  $h_{МП}(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$ . Этот полином является примитивным, т.е. его корни суть примитивные элементы поля  $GF(2^8)$ :  $\alpha, \alpha^2, \alpha^4, \alpha^8, \alpha^{16}, \alpha^{32}, \alpha^{64}, \alpha^{128}$ .

Символы М-последовательности записываются построчно в виде матрицы размерности  $[J \times S] = [15 \times 17]$ , ненулевые столбцы которой соответствуют различным сдвигам „короткой“ М-последовательности с периодом  $J = 15$ . В соответствии с алгоритмом, представленным в работе [5], ГМВП с периодом  $N = 255$  также представляется в виде матрицы размерности  $[J \times S] = [15 \times 17]$ :

$$\mathbf{F}_{\text{ГМВ}} = \begin{pmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0
 \end{pmatrix}. \tag{7}$$

С помощью алгоритма Берлекемпа [6, 7] для ГМВ-последовательности вида (7) определяется проверочный полином

$$h_{\text{ГМВ}}(x) = x^{32} + x^{31} + x^{30} + x^{29} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{20} + x^{18} + x^{17} + x^{15} + x^{14} + x^{13} + x^{12} + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1, \tag{8}$$

являющийся произведением неприводимых над полем  $GF(2)$  полиномов степени 8 и менее (табл. 3).

В результате разложения на множители полином  $h_{\text{ГМВ}}(x)$  вида (8) может быть представлен произведением четырех полиномов восьмой степени:

$$\begin{aligned}
 h_{\text{ГМВ}}(x) &= h_{c1}(x) h_{c2}(x) h_{c3}(x) h_{c4}(x) = h_4(x) h_6(x) h_7(x) h_{15}(x) = \\
 &= (x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + 1)(x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^2 + x + 1) \times \\
 &\times (x^8 + x^5 + x^3 + x + 1)(x^8 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Таблица 3

№ прямого/сопряженного полинома	Полиномы $h_i(x)$	Корни полиномов (показатели степени)	Периоды корней
1/20	$h_1(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	$\alpha^1, \alpha^2, \alpha^4, \alpha^8, \alpha^{16}, \alpha^{32}, \alpha^{64}, \alpha^{128}$	255
2/21	$h_2(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + x + 1$	$\alpha^3, \alpha^6, \alpha^{12}, \alpha^{24}, \alpha^{48}, \alpha^{96}, \alpha^{192}, \alpha^{129}$	85
3/22	$h_3(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x + 1$	$\alpha^5, \alpha^{10}, \alpha^{20}, \alpha^{40}, \alpha^{80}, \alpha^{160}, \alpha^{65}, \alpha^{130}$	51
4/23	$h_4(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$	7,14,28,56,112,224,193,131	255
5/24	$h_5(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	9,18,36,72,144,33,66,132	85
6/25	$h_6(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$	11,22,44,88,176,97,194,133	255
7/26	$h_7(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x + 1$	13,26,52,104,208,161,67,134	255
8/8	$h_8(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + x + 1$	15,30,60,120,240,225,195,135	17
9/27	$h_9(x) = x^4 + x + 1$	17,34,68,136	15
10/28	$h_{10}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + 1$	19,38,76,152,49,98,196,137	255
11/29	$h_{11}(x) = x^8 + x^7 + x^3 + x + 1$	21,42,84,168,81,162,69,138	85
12/30	$h_{12}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x + 1$	23,46,92,184,113,226,197,139	255
13/31	$h_{13}(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$	25,50,100,200,145,35,70,140	51
14/32	$h_{14}(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	27,54,108,216,177,99,198,141	85
15/33	$h_{15}(x) = x^8 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	37,74,148,41,82,164,73,146	255
16/34	$h_{16}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x + 1$	43,86,172,89,178,101,202,149	255
17/17	$h_{17}(x) = x^8 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$	45,90,180,105,210,165,75,150	17

Продолжение таблицы 3

№ прямого/ сопряженного полинома	Полиномы $h_i(x)$	Корни полиномов (показатели степени)	Периоды корней
18/18	$h_{18}(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	51,102,204,153	5
19/19	$h_{19}(x) = x^2 + x + 1$	85,170	3
20/1	$h_{20}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + 1$	127,254,253,251,247,239,223,191	255
21/2	$h_{21}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$	63,126,252,249,243,231,207,159	85
22/3	$h_{22}(x) = x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	95,190,125,250,245,235,215,175	51
23/4	$h_{23}(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$	31,62,124,248,241,227,199,143	255
24/5	$h_{24}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1$	111,222,189,123,246,237,219,183	85
25/6	$h_{25}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1$	61,122,244,233,211,167,79,158	255
26/7	$h_{26}(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + 1$	47,94,188,121,242,229,203,151	255
27/9	$h_{27}(x) = x^4 + x^3 + 1$	119,238,221,187	15
28/10	$h_{28}(x) = x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$	59,118,236,217,179,103,206,157	255
29/11	$h_{29}(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x + 1$	87,174,93,186,117,234,213,171	85
30/12	$h_{30}(x) = x^8 + x^7 + x^3 + x^2 + 1$	29,58,116,232,209,163,71,142	255
31/13	$h_{31}(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + 1$	55,110,220,185,115,230,205,155	51
32/14	$h_{32}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$	39,78,156,57,114,228,201,147	85
33/15	$h_{33}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$	91,182,109,218,181,107,214,173	255
34/16	$h_{34}(x) = x^8 + x^7 + x^2 + x + 1$	53,106,212,169,83,166,77,154	255
35/35	$h_{35}(x) = x + 1$	$\alpha^0$	1

Корнями с наименьшими показателями степени полиномов-сомножителей являются элементы поля  $GF(2^8)$ : для  $h_4(x)$  – элемент  $\alpha^7$ , для  $h_6(x)$  — элемент  $\alpha^{11}$ ,  $h_7(x)$  —  $\alpha^{13}$ ,  $h_{15}(x)$  —  $\alpha^{37}$ .

Таким образом, корни полиномов-сомножителей проверочного полинома ГМВ-последовательности являются соответственно 7-й, 11-й, 13-й и 37-й степенью корней проверочного полинома исходной М-последовательности.

Для поля  $GF(2^8)$  существует шестнадцать различных примитивных полиномов (см. табл. 3). С помощью разработанного алгоритма синтеза можно сформировать полную совокупность из шестнадцати проверочных полиномов для ГМВ-последовательностей с  $N=255$ . Проведем вычисления, используя данные табл. 3.

Полином  $h_{ГМВ1}(x) = h_4(x)h_6(x)h_7(x)h_{15}(x)$  определяется в соответствии с (9). Полином  $h_{ГМВ2}(x)$  определяется через  $h_{М1}(x) = h_4(x)$ , имеющий корень  $\alpha^7$ . Тогда одним из корней полинома  $h_{c1}(x)$  должен быть элемент  $\alpha^{7 \cdot 7} = \alpha^{49}$ , что соответствует  $h_{10}(x)$ . Полином  $h_{c2}(x)$  должен иметь корень  $\alpha^{7 \cdot 11} = \alpha^{77}$ , что соответствует  $h_{34}(x)$ , полином  $h_{c3}(x)$  должен иметь корень  $\alpha^{7 \cdot 13} = \alpha^{91}$ , что соответствует  $h_{33}(x)$ , полином  $h_{c4}(x)$  должен иметь корень  $\alpha^{7 \cdot 37 \bmod 255} = \alpha^4$ , что соответствует  $h_1(x)$ .

Остальные полиномы вычисляются аналогичным образом. Искомые проверочные полиномы тридцать второй степени для шестнадцати ГМВП приведены в табл. 4, также приведены проверочные полиномы для исходных М-последовательностей.

Таблица 4

$h_{ГМВi}(x)$	Полиномы-сомножители ГМВП $h_{c1}(x) h_{c2}(x) h_{c3}(x) h_{c4}(x)$	Проверочные полиномы для исходных М-последовательностей
$h_{ГМВ1}(x)$	$h_4(x) h_6(x) h_7(x) h_{15}(x)$	$h_1(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ2}(x)$	$h_{10}(x) h_{34}(x) h_{33}(x) h_1(x)$	$h_4(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^3 + 1$
$h_{ГМВ3}(x)$	$h_{34}(x) h_{26}(x) h_{23}(x) h_{10}(x)$	$h_6(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^2 + x + 1$
$h_{ГМВ4}(x)$	$h_{33}(x) h_{23}(x) h_{34}(x) h_{12}(x)$	$h_7(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x + 1$
$h_{ГМВ5}(x)$	$h_6(x) h_{30}(x) h_{20}(x) h_4(x)$	$h_{10}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ6}(x)$	$h_7(x) h_{20}(x) h_6(x) h_{16}(x)$	$h_{12}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x + 1$
$h_{ГМВ7}(x)$	$h_1(x) h_{10}(x) h_{12}(x) h_{26}(x)$	$h_{15}(x) = x^8 + x^6 + x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$
$h_{ГМВ8}(x)$	$h_{12}(x) h_{33}(x) h_{10}(x) h_{25}(x)$	$h_{16}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x + 1$
$h_{ГМВ9}(x)$	$h_{23}(x) h_{25}(x) h_{26}(x) h_{33}(x)$	$h_{20}(x) = x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + 1$
$h_{ГМВ10}(x)$	$h_{28}(x) h_{16}(x) h_{15}(x) h_{20}(x)$	$h_{23}(x) = x^8 + x^5 + x^3 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ11}(x)$	$h_{16}(x) h_7(x) h_4(x) h_{28}(x)$	$h_{25}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^3 + x^2 + x + 1$

Продолжение таблицы 4

$h_{ГМВ_i}(x)$	Полиномы-сомножители ГМВП $h_{c_1}(x) h_{c_2}(x) h_{c_3}(x) h_{c_4}(x)$	Проверочные полиномы для исходных М-последовательностей
$h_{ГМВ_{12}}(x)$	$h_{15}(x) h_4(x) h_{16}(x) h_{30}(x)$	$h_{26}(x) = x^8 + x^7 + x^5 + x^3 + 1$
$h_{ГМВ_{13}}(x)$	$h_{25}(x) h_{12}(x) h_1(x) h_{23}(x)$	$h_{28}(x) = x^8 + x^6 + x^3 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ_{14}}(x)$	$h_{26}(x) h_1(x) h_{25}(x) h_{34}(x)$	$h_{30}(x) = x^8 + x^7 + x^3 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ_{15}}(x)$	$h_{20}(x) h_{28}(x) h_{30}(x) h_7(x)$	$h_{33}(x) = x^8 + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^2 + 1$
$h_{ГМВ_{16}}(x)$	$h_{30}(x) h_{15}(x) h_{28}(x) h_6(x)$	$h_{34}(x) = x^8 + x^7 + x^2 + x + 1$

Разработанный алгоритм может быть использован для определения совокупности проверочных полиномов не только двоичных, но и „ $p$ “-ичных ГМВ-последовательностей. Для троичных последовательностей с периодом  $N=80$  вычисления проведем на примере ГМВП, сформированной на основе М-последовательности с полиномом  $h_{МП}(x) = x^4 + 2x^3 + 2$ , корни которого – суть примитивные элементы поля  $GF(3^4)$ :  $\alpha, \alpha^3, \alpha^9, \alpha^{27}$ .

Троичная ГМВП с  $N=80$  представляется в виде матрицы

$$F_{ГМВ} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Проверочный полином определяется по алгоритму Берлекемпа

$$h_{ГМВ}(x) = x^{12} + x^{11} + x^8 + 2x^7 + 2x^6 + x^4 + 2x^2 + x + 2. \quad (11)$$

Полином (11) является произведением неприводимых над полем  $GF(3)$  полиномов степени 4 и менее (табл. 5).

Таблица 5

№ прямого/ сопряженного полинома	Полиномы $h_i(x)$	Корни полиномов (показатели степени)	Периоды корней
1/5	$h_1(x) = x^4 + 2x^3 + 2$	$\alpha^1, \alpha^3, \alpha^9, \alpha^{27}$	80
2/6	$h_2(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 2x + 2$	$\alpha^7, \alpha^{21}, \alpha^{63}, \alpha^{29}$	80
3/7	$h_3(x) = x^4 + 2x^3 + 2x^2 + x + 2$	$\alpha^{11}, \alpha^{33}, \alpha^{19}, \alpha^{57}$	80
4/8	$h_4(x) = x^4 + 2x + 2$	13, 39, 37, 31	80
5/1	$h_5(x) = x^4 + x + 2$	53, 79, 77, 71	80
6/2	$h_6(x) = x^4 + x^3 + 2x^2 + 2x + 2$	17, 51, 73, 59	80
7/3	$h_7(x) = x^4 + 2x^3 + x^2 + x + 2$	23, 69, 47, 61	80
8/4	$h_8(x) = x^4 + x^3 + 2$	41, 43, 49, 67	80
9/10	$h_9(x) = x^4 + 2x^2 + 2$	5, 15, 45, 55	16
10/9	$h_{10}(x) = x^4 + x^2 + 2$	25, 75, 65, 35	16
11/12	$h_{11}(x) = x^4 + 2x^3 + x^2 + 1$	2, 6, 18, 54	40
12/11	$h_{12}(x) = x^4 + x^2 + 2x + 1$	26, 78, 74, 62	40
13/14	$h_{13}(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$	14, 42, 46, 58	40
14/13	$h_{14}(x) = x^4 + x^2 + x + 1$	22, 66, 38, 34	40
15/16	$h_{15}(x) = x^4 + x^3 + 2x + 1$	4, 12, 36, 28	20
16/15	$h_{16}(x) = x^4 + 2x^3 + x + 1$	44, 52, 68, 76	20
17/17	$h_{17}(x) = x^4 + 2x^3 + x^2 + 2x + 1$	8, 24, 72, 56	10
18/19	$h_{18}(x) = x^2 + 2x + 2$	10, 30	8

Продолжение таблицы 5

№ прямого/ сопряженного полинома	Полиномы $h_i(x)$	Корни полиномов (показатели степени)	Периоды корней
19/18	$h_{19}(x) = x^2 + x + 2$	50, 70	8
20/20	$h_{20}(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$	16, 48, 64, 32	5
21/21	$h_{21}(x) = x^2 + 1$	$\alpha^{20}, \alpha^{60}$	4
22/23	$h_{22}(x) = x + 1$	$\alpha^{40} = 2$	2
23/22	$h_{23}(x) = x + 2$	$\alpha^{80} = \alpha^0 = 1$	1

В результате разложения на множители полином  $h_{ГМВ}(x)$  вида (11) может быть представлен в виде

$$h_{ГМВ}(x) = h_{c1}(x) h_{c2}(x) h_{c3}(x) = h_2(x) h_4(x) h_9(x) = (x^4 + x^3 + x^2 + 2x + 2)(x^4 + 2x + 2)(x^4 + 2x^2 + 2). \tag{12}$$

Корнями с наименьшими показателями степени полиномов-сомножителей являются элементы поля  $GF(3^4)$ : для  $h_2(x)$  — элемент  $\alpha^7$ ,  $h_4(x)$  —  $\alpha^{13}$ ,  $h_9(x)$  —  $\alpha^5$ .

Таким образом, корни полиномов-сомножителей проверочного полинома ГМВП являются соответственно 7-й, 13-й и 5-й степенью корней проверочного полинома исходной М-последовательности.

Определим проверочный полином  $h_{ГМВ}(x)$  для троичной ГМВП, формируемой на основе МП с полиномом  $h_{МП}(x) = h_8(x) = x^4 + x^3 + 2$ , одним из корней которого является элемент  $\alpha^{41}$ .

Полиномы-сомножители для  $h_{ГМВ}(x) = h_{c1}(x) h_{c2}(x) h_{c3}(x)$  определяются следующим образом. Исходный полином  $h_{МП}(x)$  имеет корень  $\alpha^{41}$ . Одним из корней полинома  $h_{c1}(x)$  должен быть элемент  $\alpha^{41 \cdot 7} = \alpha^{287 \bmod 80} = \alpha^{47}$ , что соответствует  $h_7(x) = x^4 + 2x^3 + x^2 + x + 2$ . Полином  $h_{c2}(x)$  должен иметь корень  $\alpha^{41 \cdot 13} = \alpha^{533 \bmod 80} = \alpha^{53}$ , что соответствует  $h_5(x) = x^4 + x + 2$ .

Полином  $h_{c3}(x)$  должен иметь корень  $\alpha^{41 \cdot 5} = \alpha^{205 \bmod 80} = \alpha^{45}$ , что соответствует  $h_9(x) = x^4 + 2x^2 + 2$ .

Полином  $h_{ГМВ}(x)$ , являющийся произведением трех полиномов, имеет следующий вид:

$$h_{ГМВ}(x) = h_{c1}(x) h_{c2}(x) h_{c3}(x) = h_7(x) h_5(x) h_9(x) = x^{12} + 2x^{11} + x^8 + x^7 + 2x^6 + x^4 + 2x^2 + 2x + 2. \tag{13}$$

Выбрав в табл. 5 в качестве проверочных для исходных М-последовательностей восемь примитивных полиномов в поле  $GF(3^4)$ , можно сформировать восемь проверочных полиномов для ГМВ-последовательностей. Результаты вычислений представлены в табл. 6.

Таблица 6

$h_{ГМВi}(x)$	Полиномы-сомножители ГМВП $h_{c1}(x) h_{c2}(x) h_{c3}(x)$	Проверочные полиномы для исходной МП
$h_{ГМВ1}(x)$	$h_2(x) h_4(x) h_9(x)$	$h_1(x) = x^4 + 2x^3 + 2$
$h_{ГМВ2}(x)$	$h_8(x) h_3(x) h_{10}(x)$	$h_2(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 2x + 2$
$h_{ГМВ3}(x)$	$h_5(x) h_2(x) h_9(x)$	$h_3(x) = x^4 + 2x^3 + 2x^2 + x + 2$
$h_{ГМВ4}(x)$	$h_3(x) h_1(x) h_{10}(x)$	$h_4(x) = x^4 + 2x + 2$
$h_{ГМВ5}(x)$	$h_6(x) h_8(x) h_{10}(x)$	$h_5(x) = x^4 + x + 2$
$h_{ГМВ6}(x)$	$h_4(x) h_7(x) h_9(x)$	$h_6(x) = x^4 + x^3 + 2x^2 + 2x + 2$
$h_{ГМВ7}(x)$	$h_1(x) h_6(x) h_{10}(x)$	$h_7(x) = x^4 + 2x^3 + x^2 + x + 2$
$h_{ГМВ8}(x)$	$h_7(x) h_5(x) h_9(x)$	$h_8(x) = x^4 + x^3 + 2$

Таким образом, в статье разработан алгоритм формирования проверочных полиномов как двоичных, так и недвоичных ГМВ-последовательностей. Представлены полные совокупности проверочных полиномов для двоичных ГМВ-последовательностей с периодами  $N=63$  и  $255$  и для троичных ГМВП с  $N=80$ .

Данные проверочные полиномы могут быть использованы при разработке устройств формирования ГМВП, основанных на регистрах сдвига с линейными обратными связями.

Также представленный алгоритм может найти применение при разработке методов формирования псевдослучайных последовательностей, допускающих аналитическое представление в конечных полях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдачев С. С., Калмыков В. В. Ансамбли последовательностей ГМВ для систем с кодовым разделением каналов // „Наука и образование: электронное научно-техническое издание“. 2012. № 1. <<http://technomag.edu.ru/issue/264798.html>>.
2. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
3. Ипатов В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами. М.: Радио и связь, 1992. 152 с.
4. Свердлик М. Б. Оптимальные дискретные сигналы. М.: Сов. радио, 1975. 200 с.
5. Стародубцев В. Г. Алгоритм формирования последовательностей Гордона-Миллса-Велча // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 7. С. 5—9.
6. Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки / Под ред. Р. Л. Добрушина и С. И. Самойленко. М.: Мир, 1976. 596 с.
7. Стародубцев В. Г., Павлов О. А. Помехоустойчивые коды в телекоммуникационных и информационных системах. Вып. 1. Конечные поля Галуа: элементы теории и практики: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2003. 252 с.

#### Сведения об авторе

**Виктор Геннадьевич Стародубцев** — канд. техн. наук, доцент; ООО „Мультисервисные сети и Телекоммуникации“, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра беспроводных телекоммуникаций; E-mail: [vgstarod@mail.ru](mailto:vgstarod@mail.ru)

Рекомендована кафедрой  
беспроводных телекоммуникаций НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
20.12.12 г.

УДК 620.178

А. А. ВИНОГРАДОВА, А. О. КАЗНАЧЕЕВА, В. М. МУСАЛИМОВ

### ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОМОГРАММ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Исследованы возможности применения фрактального анализа для оценки структуры объектов. Представлены результаты расчета показателя Херста для магнитно-резонансных томограмм головного мозга, вычислены параметры распределений, выполнена оценка вероятности попадания в доверительные интервалы. Проведено стохастическое моделирование для нормального и равномерного законов распределения, проанализированы особенности показателя Херста и возможность использования его в качестве диагностического показателя.

**Ключевые слова:** показатель Херста, фрактальный анализ, томография, распределение, моделирование.

**Введение.** Качество получаемых в клинической практике магнитно-резонансных томограмм и оценка диагностических признаков выполняются визуально на основе экспертной оценки. Субъективность восприятия изображений и сложность анализируемых структур

делают актуальным поиск универсальных количественных оценок. Фрактальный анализ используется в задачах анализа сигналов различной природы [1—6], в том числе в рентгеновских и оптических методах [7—8]. Ряд анатомических структур также характеризуется фрактальными свойствами (например, артерии головного мозга, легкие, граница белого вещества и коры головного мозга), проявляющимся на изображениях различной модальности, в том числе магнитно-резонансных томограммах. В большинстве работ используется фрактальный подход для решения частных задач: оценки микроструктурных изменений [9, 10], снижения зашумленности данных [11, 12], анализа функций организма [13, 14]. Цель настоящей работы — исследование возможностей использования фрактальных оценок для анализа структур головного мозга и получения новой диагностической информации.

Многие изображения и сигналы характеризуются полной или случайной повторяемостью в различных масштабах. Для их анализа целесообразно использовать фрактальную размерность  $D$  (размерность Хаусдорфа), позволяющую оценить сохраняемость геометрии или статистических характеристик при изменении масштаба. Для двумерного сигнала фрактальная размерность связана с показателем Херста  $H$  как  $D = 2 - H$ , где значение  $H$  определяется эмпирически [2]:

$$R / S = (\alpha N)^H, \quad (1)$$

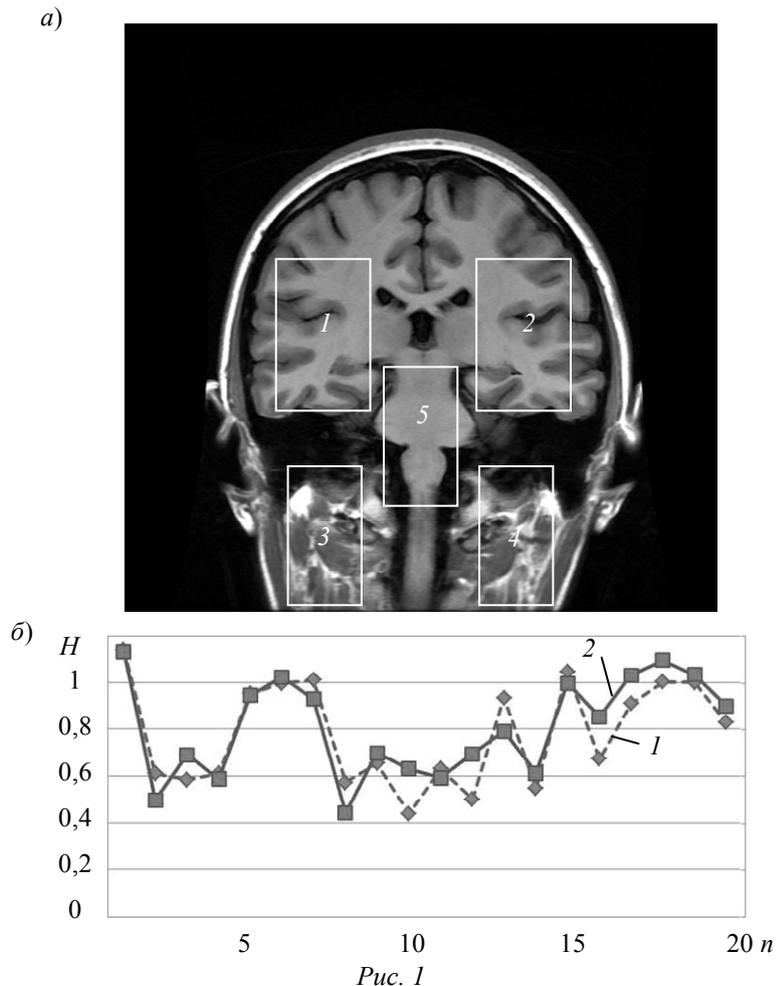
где  $R$  — размах вариации;  $S$  — стандартное отклонение;  $N$  — длина выборки;  $\alpha$  — постоянная.

Параметры самоподобия  $H$  и  $D$  характеризуют устойчивость статистического явления, или долгосрочную зависимость стохастического процесса. Для большинства сигналов  $0 < H < 1$ . В случае  $H=0,5$  свойства самоподобия процесса отсутствуют и корреляции между событиями нет; при  $H>0,5$  устойчивость процесса выше среднего, и он является самоподобным (фрактальным). Чем ближе показатель Херста к единице, тем более выражены фрактальные свойства и для самоподобных процессов с долгосрочной зависимостью  $0,7 < H < 0,9$ . При  $H < 0,5$  ряд более изменчив, чем случайный, поскольку состоит из частых циклов „спад—подъем“.

**Расчет показателя Херста для некоторых областей томограмм головного мозга.** Анализируемые МР-томограммы головного мозга получены на томографе Signa HDx с полем 3 Тл (General Electric). Все изображения получены в корональной плоскости при помощи импульсной последовательности с подавлением сигнала от ликвора (FLAIR). Протокол исследования: время появления эхо-сигнала  $TE=11$  мс; время повторения импульсов  $TR=3300$  мс; ширина полосы пропускания 32 кГц; число усреднений данных  $NEX = 1$ ; матрица  $448 \times 224$ ; поле сканирования 220 мм; толщина среза 5 мм. Экспериментальные данные в формате DICOM 3.0 получены для 20 здоровых добровольцев. С целью сохранения всего объема экспериментальной информации (в том числе интенсивности сигнала и сведений об условиях измерений) конвертация форматов не выполнялась.

Значения показателя Херста и фрактальной размерности рассчитаны в пакете Fractan для исходной матрицы изображения. На рис. 1, *a* приведены анализируемые области: левый (1) и правый (2) гиппокампы, область мягких тканей шеи слева (3) и справа (4), область ствола (5). Матрица фрагментов томограмм трансформировалась к одномерной выборке путем суммирования элементов матриц по строкам [4]. Все изображения содержат случайный шум, включающий аппаратную, вычислительную и физиологическую (вызванную пульсацией в организме жидкостей — кровь, ликвор) составляющие [11].

Для анализируемых областей выполнялась оценка разброса рассчитанных показателей Херста (рис. 1, *б*). Во всех случаях разность полученных показателей Херста областей 1 и 2 превышает  $\Delta H$  для областей 3 и 4, что может объясняться наличием пульсирующих сосудов в плоскости среза. Структуры в области 5 относительно симметричны и однородны, что может объяснить узкий диапазон рассчитанных значений  $H$ .



Можно предположить: чем ближе значения показателей Херста областей 1 и 2, тем симметричней полушария головного мозга. Разность рассчитанных показателей некоторых пациентов ( $n$ ) существенна, однако это может быть проявлением как структурных изменений, так и погрешности измерений. Диапазон рассчитанных показателей для области 1 составил 0,44—1,04, для 2 — 0,44—1,13, для 3 — 0,44—1,04, для 4 — 0,53—0,87, для 5 — 0,5—1,03. Результаты, находящиеся ближе к единице, показывают наличие устойчивости и самоподобия. В других случаях имеется либо слабо выраженная фрактальность, либо трендонеустойчивость, связанная с зашумленностью изображений.

Анализ областей 3 и 4 различных пациентов показал более близкие значения показателя Херста, что объясняется большим размером анализируемых структур и их однородностью.

Вариации рассчитанных оценок определяются не только асимметричностью головного мозга пациента, но и углом среза. В некоторых случаях срезы заложены несимметрично относительно исследуемых структур, что вызвано субъективностью восприятия изображения оператором и усложняет дальнейший выбор области анализа и сравнение характеристик для двух полушарий. Результат фрактальной оценки также существенно зависит от размера выбранной для анализа области.

**Стохастический анализ полученных результатов.** Оценим математическое ожидание и дисперсию полученных показателей Херста. Моделирование осуществлялось в пакете MatLab с использованием гипотез о распределении данных по нормальному и равномерному законам распределения. Математическое ожидание  $M$  вычисляется по формуле:

$$M(x) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i, \quad (2)$$

где  $x_i$  — случайная величина,  $p_i$  — статистическая вероятность.

Среднее квадратическое отклонение имеет вид:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3)$$

где  $\bar{x}$  — среднее значение случайной величины.

В таблице приведены вычисленные значения  $M$  и  $\sigma$  для разных областей, а также указаны минимальное ( $a$ ) и максимальное ( $b$ ) значения для случая равномерного распределения.

Анализируемая область	$M$	$\sigma$	$a$	$b$	Вероятность попадания в интервал		
					(0 0,5]	(0,5 1]	(1 1,5)
1	0,7634	0,2072	0,4406	1,0480	0,0982	0,7420	0,1591
2	0,8090	0,2115	0,4446	1,1330	0,0719	0,7449	0,1826
3	0,6875	0,1317	0,4415	1,0421	0,0772	0,9139	0,0088
4	0,7075	0,0968	0,5330	0,8704	0,0161	0,9827	0,0013
5	0,7929	0,1234	0,4992	1,0271	0,0088	0,9446	0,0466

Данные, полученные в результате расчетов, были использованы при стохастическом моделировании для всех анализируемых областей (рис. 2, а). Полученные зависимости показывают, что в случае равномерного распределения диапазон значений показателя Херста (рис. 2, в) будет меньше, чем при нормальном законе распределения (рис. 2, б). Также во втором случае будет присутствовать больше результатов, свидетельствующих о случайности процессов ( $H < 0,5$ ).

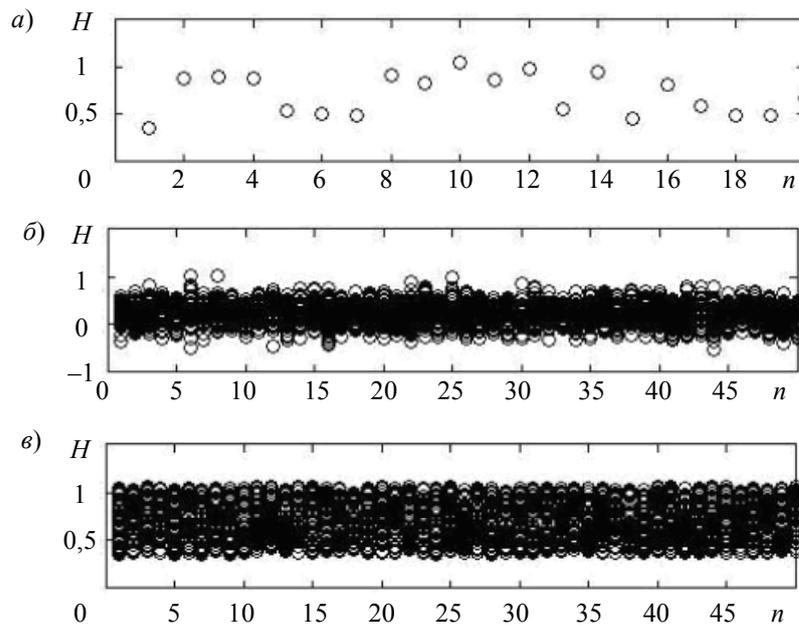
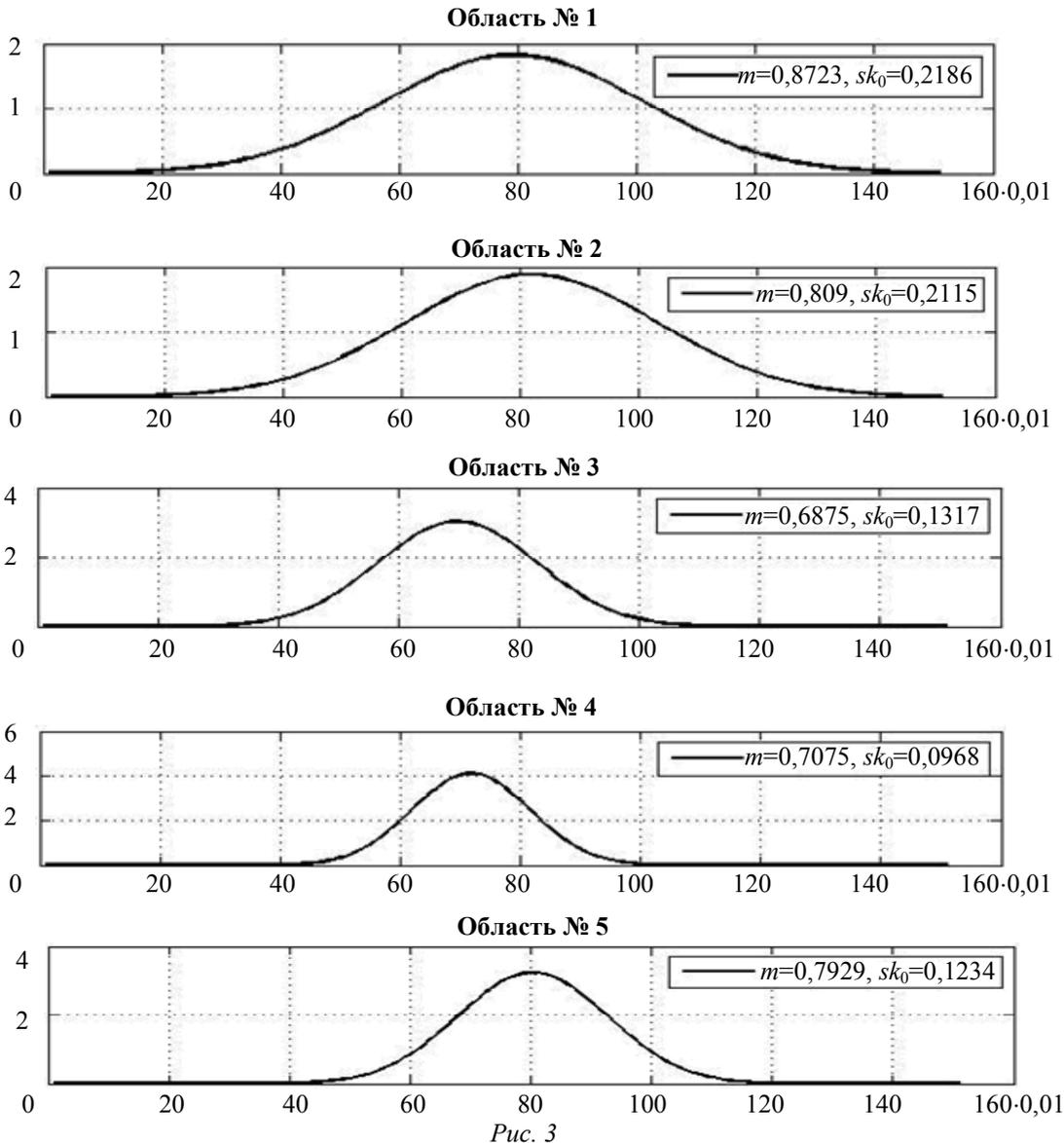


Рис. 2

Для всех рассмотренных областей характерно нахождение математического ожидания в пределах  $0,5 < M < 1$ . Отсюда следует, что для здоровых добровольцев это — зона устойчивых статистических признаков применительно к показателю  $H$ . Вероятность попадания в диапазон  $(0,5—1)$  по статистике достаточно велика (более 75 %) и существенно превышает вероятность попадания показателя Херста в диапазон  $(0—0,5)$ , не превышающую 10%. В то же время можно предположить, что для пациентов с анатомической асимметрией структур картина будет противоположной. В определенной степени это согласуется с исследованиями авторов [14], которые показали, что для крыс с эпилепсией рассчитанное значение меньше 0,5, а для здоровых животных  $H > 0,5$ . Можно надеяться, что для людей сохранится такая же

зависимость. И более того, сам показатель Херста может быть использован в качестве значимого диагностического параметра.

Вероятность попадания рассчитанных показателей в трендонеустойчивую зону для здоровых пациентов менее 10 %. Вероятность в случае, когда  $H > 1$ , может составлять, по полученным данным, до 18 %. Результат моделирования плотности вероятности (рис. 3) показывает близость средних значений для областей 1, 2 и 5, однако для структур гиппокампов дисперсия показателей будет существенно больше. Для более однородных областей 3 и 4 средние значения также будут близкими.



**Заключение.** Фрактальная природа различных биологических структур и характер измерений в МР-томографии позволяют использовать количественные фрактальные оценки для анализа отображаемых тканей. При анализе МР-томограмм головного мозга здоровых пациентов выявлено, что зона устойчивых статистических признаков с точки зрения показателя Херста  $H$  находится в пределах  $0,5 < M < 1$ . Для пациентов с наличием структурных изменений ожидается противоположная вероятность попадания в упомянутые зоны. В настоящей работе предпочтение при анализе отдавалось нормальному закону распределения, полученные результаты согласуются с исследованиями, выполненными другими авторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов О. И., Нагорная М. Ю. Показатель Херста биоэлектрических сигналов // Инфокоммуникационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 75—77.
2. Бортников А. Ю., Минакова Н. Н. Текстурно-фрактальный анализ микроскопических срезов образцов композиционных материалов, наполненных техническим углеродом // Изв. Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 6. С. 64—67.
3. Виноградова А. А., Мазурова У. С. Фрактализация одномерных объектов // V Сессия научной школы „Проблемы механики и точности в приборостроении“. 2012. С. 24—30.
4. Коваленко П. П., Мусалимов В. М. Прямая и обратная задачи паттернизации сигналов и изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 38—45.
5. Окунев В. В., Потапов А. С. Оптимизация разбиения изображения в форме квадродерева по критерию минимальной длины описания во фрактальном сжатии // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 3 (73). С. 34—39.
6. Потапов А. А., Герман В. А. Современные методы экспериментальных исследований фрактальных объектов и физических процессов // Сб. статей „Синергетика геосистем“. М.: ИГЕМ РАН, 2007. С. 134—141.
7. Гуров И. П., Киракозов А. Х. Анализ методов обработки интерферометрических данных в спектральной оптической когерентной томографии // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 21—24.
8. Кривых А. В., Сизиков В. С. Обработка дискретных спектров с помощью алгоритма интегральной аппроксимации // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75). С. 14—18.
9. Молчатский С. Л., Молчатская В. Ф. Фрактальный анализ структуры вентромедиального ядра гипоталамуса мозга человека в пре- и постнатальном онтогенезе // Новые исследования. 2010. Т. 1, № 24. С. 60—67.
10. Трофимова А. В., Гайкова О. Н., Ананьева Н. И. и др. Периваскулярные пространства: морфология, нейровизуализация, атипичные варианты // Лучевая диагностика и терапия. 2011. № 2. С. 37—44.
11. Казначеева А. О. Фрактальный анализ зашумленности магнитно-резонансных томограмм // Альманах современной науки и образования. 2013. № 2. С. 73—76.
12. Казначеева А. О. Разработка методов и средств шумоподавления в томографии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2006. 19 с.
13. Гаязова Н. Т., Зарипов Р. Р. Стохастическая оценка скорости патологического тремора человека с помощью показателя Херста // Филология и культура = Philology and Culture. 2008. № 15. С. 18—20.
14. López T., Manjarrez J., Plascencia N. et. al. Fractal analysis of EEG signals in the brain of epileptic rats, with and without biocompatible implanted neuroreservoirs // Applied Mechanics and Materials. 2009. Vol. 15. P. 127—136.

**Сведения об авторах**

- Алла Алексеевна Виноградова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: vinogradova\_a@list.ru
- Анна Олеговна Казначеева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии; E-mail: a\_kazn@mail.ru
- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; заведующий кафедрой E-mail: musvm@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
01.03.13 г.

Ю. Л. ЛЕОХИН, И. Н. ДВОРЕЦКИЙ

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА СЕРВЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДАТА-ЦЕНТРОВ

Проанализирован рынок серверного оборудования, на примере крупнейших производителей серверного оборудования проведен сравнительный анализ характеристик серверов. Определены основные тенденции развития науки и техники в области производства серверного оборудования для дата-центров.

*Ключевые слова:* сервер, процессор, технологи, программное обеспечение, блейд-сервер, энергоэффективность.

Производство серверов для центров обработки данных (ЦОД) — высокоспециализированная область, использующая последние достижения микроэлектроники и компьютерной техники. Для выявления ее тенденций требуется анализ рынка оборудования и характеристик серверов; выполним его на примере крупнейших производителей серверного оборудования — IBM, Dell и HP, занимающих 75 % всего серверного рынка мира [1].

Рассмотрим классы серверного оборудования, выпускаемого ведущими мировыми компаниями. HP производит серверы базе x86 процессоров Intel Xeon и AMD Opteron: настольные серверы серии HP ProLiant ML, серверы для монтажа в стойку серии DL и сверхплотные блейд-серверы, а также серверы семейства HP Integrity на базе процессоров Intel Itanium. Серверы HP Integrity оптимизированы под технологии виртуализации и масштабирования бизнес-задач, они могут работать в гетерогенных мультиоперационных средах (Windows, Linux, OpenVMS) [2].

Dell ориентирована на производство серверов семейства PowerEdge различных конфигураций: настольные в корпусах Tower, серверы для монтажа в стойку и блейд-серверы. Серверы Dell предусматривают возможность установки до 4 процессоров с числом ядер до 12 в каждом, таких как Intel Xeon и AMD Opteron [3].

Компания IBM производит мейнфреймы и блейд-серверы на базе процессоров Intel, AMD и собственных процессоров Power. Системы на базе процессоров Power7 (PS700, PS701 и PS702 Express) представляют собой хорошо масштабирующуюся интегрированную платформу с технологией оптимизации энергопотребления EnergyScale. Кроме того, IBM производит серверы на базе процессоров Intel Xeon и AMD Opteron [4].

Подразделение Sun Microsystems компании Oracle для производства серверов использует собственные процессоры семейства SPARC, а также серверы на двух- и четырехъядерных процессорах Intel Xeon и AMD Opteron. Передовое решение компании — сервер Sun SPARC Enterprise T5120, позволяющий сократить затраты энергии в два раза, при этом занимая в четыре раза меньшую, по сравнению с традиционными решениями, площадь. Сервер построен на 8-ядерном процессоре UltraSPARC T2 System on a Chip и поддерживает обработку до 64 потоков (тредов) на процессор, он имеет компактный форм-фактор 1RU, позволяющий учесть ограничения вместимости ЦОД. Sun SPARC Enterprise T5120 применяет интегрированную бесплатную технологию виртуализации с открытым исходным кодом, позволяющую использовать более 2500 изолированных доменов в каждой стойке [5].

В 2010 г. Sun Microsystems анонсировала модульный центр обработки данных Sun Modular Datacenter S20 (Project Blackbox). ЦОД отличают высокая плотность размещения вычислительных ресурсов, конструкция, разработанная с учетом экологических требований,

оперативность развертывания, экономичность, мобильность [6]. В том же году компания SeaMicro анонсировала высокопроизводительный сервер форм-фактора 10U на базе 512 процессоров Intel Atom Z530. По своим характеристикам он эквивалентен 40 стандартным двух-процессорным серверам, построенным на базе 6-ядерных Intel Xeon, но занимает в 4 раза меньше места и потребляет в 3 раза меньше электроэнергии [7, 8].

В последние два года появились альтернативные решения и подходы в области организации производства серверного оборудования на базе RISC-процессоров, изначально разработанных для мобильных устройств. Так, компания ARM активно работает над созданием сервера на базе собственных RISC-процессоров ARM Cortex A8 и A9 (одно- и двухъядерный варианты) [9].

Компания Marvell разработала энергоэффективные процессоры Marvell MV78100 System-on-a-Chip на базе ядер ARM. Компания SeaMicro также планирует использовать процессоры ARM на своей платформе, базирующейся на процессорах Intel Atom.

Процессоры Intel Atom и ARM Cortex до настоящего времени не рассматривались в качестве процессоров для решения серверных задач из-за ограничений на операции ввода/вывода и использование памяти. Тем не менее, все большее количество исследований показывает, что процессоры, предназначенные ранее для мобильных решений, для использования в телефонах и нетбуках, могут обеспечить отличные показатели производительности на единицу потребляемой мощности (ssj\_ops/watt) при решении большого спектра задач, связанных с web-приложениями.

Сходные работы по организации производства серверной платформы на процессорах Intel Atom ведет компания SeaMicro. Платформа, разработанная компанией в формате U10, содержит 512 процессоров Intel Atom Z530 [7].

Компания ARM анонсировала экспериментальный блейд-сервер на базе процессора Marvell MV78100 SoC, разработанного на основе ядер Cortex A9.

Конкурирующие продукты можно условно разделить на две группы. К первой относятся серверные решения на базе производительных процессоров, в первую очередь, архитектуры x86-64 (Intel, AMD) и UltraSparc от Sun; такие серверы выпускают HP, Dell, IBM, Oracle (Sun).

Серверные решения второй группы позволяют существенно улучшить энергоэффективность дата-центров без потери производительности. В настоящее время SeaMicro разрабатывает сервер на базе процессоров Intel Atom, Smooth Stone — на базе ARM (промышленные образцы пока недоступны), Marvell — на базе ARM (созданы экспериментальные образцы).

Для сравнения были выбраны типовые представители архитектуры x86-64 (Dell PowerEdge R610), решения компании Oracle (Sun SPARC Enterprise T5440) и энергоэффективное решение от SeaMicro.

В таблице приведены характеристики серверного оборудования.

Характеристика	Dell PowerEdge R610	SeaMicro SM10000	SPARC Enterprise T5440
Энергопотребление сервера, Вт	300—1000	Не более 2000	Не более 2700
Число процессоров	2	512	4
Число ядер	12	512	32
Производительность (показатель теста SpecInt Rate 2006)	349	—	301
Технологический процесс, нм	32	45	65
Тактовая частота, ГГц	2,93	1,33	1,4
Энергопотребление процессора, Вт	95	0,65—2,5	95
Многоядерный процессор (архитектура)	Intel Xeon X5670	Intel Atom	UltraSPARC T2 Plus

Эффективность работы серверов и серверных комплексов для дата-центров обеспечивается повышением эффективности их отдельных компонентов, таких как память, жесткие диски, процессоры и интерфейсы обмена данными. В настоящее время наиболее эффективным решением является память типа DDR3 [10]. Происходит переход от универсальных процессоров к специализированным, для решения определенных классов задач: хостинг, виртуализация, облачные вычисления.

Другим направлением развития серверных решений является совершенствование архитектуры серверных модулей, позволяющее обеспечить многозадачность и параллельные вычисления в больших массивах данных, например, при поиске в сети Интернет. Этого можно достичь путем создания гетерогенных масштабируемых серверных архитектур, а также путем увеличения числа многоядерных процессоров на одной серверной плате. Серверные модули в настоящее время включают в себя все большее количество процессоров на одной плате, каждый процессор — несколько ядер, а каждое ядро позволяет параллельно решать несколько вычислительных задач — тредов. Двухпроцессорные системы на базе Intel Xeon, например, позволяют поддерживать одновременно до 48 тредов.

Еще одним направлением является развитие новых форматов серверных платформ, позволяющих производить эффективную интеграцию всех компонентов системы. Появились новые решения, которые позволяют увеличить эффективность системы в целом: Cisco Unified Computer System и платформы advancedTCA и microTCA.

К основным технологиям и инструментальным средствам, используемым в производстве серверного оборудования, можно отнести массивно-параллельные компьютерные архитектуры; прототипирование на FPGA; специализированные операционные системы; открытое ПО; комплекс и серверные модули.

**Массивно-параллельные архитектуры (МПА)**, до недавнего времени использовавшиеся лишь в суперкомпьютерах, в настоящее время реализуются не только в специализированных процессорах (мультимедиа, цифровая обработка сигналов) но и в серверных архитектурах и облачных вычислениях [10, 11]. Состоящий из множества узлов массивно-параллельный компьютер (МПК) способен показывать максимальную кумулятивную вычислительную мощность, равную сумме мощностей отдельных элементов. Эти значения зависят от класса задачи и ее решения, хорошо распараллеливаемые задачи — поиск и индексация [12].

С миниатюризацией технологий микроэлектроники становятся коммерчески выгодными реализации МПК на одном кристалле. Большинство современных графических процессоров содержит от нескольких десятков до тысяч отдельных процессоров. Появляются также новые универсальные однокристалльные МПК (Intel SCC, Tiler) [13, 14], обладающие характеристиками, достаточными для построения мощных систем на одном или нескольких кристаллах.

**Прототипирование на программируемых матрицах FPGA** — наиболее распространенный метод снижения рисков и стоимости разработки микроэлектронных устройств, обладающий рядом преимуществ перед симуляционным моделированием и прототипированием на специализированных заказных больших интегральных схемах ASIC.

Лидеры рынка FPGA предлагают однокристалльные комбинации FPGA и одного или нескольких процессорных ядер — Xilinx Virtex и Altera. В 2010 г. фирма Xilinx объявила о выпуске нового устройства Extensible Processing Platform, наряду с большим количеством логических модулей содержащего современный двухъядерный процессор ARM Cortex-A9 [15].

**Специализированные операционные системы (ОС)** позволяют эффективно решать широкий спектр задач. Массивно-параллельные компьютерные системы часто требуют специальной реализации компонентов с учетом специфики МПА аппаратуры и параллельного характера решаемых задач. Особо можно выделить потоковые и облачные вычисления.

Потоковые вычисления связаны с обработкой большого количества последовательных данных (пример — задачи поиска и индексации текста и, в особенности, гипертекстового по-

иска). Одной из главных причин создания специализированной ОС является необходимость эффективного управления потоками. Облачные вычисления связаны с задачами консолидации ресурсов МПА системы и их виртуализации. В настоящее время облачные вычисления являются одной из наиболее быстро развивающихся областей информационных технологий.

**Открытое ПО.** Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что использование Open Source Software (OSS) позволяет существенно уменьшить трудозатраты и сократить срок разработки ПО. При этом одним из основных вопросов является лицензирование OSS.

Существует множество разных лицензий на использование OSS, одна из наиболее распространенных — Открытое лицензионное соглашение GNU (GNU General Public License, GPL) [16], характерным признаком которой является принцип наследования прав („копилефт“), гарантирующий пользователям всех производных программ те же права, что относились к исходной программе — право копирования, модификации и распространения. Лицензии BSD, MIT и Apache не содержат „копилефта“. Также заметим, что существует ПО, выпускаемое под двойной лицензией, например BSD + GPL — некоторые лицензии OSS совместимы друг с другом. Выбор ПО, на котором будет базироваться специализированная ОС, обусловлено не в последнюю очередь тем, что на данном этапе условие „копилефта“ было признано неприемлемым и необходимо воздерживаться от использования кода, лицензированного под GPL, в качестве основы. При этом допускается использование ПО под GPL в качестве инструментального и, возможно, основы для прикладного ПО, где требования GPL не противоречат стратегии.

**Комплекс и серверные модули.** Для реализации высокопроизводительных систем на базе современных многоядерных процессоров используется архитектура MicroTCA, обладающая возможностью: использования готовых промышленных модулей; оптимизации разработки интерконнекта за счет стандартизации интерфейса; использования стандартных механических элементов; масштабируемости за счет добавления новых модулей и крейтов; построения гетерогенных систем; построения систем высокой доступности; повторного использования крейта при замене модулей.

Альтернативными способами повышения энергоэффективности серверных комплексов для центров обработки являются эффективное использование существующих мощностей (пример: использование технологий виртуализации и облачных вычислений); новые решения архитектуры серверов и дата-центров (пример: Cisco Unified Computing System [17]); использование новых способов охлаждения (пример: дата-центр морского базирования — патент от Google).

Таким образом, необходимо отметить следующие тенденции в области производства серверного оборудования для ЦОД:

- использование многоядерных архитектур, поддерживающих одновременно большое количество потоков для решения задач параллельной обработки;
- переход от жесткой привязки к привычным платформам, особенно в секторе крупного бизнеса, к альтернативным архитектурам;
- разработка энергоэффективных и ресурсосберегающих решений, способных при той же производительности снизить потребление энергии и уменьшить занимаемое пространство в дата-центрах;
- разработка интегрированных модульных решений, обеспечивающих дополнительную экономию ресурсов дата-центров за счет компактного размещения интеллектуальной системы управления ресурсами модуля, а также увеличивающих мобильность развертывания модулей и перемещения их между дата-центрами;
- повышение эффективности отдельных компонентов;
- увеличение уровня многозадачности, гетерогенности и специализации серверных архитектур;
- повышение эффективности управления серверными платформами в целом.

Статья написана по результатам выполнения проекта „Разработка и организация высоко-технологического производства энергоэффективных многопроцессорных аппаратно-программных серверных комплексов для государственных и корпоративных информационных систем и центров обработки данных“, выигранного в рамках Открытого конкурса по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологического производства (постановление Правительства РФ от 09 апреля 2010 г. № 218).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IDC: Press release: Worldwide Server Market Revenues Increase 4.7% in First Quarter as Market Demand Improves Sharply, According to IDC [Электронный ресурс]: <<http://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS22360110>>.
2. HP servers [Электронный ресурс]: <<http://h71028.www7.hp.com/enterprise/cache/418226-0-0-178-352.html>>.
3. Dell servers [Электронный ресурс]: <<http://www.dell.com/business/servers>>.
4. IBM servers [Электронный ресурс]: <<http://www.ibm.com/products/shop/servers/us/en/>>.
5. Oracle: Sun servers [Электронный ресурс]: <<http://www.oracle.com/us/products/servers-storage/servers/index.html>>.
6. Oracle: Project Blackbox [Электронный ресурс]: <<http://www.sun.com/emrkt/blackbox/story.jsp>>.
7. SeaMicro: The SM10000 High Density, Low Power Server [Электронный ресурс]: <<http://www.seamicro.com/?q=node/38>>.
8. EE Times: Startup SeaMicro packs 512 Intel Atoms in server [Электронный ресурс]: <<http://www.eetimes.com/electronics-news/4200132/Startup-SeaMicro-packs-512-Intel-Atoms-in-server>>.
9. EE Times: Europe funds ARM-based server research [Электронный ресурс]: <<http://www.eetimes.com/electronics-news/4200544/Europe-funds-ARM-based-server-research->>.
10. Wikipedia: Dynamic random access memory [Электронный ресурс]: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic\\_random\\_access\\_memory](http://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_random_access_memory)>.
11. Butts M., Budlong B., Wasson P., White E. Reconfigurable Work Farms on a Massively Parallel Processor Array // Proc. of FCCM. IEEE Computer Society April 2008.
12. MapReduce [Электронный ресурс]: <Simplified Data Processing on Large Clusters <http://labs.google.com/papers/mapreduce-osdi04.pdf>>.
13. Single-chip Cloud Computer [Электронный ресурс]: <<http://techresearch.intel.com/articles/Tera-Scale/1826.htm>>.
14. Tiler Talks 100-Core Processor [Электронный ресурс]: <<http://www.eweek.com/c/a/IT-Infrastructure/Tiler-Talks-100Core-Processor-376613/>>.
15. More on Xilinx EPP [Электронный ресурс]: <<http://www.design-reuse.com/industryexpertblogs/23574/xilinx-epp.html>>.
16. The GNU General Public License [Электронный ресурс]: <<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>>.
17. Cisco Unified Computing System [Электронный ресурс]: <[http://www.cisco.com/web/solutions/data\\_center/unifiedcomputing\\_promo.html](http://www.cisco.com/web/solutions/data_center/unifiedcomputing_promo.html)>.

#### Сведения об авторах

- Юрий Львович Леохин** — д-р техн. наук, профессор; Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“; E-mail: [yleokhin@hse.ru](mailto:yleokhin@hse.ru)
- Игорь Николаевич Дворецкий** — Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета „Высшая школа экономики“; научный сотрудник; E-mail: [ldvoretzkiy@hse.ru](mailto:ldvoretzkiy@hse.ru)

Рекомендована кафедрой  
НИУ ВШЭ

Поступила в редакцию  
01.11.13 г.

А. И. СВИТЕНКОВ, Д. М. СПЕЛЬНИКОВ, В. Г. МАСЛОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

## ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ХАРТРИ—ФОКА ДЛЯ МОЛЕКУЛЫ ГРАФЕНА: МАСШТАБИРУЕМОСТЬ И ГИПЕРЭФФЕКТИВНОСТЬ

Рассмотрен параллельный метод решения уравнения Хартри—Фока, основанный на алгоритме DC. Предложенный метод позволяет частично решать задачу самосогласования локально на вычислительных узлах, что служит сокращению накладных расходов.

**Ключевые слова:** задача самосогласования, графен, параллельный алгоритм, уравнение Хартри—Фока, накладные расходы, квантовая химия, масштабируемость.

**Введение.** Распространенным подходом к приближенному решению уравнения Шредингера является так называемое одноэлектронное приближение, при котором каждый электрон рассматривается как независимый, движущийся в усредненном поле ядер атомов и других электронов. Этот подход используется в методах Хартри—Фока, функционала плотности или приближении сильносвязанных электронов. Уточнение решения за счет учета корреляционной энергии электронов приводит к критическому росту вычислительной сложности и на практике возможно при моделировании молекулярных систем лишь из небольшого числа атомов [1].

Для моделирования свойств по возможности больших систем используются наиболее простые одноэлектронные *ab initio* или даже полуэмпирические приближения [2]. Однако традиционная постановка задачи и в этих случаях приводит к кубическому росту вычислительной сложности при увеличении числа атомов, что делает ее неприменимой для систем, содержащих 1000 атомов и более. В этой связи в настоящее время широко обсуждаются линейно масштабируемые методы, значительно расширяющие границы применения квантовой химии [3]. Однако увеличение размеров систем до десятков и сотен тысяч атомов дополнительно требует параллельной реализации указанных алгоритмов. В работе представлен опыт применения линейно масштабируемого метода “Divide-and-conquer” (DC) для квантово-химического уравнения Хартри—Фока. Моделированию подлежала электронная структура молекулярных соединений типа „графен“ и „графан“.

Специфика выбранных соединений позволяет наблюдать важные эффекты, связанные со сходимостью итерационного процесса самосогласования. При рассмотрении масштабируемости того или иного метода необходимо учитывать не только сложность выполнения одной итерации самосогласования, но и зависимость числа итераций от числа атомов [4].

Параллельный алгоритм, основанный на пространственной декомпозиции молекулярной системы, аналогичной декомпозиции в алгоритме DC, приводит не только к снижению времени выполнения одной итерации, но и к уменьшению числа итераций самосогласования, требуемых для сходимости. Относительно полного времени решения задачи Хартри—Фока, таким образом, наблюдается гиперускорение. Для объяснения описанного эффекта необходимо рассмотреть свойства уравнения Хартри—Фока и его решений.

**Постановка задачи. Уравнение Хартри—Фока.** В методе Хартри—Фока гамильтониан молекулярной системы в уравнении Шредингера заменяется приближенным одноэлектронным аналогом — фокианом. В таком случае приближенное уравнение Шредингера приобретает вид [5]:

$$-\frac{1}{2}\nabla^2 \psi_k(\mathbf{r}) + V\psi_k = \varepsilon_k \psi_k(\mathbf{r}). \quad (1)$$

Оно должно быть решено относительно волновых функции  $\psi_k(\mathbf{r})$  в действительной области пространства в некоторой окрестности неподвижных центров атомных ядер. Здесь  $V$  — оператор эффективного потенциала, в котором движется электрон:  $V=V_0+V_d+V_x$ ;  $V_0$  описывает вклад взаимодействия электрона и атомных ядер;  $V_d$  и  $V_x$  описывают взаимодействие с остальными электронами системы:

$$\left. \begin{aligned} V_d \psi_j(\mathbf{r}) &\equiv \sum_i \left( \int \frac{|\psi_i(\mathbf{r}')|^2}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dV' \right) \psi_j(\mathbf{r}), \\ V_x \psi_k(\mathbf{r}) &\equiv \sum_{j \neq k} \left( \int \frac{\psi_j^*(\mathbf{r}') \psi_k(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} dV' \right) \psi_j(\mathbf{r}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При разложении по выбранному набору базисных функций  $k$ -я орбиталь представляет собой линейную комбинацию базисных функций  $\phi_i$  с неизвестными коэффициентами  $C_{ki}$  [6]:

$$\psi_k = \sum_{\mu=1}^M C_{k\mu} \phi_{\mu},$$

относительно которых уравнение Хартри—Фока может быть записано следующим образом:

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} C_{kj} = \varepsilon_k C_{ki}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{F}$  — матрица фокиана в соответствующем базисном разложении. Выражение (3) представляет собой задачу на собственные числа и собственные векторы матрицы  $\mathbf{F}$ . Матрица плотности  $\mathbf{P}$  определяется выражением:

$$P_{ij} = \sum_{k=k_{occ}} C_{ki} C_{kj}. \quad (4)$$

Как видно, матрица фокиана, в свою очередь, зависит от матрицы плотности. Таким образом, уравнения (2)—(4) формируют так называемую самосогласованную задачу, решение которой сводится к итерационному процессу с последовательным уточнением матрицы  $\mathbf{P}$  и соответствующей матрицы  $\mathbf{F}$  до достижения сходимости.

Из уравнения (3) видна кубическая сложность предлагаемого алгоритма относительно размера матриц  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{F}$ , однако при использовании базиса сильно локализованных функций внедиагональные элементы матрицы плотности довольно быстро затухают с расстоянием. Это приводит к тому, что реальное число отличных от нуля матричных элементов оказывается  $\sim N$ , а не  $\sim N^2$  [7]. То же относится и к матрице фокиана в этом представлении. Соответственно все действия с такими матрицами имеют трудоемкость ниже  $O(N^3)$ , что отражает локальный характер квантовой механики и так или иначе используется всеми линейно масштабируемыми алгоритмами решения задачи Хартри—Фока.

**Алгоритм ДС и его параллельная реализация.** С помощью алгоритма ДС общая матрица плотности строится на основе решения, полученного не для всей системы в целом, а для некоторых перекрывающихся фрагментов. Величина буферной зоны задается посредством величины отсечения  $S_{th}$  интегралов перекрывания базисных функций, значения меньше которой считаются нулевыми. Атомы, базисные функции которых не перекрываются, считаются не взаимодействующими непосредственно [8].

Для каждой подобласти проводится отдельный расчет субматрицы плотности. Объединяющим условием для всей рассчитываемой системы является только энергия уровня Ферми. У полученной субматрицы плотности для подобласти исключаются из рассмотрения все „углы“.

На рис. 1 приведена матрица плотности для центральной области. Из полной матрицы плотности (слева) в дальнейших вычислениях используется только „крестообразная“ часть (справа) [6].

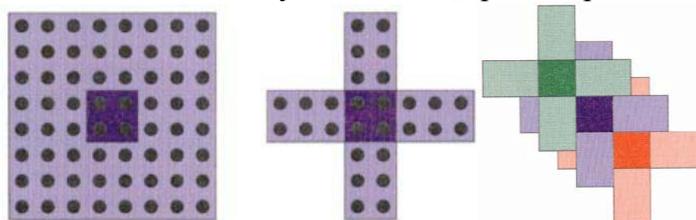


Рис. 1

Неперекрывающиеся области (центральные) суммируются с единичным весом, а перекрывающиеся — с весом 0,5.

Диагонализация гамильтониана и вычисление субматрицы плотности для каждого из фрагментов могут производиться совершенно независимо. Однако накладные расходы по сбору и раздаче матриц особенно сильно возрастают с уменьшением фрагмента до значений, при которых размеры буферной и центральной областей становятся соизмеримыми.

Объем передаваемой информации быстро возрастает при уменьшении размера фрагмента, что делает алгоритм малоэффективным при соответствующем увеличении количества узлов. В работе предпринята попытка снизить объем накладных расходов за счет модификации параллельного алгоритма DC. Предлагается выполнять процесс самосогласования для каждого фрагмента локально, при фиксированных значениях элементов матрицы плотности, соответствующих буферной области. Такая итерация далее будет называться локальной. Под глобальной итерацией далее будет подразумеваться обычная для DC алгоритма операция по уточнению матрицы гамильтониана.

На рис. 2, а представлена блок-схема параллельной версии DC алгоритма. Под блоком вычисления субматриц плотности на узлах понимается последовательность действий, приведенная на рис. 2, б. Если итерации внешнего цикла не выполняются, то блок-схемы описывают параллельный вариант исходного алгоритма DC, в противном случае — модифицированный вариант, а на рис. 2, б приведен итерационный процесс, выполняемый локально.

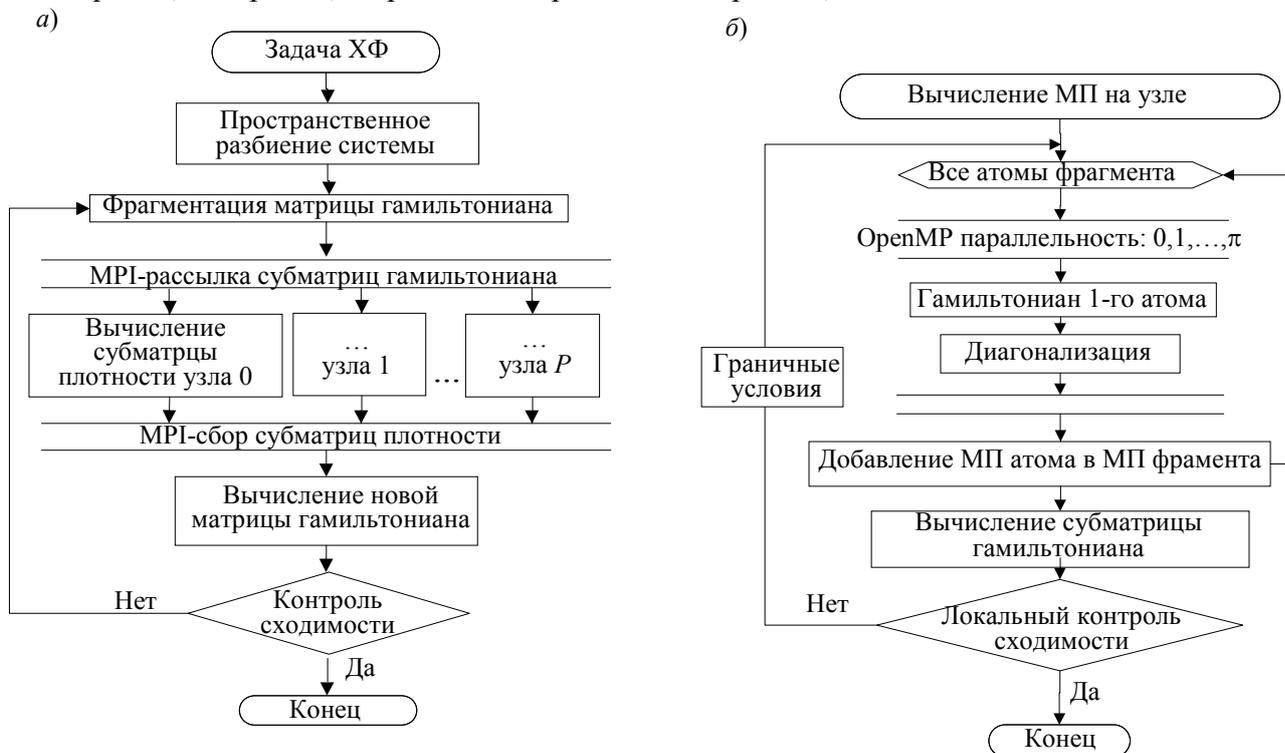


Рис. 2

Теоретически оценить параллельное ускорение модифицированного и исходного вариантов алгоритма DC позволяет выражение:

$$S = \frac{\alpha N + \beta N^2}{\frac{\alpha N}{\Pi\pi} + \frac{\beta N^2}{\Pi\pi} + \frac{d(1+c)}{\tau K} \left( N + \frac{c}{2} \sqrt{\kappa N \Pi} \right)}, \quad (5)$$

где  $N$  — число атомов в системе,  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты трудоемкости,  $\Pi$  — число узлов,  $\pi$  — число вычислительных ядер на узле. Операция диагонализации матрицы характеризуется линейностью алгоритма DC, в то время как обновление матрицы гамильтониана имеет квадратичную сложность с очень малым коэффициентом. Поскольку для систем размером  $\sim 10^5$  атомов нелинейность проявляется, в модель введено квадратичное слагаемое. Третье слагаемое в знаменателе относится к накладным расходам:  $d$  — длина сообщения, приходящаяся на один атом системы,  $c$  — количество соседей для каждого атома,  $\kappa$  — геометрический фактор, связывающий площадь фрагмента с длиной его границы,  $\tau$  — скорость MPI передачи данных;  $K$  — среднее число локальных итераций, приходящихся на одну глобальную.

Идея модификации алгоритма DC состоит именно в том, что локальные итерации позволяют существенно повысить скорость сходимости глобального процесса самосогласования, тогда  $K > 1$ , и накладные расходы снижаются в соответствующее количество раз. Случай  $K = 1$  соответствует параллельному ускорению исходного алгоритма DC.

**Измерение производительности.** Параллельная производительность модифицированного алгоритма DC измерялась в ходе моделирования электронной плотности молекул графена различного размера. Запуски производились на суперкомпьютере МГУ „Ломоносов“ на 128, 256 и 512 узлах (8 вычислительных ядер на узел). В таблице приведены результаты измерения полного времени решения задачи, времени вычисления одной глобальной итерации и индексы эффективности использования ресурсов. Отсутствие данных по ускорению объясняется невозможностью проведения последовательного расчета для систем таких размеров.

Результаты измерений времени решения задач Хартри—Фока на 128/256/512 узлах для молекул графена различных размеров

Размер молекулы	Полное время выполнения, с	Эффективность	Время выполнения одной итерации, с	Эффективность
20802	2118/1469/1048	0,71/0,71	3,0/1,9/1,3	0,78/0,73
46202	4892/2839/1847	0,86/0,76	7,9/4,1/2,7	0,96/0,75
98562	32346/12835/7513	1,26/0,85	16,5/8,9/4,9	0,93/0,9

Из таблицы видно, что для системы максимального размера при переходе от 128 к 256 ядрам наблюдается гиперэффективность использования вычислительных ресурсов  $\sim 1,26$ . Эффект наблюдается для полного времени решения задачи, максимально достигаемая эффективность для одной итерации меньше единицы. Механизм возникновения обнаруженного эффекта в общих чертах следующий. Скорость сходимости процесса самосогласования для фрагментов молекулярной системы заметно зависит от числа атомов, поэтому при уменьшении размера фрагментов в определенных условиях выигрыш по времени от ускорения сходимости может превысить возрастающие затраты на пересылку данных. Однако такое качественное описание не позволяет ответить на важный вопрос об эффективности использования именно модифицированного алгоритма DC. Сходимость процесса самосогласования для молекулы целиком может оказаться лучшей, чем для фрагментов, это приведет к проигрышу относительно исходного алгоритма. Если рассматривать модель (5) как ускорение относительно одной глобальной итерации, полное ускорение запишется как  $S_0 = S n_0 (n_l n_G)^{-1}$ , где  $n_0$  — число итераций до сходимости в немодифицированном алгоритме DC,  $n_l$  — число локальных итераций до сходимости,

$n_G$  — число глобальных итераций. Коэффициент при  $S$  в правой части этого выражения будем называть коэффициентом гиперэффективности. В выражении (5)  $K = n_I$ .

**Модель сходимости процесса Хартри—Фока.** Для теоретической оценки ускорения предлагаемой параллельной модификации алгоритма DC необходимо рассмотреть зависимость числа необходимых итераций от размера молекулы. Этот непростой процесс приближенно можно описать из следующих общих соображений. Известно, что масштабируемость того или иного алгоритма определяется связанностью данных, характерной для решаемой задачи. Рассмотрим реакцию на точечное возмущение решения уравнения (1). В качестве такого практически точечного возмущения зафиксируем вариацию  $\delta\psi$  на сферической поверхности  $\sigma$  некоторого малого радиуса. Решение будем искать во внешней области. Выражение (1) может быть представлено как уравнение Пуассона, если понимать его решение в виде итерационного процесса, в котором источник определяется видом  $\psi$ -функции, найденным на предыдущей итерации, тогда:

$$\psi_k(\mathbf{q}) = -\int \partial_n G(\mathbf{q}, \mathbf{m}) \delta\psi_k d\sigma_m + 2 \int G(\mathbf{q}, \mathbf{m}) (\epsilon_k - V) \psi_k d\Omega_m, \quad (6)$$

где  $G(\mathbf{q}, \mathbf{m})$  — функция Грина уравнения Пуассона. Это уравнение может быть решено итерационно, в результате будет получен ряд  $n$ -кратных интегральных слагаемых и остаточный член, порождаемый первым и вторым слагаемыми в уравнении (6) соответственно. Сложность вычисления каждого из слагаемых пропорциональна размеру области интегрирования в степени кратности интеграла (интеграл по поверхности возмущения масштабируется как единица). Если область интегрирования всегда соответствует области решения задачи, конкретно — числу атомов в молекуле, то и решение задачи Хартри—Фока будет иметь экспоненциальную сложность, и таким же образом будет расти число итераций сходимости процесса самосогласования. Напротив, если отклик на точечное возмущение локализован и можно определить область интегрирования, не зависящую от размера системы, то сложность будет постоянной. Более точное описание сходимости должно включать в себя учет убывания членов ряда и возможную локализацию областей интегрирования в них, этим объясняется отсутствие места для полиномиальной сложности.

Локальность квантово-химической модели, вводимая алгоритмом DC, имеет смысл локальности непосредственного взаимодействия атомных оболочек. В итерационном процессе самосогласования точечное возмущение может оказывать влияние, выходящее за пределы вводимой окрестности. Заметим, что оно может быть измерено непосредственно.

Для измерения окрестности релаксации точечного возмущения варьировались диагональные элементы матрицы плотности, относящиеся к выделенному атому вдалеке от границ молекулы графена. Вариация производилась после достижения сходимости процесса самосогласования, она составляла 10 % от точной величины и удерживалась до повторного достижения самосогласования. Полученная матрица плотности по модулю вычиталась из точной. На рис. 3 приведен пример локального и нелокального отклика для молекулы графена, содержащей 572 атома, при пороге DC отсечения  $10^{-3}$  (а) и  $10^{-4}$  (б). Точечное возмущение находится в центре изображений.

Разностная картина, наблюдаемая на рис. 3, а, считается локальным откликом: края графенового листа практически не подсвечены, напротив, на рис. 3, б отклик нелокален, поскольку возбуждение слабо затухает к краям, а картина отклика представляет собой, по видимому, результат интерференции волновых функций, отраженных от края.

Измерения скорости сходимости подтвердили экспоненциальное возрастание числа итераций для случая нелокального отклика и его постоянство с момента увеличения молекулы до размеров, превышающих область отклика. Для параметра DC-отсечения  $10^{-3}$  описанное изменение поведения соответствует молекуле графена размером  $10 \times 10$  бензольных колец (всего 282 атома), для параметров отсечения  $2 \cdot 10^{-4}$  и  $1 \cdot 10^{-4}$  экспоненциальный рост числа

итераций наблюдается при увеличении стороны квадратного листа графена до 30 и 40 бензольных колец соответственно.

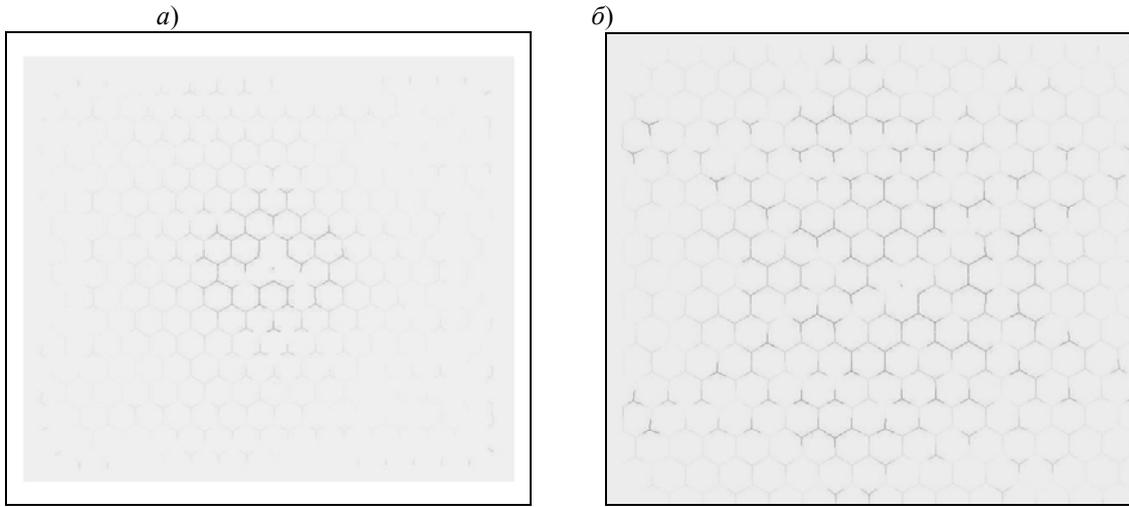


Рис. 3

В соответствии с такими предположениями модель зависимости числа итераций  $n_0$  от размера молекулы может быть записана так:

$$n_0(N) = \begin{cases} n, ae^{N/N_0} < n, \\ ae^{N/N_0}, N < N_0, \\ a, N \geq N_0, \end{cases} \quad (7)$$

где  $N_0$  — размер молекулы, при котором наблюдается изменение поведения; он, как и коэффициент  $a$ , определялся экспериментально. Первое из выражений в фигурных скобках введено для корректного поведения рассматриваемой модели вблизи нуля. Модель коэффициента гиперэффективности требует также знания поведения коэффициента  $n_G$ , которое не исследовалось теоретически. Эксперимент показал слабую зависимость  $n_G$  от числа фрагментов  $\Pi \sim 100$ , которая аппроксимировалась линейно.

Итоговая модель ускорения имеет следующий вид:

$$S_0 = S(N, \Pi) \frac{n_0(N)}{n_l(N/\Pi)n_G(\Pi)}, \quad n_G(\Pi) = b + c\Pi. \quad (8)$$

На рис. 4, а представлены графики коэффициента гиперэффективности, построенные в соответствии с предлагаемой моделью, б — ускорения решения задачи самосогласования Хартри—Фока для квадратных листов графена 98562 (1) и 46202 атома (2) на базе моделей (5) и (8). Коэффициент гиперэффективности, т.е. ускорение, которое было бы достигнуто только за счет изменения числа итераций до сходимости, принимает значения больше единицы в обоих рассмотренных случаях. Это, однако, не гарантирует наличия гиперускорения, которое проявляется только для случая графенового листа максимального размера. Более того, измеренная в ходе экспериментальных исследований эффективность не отвечает максимальному ускорению, которое могло бы быть получено. На рис. 4, б угол наклона секущей, проведенной из нуля к точке кривой для большего листа, превысит биссектрису координатного угла, только если точка будет располагаться вблизи максимума кривой. Для листа графена меньших размеров такая точка вообще отсутствует. Однако для обеих кривых найдется секущая, проведенная через две точки и имеющая „гиперэффективный“ угол наклона. Это означает, что проведенные измерения эффективности действительно ничего

не могут сообщить о реальном ускорении, а применение самого модифицированного алгоритма DC целесообразно только в ограниченном диапазоне числа пространственных фрагментов (область определения графика на рис. 4, а, соответствующая значениям, превышающим единицу).

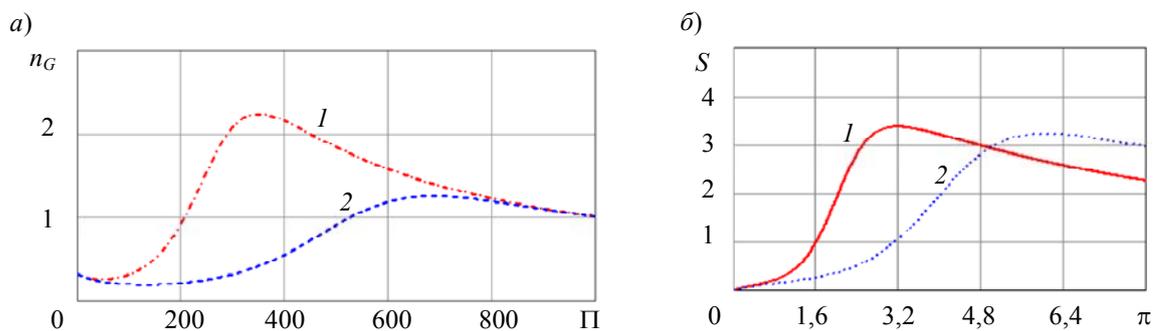


Рис. 4

**Заключение.** Предложенная модификация алгоритма DC позволяет снизить накладные расходы, пересчитанные на одну итерацию самосогласования. Однако эффективность по отношению к полному времени решения задачи самосогласования демонстрирует более сложное поведение, обусловленное зависимостью числа итераций самосогласования от размера молекулы. Проведенные измерения показали высокую эффективность и гиперэффективность использования вычислительных ресурсов относительно базы, взятой при запуске на 128 узлах (8 ядер на узле), однако это не является гарантией столь же высокой эффективности относительно гипотетического последовательного исполнения.

Работа выполнена в рамках контракта 07.514.11.4146 ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2013 годы“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bernholdt D. E. Scalability of correlated electronic structure calculations on parallel computers: A case study of the RI-MP2 method // *Parallel Computing*. 2000. Vol. 26. P. 945—963.
2. Degoli E., Ossicini S. Engineering Quantum Confined Silicon Nanostructures: Ab-Initio Study of the Structural, Electronic and Optical Properties. 2009. Vol. 58. P. 203—279.
3. Nakai H., Kobayashi M. Linear-scaling electronic structure calculation program based on divide-and-conquer method. 2011. Vol. 4. P. 1145—1150.
4. Duchemina I., Gygi F. A scalable and accurate algorithm for the computation of Hartree–Fock exchange // *Computer Physics Communications*. 2010. Vol. 181, N 5. P. 855—860.
5. Alizadegan R., Hsia K. J., Martinez T. J. A divide and conquer real space finite-element Hartree–Fock method // *J. of Chem. Phys.* 2010. Vol. 132. P. 034101.
6. Goedecker S. Linear scaling electronic structure methods // *Rev. Mod. Phys.* 1999. Vol. 71, N 4. P. 1085–1123.
7. Bolliger C. Linear Scaling Electronic Structure Methods. July 2008 [Электронный ресурс]: <<http://www.math.ethz.ch/~kressner/students/bolliger.pdf>>.
8. Lin L., Lu J., Ying L., Car R. Fast algorithm for extracting the diagonal of the inverse matrix with application to the electronic structure of metallic systems // *Commun. Math. Sci.* 2009. Vol. 7, N 3. P. 755—777.

#### Сведения об авторах

Андрей Игоревич Свитенков

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; Научно-исследовательский институт Научно-технологических компьютерных технологий; инженер; E-mail: svitenkov@yandex.ru

- Дмитрий Михайлович Спельников* — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; Научно-исследовательский институт Наукоемких компьютерных технологий; младший научный сотрудник; E-mail: pilule@yandex.ru
- Владимир Григорьевич Маслов* — д-р физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; Центр „Информационные оптические технологии“; ведущий научный сотрудник; E-mail: maslov04@bk.ru
- Александр Валерьевич Бухановский* — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Научно-исследовательский институт Наукоемких компьютерных технологий; директор НИИ НКТ; E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
высокопроизводительных  
вычислений

Поступила в редакцию  
18.06.13 г.

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 621.314:681.511

А. И. Андриянов, Н. А. Краснов

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКОЙ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПониЖАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Предложен вариант построения нейросетевой системы управления непосредственным понижающим преобразователем постоянного напряжения на основе метода направления на цель. В такой системе обеспечиваются заданные нелинейные динамические свойства преобразовательного устройства.

*Ключевые слова:* импульсный преобразователь, нелинейная динамика, бифуркация, периодический режим, метод направления на цель.

**Постановка задачи.** Импульсные преобразователи напряжения нашли широкое применение в промышленности, поскольку обеспечивают приемлемые массогабаритные показатели и высокую удельную мощность [1]. Они представляют собой замкнутые системы автоматического управления со сложной динамикой [2]. В частности, при изменении того или иного параметра системы (например, входного напряжения) в результате бифуркации возможно возникновение колебаний выходного напряжения большой амплитуды, что может привести к выходу из строя силовой части преобразователя. Проектным динамическим режимом для таких систем является так называемый 1-цикл, когда частота колебаний выходного напряжения совпадает с частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ), а амплитуда колебаний достаточно мала.

Исключить опасные динамические режимы можно, правильно выбрав параметры системы управления. При оптимальных с точки зрения нелинейной динамики параметрах возможно неоптимальное быстродействие. Альтернативным методом обеспечения требуемых нелинейных динамических свойств преобразователей напряжения является так называемый структурный синтез, при котором данная задача решается путем формирования определенной структуры системы управления.

Существует достаточно много работ по управлению нелинейной динамикой дискретных систем или систем, сводимых к ним [3—5].

В работе [3] рассматривается возможность использования метода линеаризации отображения Пуанкаре для стабилизации неустойчивого проектного режима в непосредственном повышающем преобразователе напряжения. Линеаризация отображения Пуанкаре является эффективным подходом при управлении нелинейной динамикой, но в то же время требует достаточно серьезных вычислительных затрат для микроконтроллера системы управления.

Метод с запаздывающей обратной связью, или метод Пирагаса [4], предполагает использование обратной связи с задержкой, равной периоду стабилизируемого периодического

режима, для стабилизации неустойчивых периодических траекторий. К недостаткам этого метода можно отнести ограниченные возможности стабилизации проектного режима при изменении параметров системы в широком диапазоне.

В работе [5] рассматривается так называемый метод направления на цель (МНЦ), который можно рассматривать как модификацию метода Пирагаса. Сущность этого метода заключается в использовании заранее известной неподвижной точки отображения динамической системы. Это позволяет расширить возможности стабилизации проектного режима в широком диапазоне изменения параметров системы. МНЦ известен сравнительно недавно, и в работе [4] рассматривается лишь стабилизация в одномерных аналитических отображениях 1-цикла с заданными параметрами, а возможность использования метода в технических системах до сих пор не рассматривалась. Техническая реализация системы управления импульсным преобразователем напряжения на основе МНЦ сопряжена с определенными трудностями. Основной задачей настоящей работы является создание структуры системы управления непосредственным преобразователем постоянного напряжения на основе МНЦ при минимальных требованиях к быстродействию управляющего микроконтроллера, обеспечивающей проектный 1-цикл в заданном диапазоне изменения параметров системы.

**Система управления непосредственным понижающим преобразователем напряжения.** Метод направления на цель заключается в следующем. Пусть имеется некоторая дискретная система, описываемая функцией стробоскопического отображения вида

$$x_n = f(x_{n-1}), \quad (1)$$

где  $x_n$  — значение переменной на  $n$ -й итерации отображения.

Стабилизация неустойчивой неподвижной точки отображения (1)  $x^*$  может быть осуществлена путем введения стабилизирующего воздействия, при котором функция отображения нелинейной динамической системы принимает вид

$$x_n = f(x_{n-1}) + c(x^* - f(x_{n-1})),$$

где  $c$  — настраиваемый коэффициент.

Основная сложность МНЦ — необходимость предварительного расчета стабилизируемой неподвижной точки отображения, что в случае отображений более высоких порядков затруднительно и связано с большими вычислительными затратами.

Функциональная схема системы управления (СУ) непосредственным понижающим преобразователем постоянного напряжения с использованием МНЦ представлена на рис. 1, здесь  $R$  — активное сопротивление дросселя,  $L$  — индуктивность дросселя,  $C$  — емкость конденсатора,  $R_n$  — сопротивление нагрузки,  $E_0$  — напряжение источника питания,  $\beta_1, \beta_2$  — масштабные коэффициенты цепей обратной связи,  $U_3$  — напряжение управления,  $U_n$  — импульс управления силовым ключом,  $U_y$  — управляющий сигнал,  $U_p$  — развертывающее пилообразное напряжение, ОСУ — основная система управления, ВСУ — вспомогательная система управления, ГРН — генератор развертывающего напряжения, ЗГ — задающий генератор, ИП — импульсный преобразователь, УВХ1, УВХ2 — устройство выборки-хранения, НС1, НС2 — нейронные сети, ВСН — вычислитель сопротивления нагрузки,  $K_1, K_2$  — коэффициенты пропорциональности,  $U_{\text{ош}}$  — ошибка ОСУ,  $U_{ck3}, I_{Lk3}$  — компоненты вектора задания на неподвижную точку 1-цикла,  $U_{ck}, I_{Lk}$  — компоненты вектора обратных связей по переменным состояния в стробоскопические моменты времени,  $\Delta U_{ck}, \Delta I_{Lk}$  — компоненты вектора отклонения текущей точки режима от заданной,  $\alpha$  — коэффициент усиления пропорционального регулятора. Основная подсистема управления обеспечивает стабилизацию среднего значения выходного напряжения без учета нелинейных динамических свойств, а вспомогательная обеспечивает стабилизацию проектного динамического режима (1-цикла).

Классическая система автоматического управления с обратной связью по среднему значению выходного напряжения непосредственного понижающего преобразователя описывается функцией стробоскопического отображения вида [2]:

$$\mathbf{X}_k = e^{Aa} \mathbf{X}_{k-1} + (e^{Aa} - e^{A(1-z_k)a}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{X}=[x_1, x_2]^T=[i_L, u_c]^T$ ;  $i_L$  — ток дросселя;  $u_c$  — напряжение на конденсаторе;  $z_k$  — коэффициент заполнения ШИМ на  $k$ -м тактовом интервале;  $\mathbf{X}_{k-1}$  — вектор переменных состояния системы в начале  $k$ -го тактового интервала. Матрица параметров системы  $\mathbf{A}$  и вектор вынуждающих воздействий  $\mathbf{B}$  представлены в работе [2].

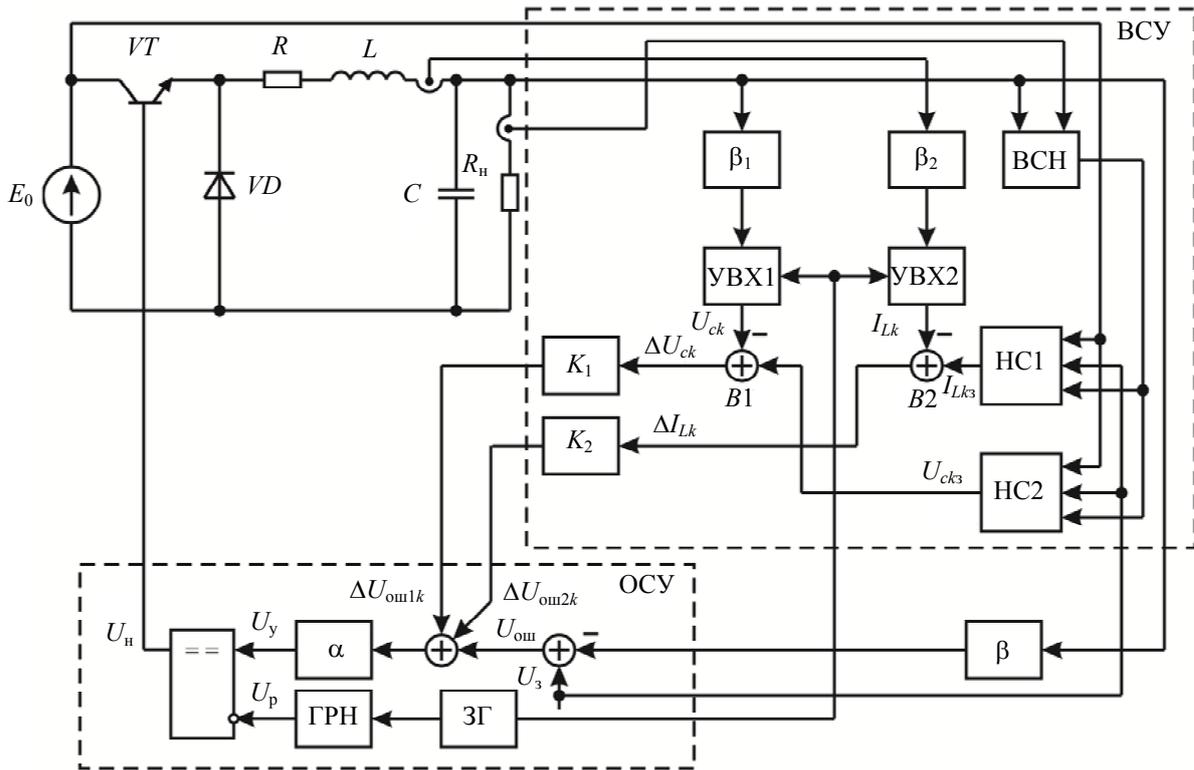


Рис. 1

При использовании МНЦ введем дополнительные управляющие воздействия  $\Delta U_{om1k}$  и  $\Delta U_{om2k}$  (см. рис. 1), которые определяются по выражениям

$$\Delta U_{om1k} = K_1 (U_{ck3} - U_{ck}); \quad \Delta U_{om2k} = K_2 (I_{Lk3} - I_{Lk}).$$

Тогда выражение для функции стробоскопического отображения СУ на основе МНЦ примет вид

$$\mathbf{X}_k = e^{Aa} \mathbf{X}_{k-1} + (e^{Aa} - e^{A(1-(z_k+\Delta z_k))a}) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}, \quad (3)$$

где  $\Delta z_k$  — приращение коэффициента заполнения:

$$\Delta z_k = \frac{\alpha (\Delta U_{om1k} + \Delta U_{om2k})}{U_{pm}}, \quad (4)$$

где  $U_{pm}$  — амплитуда развертывающего напряжения на выходе ГРН.

При реализации рассматриваемого алгоритма управления наиболее важной задачей является расчет неподвижной точки стробоскопического отображения (2), который может быть выполнен с использованием метода уравнений периодов или метода неподвижной точки [2].

Однако в этом случае микроконтроллер СУ реализует один из численных методов решения систем нелинейных трансцендентных уравнений, что требует серьезных вычислительных ресурсов. Для упрощения указанной задачи авторы предлагают использовать две нейронные сети, каждая из которых рассчитывает свой компонент вектора неподвижной точки 1-цикла отображения (2)  $X^*=[U_{ck3}, I_{Lk3}]^T$ .

Как известно, нейронная сеть типа „многослойный персептрон“ представляет собой универсальный аппроксиматор, позволяющий реализовывать сложные регрессионные модели нелинейных систем. В качестве входных переменных нейронных сетей (факторов регрессии) в данном случае выступают параметры, которые при работе системы могут варьироваться в широких пределах. Как видно из рис. 1, к факторам, используемым в рассматриваемых регрессионных моделях, относятся задающее напряжение  $U_3$ , входное напряжение  $E_0$  и сопротивление нагрузки  $R_n$ , которое рассчитывается с использованием сигналов датчика тока нагрузки и датчика выходного напряжения. Указанный подход позволяет существенно сократить время расчета неподвижной точки, а достигаемая точность аппроксимации приемлема для практического применения.

В рассматриваемой системе управления двухслойные персептроны реализовывали регрессионную модель вида  $X^*=\mathbf{F}(\mathbf{P})=[f_1(U_3, E_0, R_n), f_2(U_3, E_0, R_n)]$ , где  $f_1$  и  $f_2$  — нелинейные трехпараметрические функции — компоненты векторной функции  $\mathbf{F}$ , реализуемые НС1 и НС2 соответственно,  $\mathbf{P}=[U_3, E_0, R_n]^T$  — вектор факторов регрессии. Формирование обучающей выборки для нейронной сети осуществлялось с использованием метода уравнений периодов, а обучение сети проводилось с использованием алгоритма Левенберга—Маквардта [6].

Обратная связь по переменным состояния в стробоскопические моменты времени в предлагаемой системе (см. рис. 1) осуществляется с использованием УВХ1 и УВХ2. Под стробоскопическими моментами времени понимаются моменты, соответствующие началу тактовых интервалов ШИМ. Как видно из рис. 1, запоминание напряжения на выходном конденсаторе  $C$  и тока дросселя  $L$  происходит в начале каждого тактового интервала при подаче на УВХ стробирующего импульса от ЗГ, который работает синхронно с ГРН. С помощью двух вычитателей (В1 и В2) рассчитывается отклонение текущего положения точки отображения (3) от заданного с последующим масштабированием с коэффициентами  $K_1$  и  $K_2$  соответствующих компонентов вектора рассогласования  $\Delta X=[\Delta U_{ck}, \Delta I_{Lk}]^T$ . Вычисленные приращения  $\Delta U_{om1k}$  и  $\Delta U_{om2k}$  суммируются с напряжением ошибки ОСУ  $U_{om}$ , вызывая на каждом тактовом интервале стабилизирующее заданный режим приращение коэффициента заполнения  $\Delta z_k$  (выражение (4)). При установлении в системе проектного 1-цикла  $\Delta U_{om1k}=\Delta U_{om2k}=0$ ,  $\Delta z_k=0$ .

Предлагаемая структура системы управления может быть реализована различными цифровыми сигнальными микроконтроллерами или недорогими программируемыми логическими интегральными микросхемами. При использовании последних существенно упрощается расчет задания на неподвижную точку 1-цикла с использованием нейронных сетей.

**Исследование нелинейной динамики понижающего преобразователя напряжения на основе СУ с МНЦ.** Рассмотрим результаты моделирования замкнутой системы автоматического управления на основе МНЦ с понижающим преобразователем напряжения в среде MatLab Simulink. Моделирование осуществлялось при следующих параметрах системы:  $L=0,1$  Гн;  $C=1$  мкФ;  $R=10$  Ом;  $R_n=100$  Ом;  $\alpha=60$ ;  $\beta=0,01$ ;  $U_3=5$  В;  $U_{om}=10$  В;  $a=0,0001$  с;  $K_1=-0,9$ ;  $K_2=-0,9$ ;  $\beta_1=0,01$ ;  $\beta_2=0,1$ .

Результаты моделирования представлены на рис. 2 в виде карт динамических режимов, которые отражают особенности разбиения пространства параметров системы на области устойчивости различных режимов. Здесь символами  $\Pi_{i,j}$  отмечены области устойчивости различных динамических режимов ( $i$  —  $m$ -цикл, характерный для данной области [2],  $j$  — номер области на карте динамических режимов). Например, область  $\Pi_{1,1}$  представляет собой первую

область устойчивости основного (проектного) режима (1-цикла);  $\Pi_X$  соответствуют областям параметров системы, в которых существуют хаотические режимы работы преобразователя ( $m \rightarrow \infty$ ) [2].

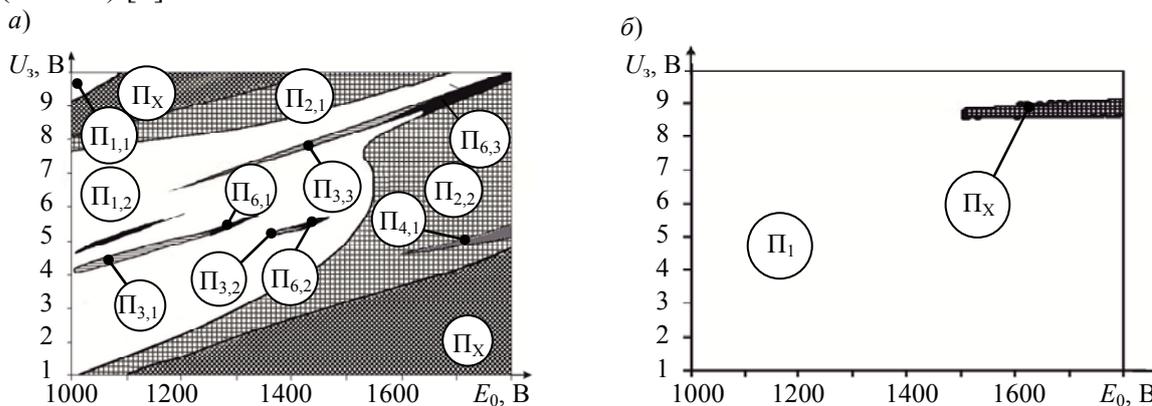


Рис. 2

При построении карт динамических режимов (см. рис. 2) авторы выбрали достаточно большой коэффициент усиления регулятора  $\alpha=60$ , что позволяет оценить возможности рассматриваемой СУ при работе системы в сложных условиях. Как видно из рис. 2, а, область 1-цикла системы без управления нелинейной динамикой является неодносвязной и ее площадь относительно мала. На рис. 2, б представлена карта динамических режимов, построенная для системы автоматического управления на основе МНЦ. Анализ рис. 2, б показывает, что область 1-цикла ( $\Pi_1$ ) существенно увеличилась по сравнению с областью 1-цикла на рис. 2, а. В частности, при  $E_0 < 1500$  В во всем диапазоне изменения напряжения задания в системе присутствует устойчивый 1-цикл. При  $E_0 > 1500$  В и при  $U_3 > 8$  В на карте появляются области хаотических колебаний, площадь которых относительно невелика. Таким образом, можно сделать вывод, что использование МНЦ позволило существенно улучшить нелинейные динамические свойства системы, при этом коэффициент усиления пропорционального регулятора остался неизменным, что позволяет в данном случае сохранить заданную статическую ошибку  $U_{\text{ош}}$ .

**Заключение.** В работе предложена структура нейросетевой системы управления нелинейной динамикой непосредственного понижающего преобразователя на основе метода направления на цель. Использование разработанной системы управления позволит отказаться от параметрического синтеза при обеспечении заданных нелинейных динамических свойств системы и достичь требуемых показателей быстродействия и точности стабилизации выходного напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северис Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.
2. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1992. № 8. С. 47—53.
3. Dragan F. Controlling a chaotic behavior of a Current Mode Controlled Boost Converter Using Ott-Grebogy-Yorke Method // IEEE Intern. Conf. on Automation, Quality and Testing. 2006. Vol. 1. P. 156—172.
4. Batlle C., Fossas E., Olivar G. Stabilization of periodic orbits of the buck converter by time-delayed feedback // Intern. J. of Circuit Theory and Applications. 1999. Vol. 27, N 3. P. 617—631.
5. Franco D., Liz E. A two-parameter method for chaos control and targeting in one-dimensional maps // Intern. J. of Bifurcation and Chaos. 2011. Vol. 23, N 1. P. 1—11.
6. Бодянский Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: Телетех, 2001. 369 с.

*Сведения об авторах*

- Алексей Иванович Андриянов** — канд. техн. наук, доцент; Брянский государственный технический университет, кафедра электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем; E-mail: ahaos@mail.ru
- Никита Александрович Краснов** — аспирант; Брянский государственный технический университет, кафедра электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем; E-mail: nike\_borzoy@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
электронных, радиоэлектронных и  
электротехнических систем

Поступила в редакцию  
15.05.13 г.

УДК 681.5.01:681.537

А. А. АБДУЛЛИН, Н. А. ПОЛЯКОВ

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ТРЕХФАЗНОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрен метод синтеза системы фазовой автоподстройки частоты с использованием формализма пространства состояний. Трехфазный активный выпрямитель напряжения с синтезированной системой фазовой автоподстройки частоты позволяет осуществить компенсацию реактивной составляющей мощности и скорректировать форму тока в фазах питающей сети.

*Ключевые слова:* активный выпрямитель напряжения, фазовая автоподстройка частоты, регулятор состояния, наблюдатель пониженной размерности.

**Введение.** Активный выпрямитель напряжения (АВН) представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами, обращенный на сторону сети переменного тока, а также обеспечивающий двунаправленный обмен энергии между питающей сетью и потребителем [1]. Наиболее распространенными способами управления АВН являются синусоидальная широтно-импульсная модуляция и векторное управление с преобразованием координат. Для достижения энергетической эффективности преобразователями на основе трехфазных АВН на их систему управления возлагается ряд задач, решение которых связано с необходимостью нахождения фазы или фазовой синхронизации. Одной из таких задач является коррекция коэффициента мощности путем формирования сигнала задания синусоидальной формы, синфазного с напряжением в фазе питающей сети для контура тока системы управления АВН. С этой целью в информационной подсистеме преобразователя необходимо обеспечивать фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) для синхронизации с фазой и частотой первой гармоники фазового напряжения [2]. С учетом неидеального характера питающей сети критерием для выбора полосы пропускания на выходе ФАПЧ в системе управления АВН должно быть соответствие требованиям ГОСТ гармонического состава сигнала задания для тока.

Построение системы ФАПЧ не является принципиально новой задачей. Такие системы используются в системах передачи данных для обеспечения синхронной работы приемной и передающей аппаратуры. Однако синтез ФАПЧ осуществляется с использованием передаточных функций [3]. Особенностью предлагаемой методики построения системы ФАПЧ является применение метода пространства состояний. Это позволяет в максимальной степени использовать математические пакеты прикладных программ (MATLAB, MathCad и др.), обеспечивая высокую эффективность процедуры проектирования.

**Описание структуры ФАПЧ.** Функциональная схема типовой системы ФАПЧ представлена в работе [3]. Система включает в себя фазовый дискриминатор (ФД), фильтр низких частот (ФНЧ), управляемый генератор (УГ) и устройство управления (УУ) — регулятор, придающий системе желаемые динамические свойства. Также на УУ поступает так называемая уставка по частоте, или начальная частота генератора. Введение уставки  $\omega_r$  уменьшает рассогласование по частоте и улучшает условия захвата.

Фазовый дискриминатор выполняет сравнение фаз  $\varphi_c$  входного сигнала, в рассматриваемом случае — сигнал питающей сети с частотой 49—51 Гц, и выходного сигнала  $\varphi_g$ , генерируемого УГ. Простейший ФД представляет собой блок произведения сигналов сети и генератора. Пусть сигналы питающей сети и УГ соответственно представлены уравнениями

$$\left. \begin{aligned} u_c(t) &= U_c \sin(\omega_c t), \\ u_g(t) &= U_g \cos(\omega_g t) = U_g \cos((\omega_c - \delta)t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\omega_c$  — частота сети, рад/с, а частота УГ отличается от частоты сети на величину  $\delta$ .

Тогда произведение этих сигналов описывается выражением:

$$u_c(t)u_g(t) = K_d (\sin(\delta t) + \sin((2\omega_c - \delta)t)), \quad (2)$$

где  $K_d = \frac{U_c U_g}{2}$  — коэффициент усиления фазового дискриминатора.

ФНЧ, в качестве которого может выступать апериодическое звено первого порядка с постоянной времени  $T_f$ , подавляет составляющую сигнала двойной частоты. Низкочастотная составляющая сигнала с ФД при малых значениях аргумента равна разности фаз  $\delta t$ .

Неуправляемый генератор синусоидального воздействия описывается однородным дифференциальным уравнением (3) с начальными условиями  $f_0$ :

$$\frac{d^2 f}{dt^2} + \omega_g^2 f = 0. \quad (3)$$

Начальные условия  $f_0$  дифференциального уравнения (3) определяют амплитуду и фазу воздействия. В УГ синусоидальных воздействий частота генератора  $\omega_g$  формируется системой управления. Изменяя частоту генератора, можно добиться синфазности с сигналом сети.

**Синтез системы управления УГ.** На рис. 1 представлена расчетная схема системы ФАПЧ. При переходе к расчетной схеме модель УГ заменяется интегратором, так как в установившемся режиме входом генератора является постоянная частота, а выходом — гармоническая функция, характеризующаяся линейно изменяющейся фазой, следовательно, фаза колебаний является интегралом частоты. В такой системе для получения нулевого значения установившейся ошибки по фазе необходимо обеспечить астатизм второго порядка, поэтому в канал прямой связи последовательно с апериодическим звеном введен дополнительный интегратор с переменной  $x_2$  на выходе.

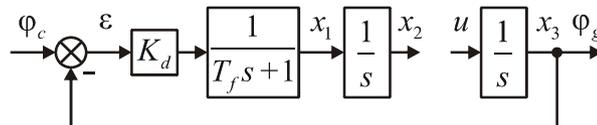


Рис. 1

Эта расчетная схема описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{T_f} x_1 + \frac{K_d}{T_f} \varepsilon, \\ \dot{x}_2 &= x_1, \\ \dot{x}_3 &= u, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\varepsilon = \varphi_c - x_3$ .

Представим управляющий сигнал  $u$  на входе УГ как разность  $u = \omega_c - \beta$ , где  $\beta$  — добавка по управлению. Произведем замену переменной по формуле  $x_3 = \varphi_c - \varepsilon$ , тогда (4) преобразуется к виду

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{T_f} x_1 + \frac{K_d}{T_f} \varepsilon, \\ \dot{x}_2 &= x_1, \\ \dot{\varepsilon} &= \omega_c - \dot{x}_3 = \beta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для полученной системы синтезируем регулятор состояния

$$\beta = -\mathbf{K}\mathbf{x}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{K} = [K_1 \quad K_2 \quad K_3]$ , а  $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \varepsilon]^T$ .

Методика расчета коэффициентов матрицы  $\mathbf{K}$  приводится в работах [4, 5]. Возвратившись к переменной  $x_3$ , получим расчетную схему ФАПЧ с регулятором состояния (рис. 2).

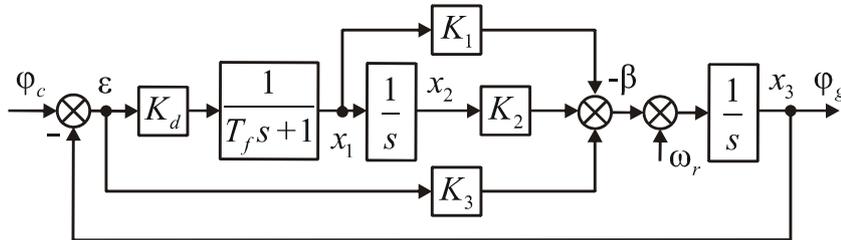


Рис. 2

Ошибка по фазе не поддается непосредственному измерению, для ее оценки может быть использован наблюдатель пониженной размерности [6].

Преобразуем закон управления (6) следующим образом:

$$-\mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{N}_1 \mathbf{y}(t) + \mathbf{N}_2 \tilde{\mathbf{w}}(t), \quad (7)$$

где  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$  — вектор измеряемых переменных состояния,  $\tilde{\mathbf{w}}(t) = \mathbf{T}\mathbf{x}(t)$  — вектор оцениваемых переменных состояния, матрица  $\mathbf{T}$  пока неизвестна.

Уравнение (7) справедливо при любых  $\mathbf{x}(t)$ , если

$$-\mathbf{K} = \mathbf{N}_1 \mathbf{C} + \mathbf{N}_2 \mathbf{T} = [\mathbf{N}_1 \quad \mathbf{N}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

отсюда

$$[\mathbf{N}_1 \quad \mathbf{N}_2] = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix}^{-1}.$$

Следовательно, закон (7) может быть выполнен после определения матрицы  $\mathbf{T}$ .

Уравнение состояния наблюдателя пониженной размерности имеет следующий вид:

$$\dot{\tilde{\mathbf{w}}} = \mathbf{A}_H \tilde{\mathbf{w}} + \mathbf{B}_H \beta + \mathbf{R}_H \mathbf{y}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{B}_H = \mathbf{T}\mathbf{B}$  — матрица входа наблюдателя по управлению.

Матрица состояния наблюдателя  $\mathbf{A}_H$  должна быть гурвицевой, ее порядок соответствует числу наблюдаемых переменных. Матрица входа наблюдателя по измеряемым переменным  $\mathbf{R}_H$  выбирается из условия управляемости наблюдателя.

Матрица  $\mathbf{T}$  находится в результате решения уравнения Сильвестра [6]:

$$\mathbf{T}\mathbf{A} - \mathbf{A}_H \mathbf{T} = \mathbf{R}\mathbf{C}.$$

Теперь подставим выражение (7) в (9) и получим новое уравнение состояния наблюдателя (10), на вход которого уже не подается сигнал управления

$$\dot{\tilde{w}} = F_H \tilde{w} + L_H y, \tag{10}$$

где  $F_H = A_H + B_H N_2$ ,  $L_H = R_H + B_H N_1$  — новые матрицы состояния и входа по измеряемым переменным состояния.

Итоговая функциональная схема системы ФАПЧ примет вид, представленный на рис. 3.

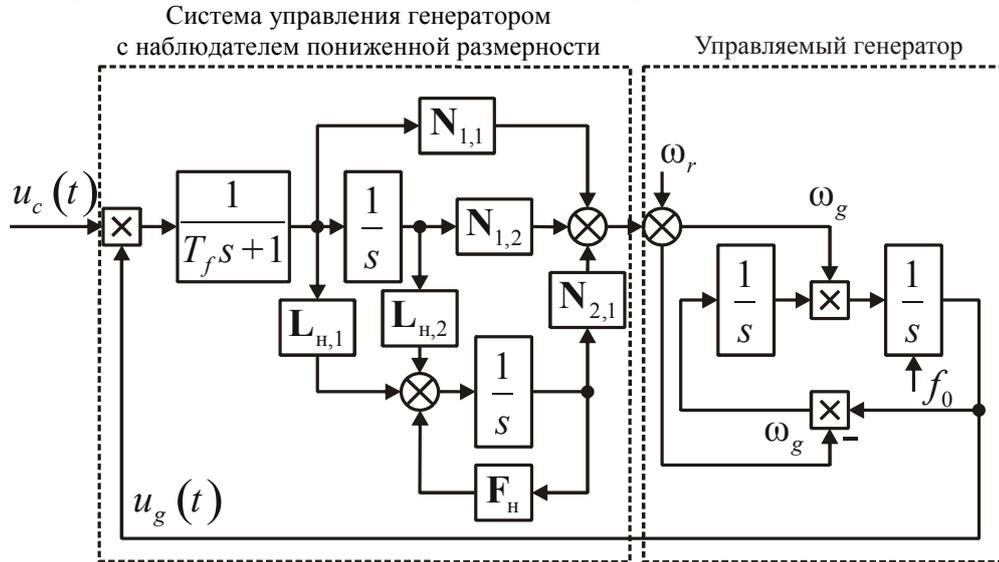


Рис. 3

**Результаты моделирования.** Постоянная времени ФНЧ  $T_f$  выбиралась исходя из требования подавления высшей гармонической составляющей с частотой 100 Гц. Уставка в нашем случае равна эталонной частоте промышленной сети 50 Гц.

В системе ФАПЧ при увеличении полосы пропускания уменьшается время переходного процесса. При этом повышается чувствительность ФАПЧ к высшим гармоникам в напряжении питающей сети, следовательно, возрастает ошибка. Синтезированная система ФАПЧ удовлетворяет этому требованию при полосе пропускания 50 рад/с и обеспечивает захват фазы через 0,18 с, т.е. за 9 периодов напряжения питающей сети.

На рис. 4, а приведен график угловой ошибки на выходе ФАПЧ. Из графика следует, что система синхронизируется с сигналом на входе за 0,18 с; в виде гистограммы (рис. 4, б) представлен гармонический состав входного и выходного сигналов ФАПЧ (до 11 гармоники). Синтезированная система ФАПЧ формирует на основе неидеального сигнала сетевого напряжения сигнал задания для тока с подавлением высших гармоник.

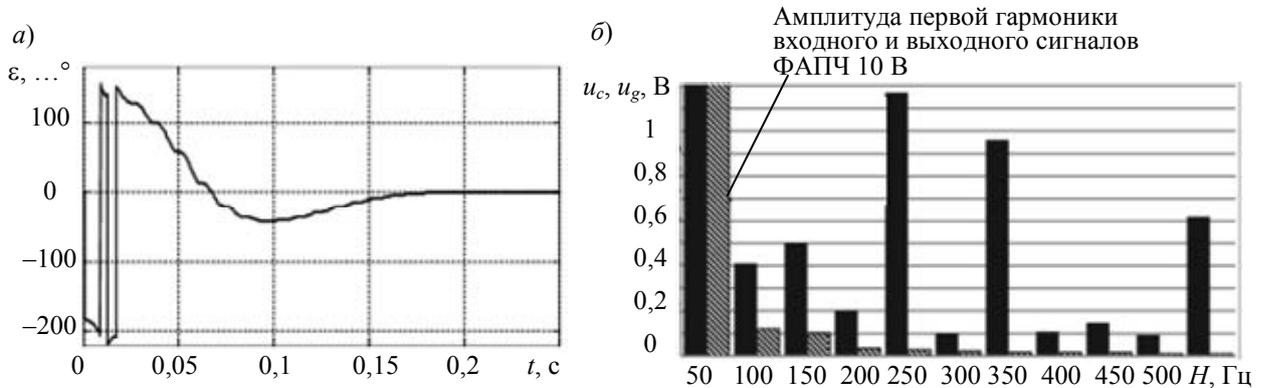


Рис. 4

Для моделирования трехфазного АВН с синтезированной системой ФАПЧ была использована модель, аналогичная описанной в работе [2]. АВН вступает в работу в момент  $t = 0,16$  с.

Процесс фазовой синхронизации приведен на рис. 5, а для фазы А питающей сети, где 1 — кривая напряжения фазы  $U_a$ , 2 — кривая тока фазы  $I_a$ , 3 — выходной сигнал системы ФАПЧ для этой фазы  $u_{ga}$ . Время синхронизации составляет 0,18 с, процесс синхронизации не отличается от приведенного на рис. 4. На рис. 5, б приведены переходные процессы на конденсаторе в звене постоянного тока активного выпрямителя (кривая 1 — график тока  $I_{zpt}$ , 2 — напряжения  $U_{zpt}$ ). Графики полной мощности и ее активной и реактивной составляющей приведены на рис. 5, в—д. По окончании переходного процесса после включения АВН реактивная мощность системы  $Q$  снижается до уровня менее 10 % от первоначального, активная мощность системы  $P$  практически равна полной мощности системы  $S$ .

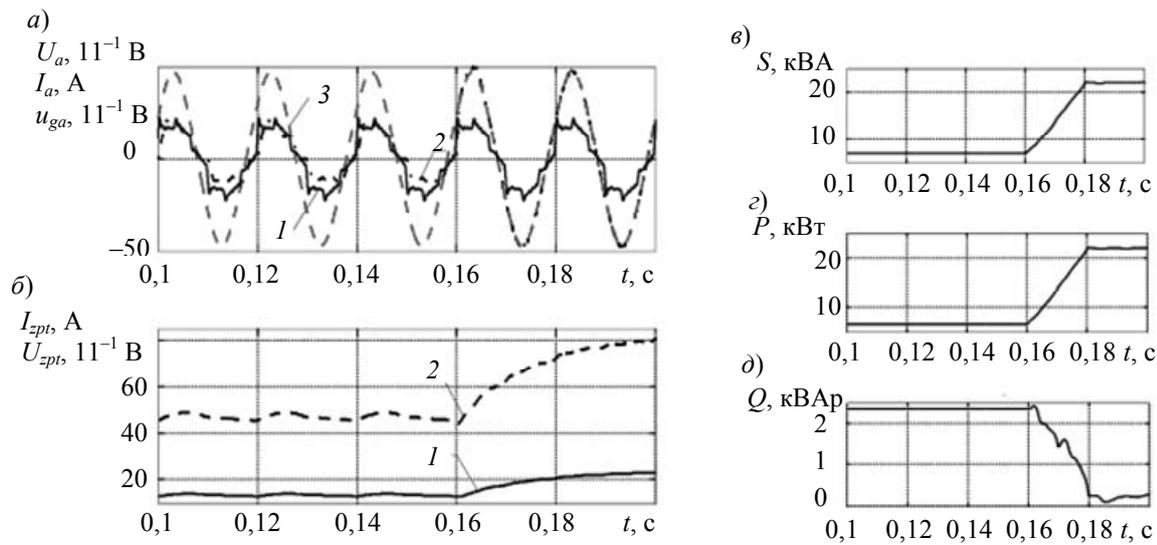


Рис. 5

**Закключение.** Трехфазный активный выпрямитель с синтезированной с использованием формализма пространства состояний системой ФАПЧ позволяет осуществлять компенсацию реактивной составляющей мощности и корректировать форму тока в фазах питающей сети. Синтезированная система ФАПЧ способна подавлять высшие гармоники входного сигнала при полосе пропускания 50 рад/с и меньше.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов П. А., Седнев А. К. Математическое моделирование электропривода постоянного тока с активным выпрямителем // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (61). С. 35—41.
2. Поляков Н. А., Борисов П. А. Синхронизация трехфазных активных выпрямителей напряжения с питающей сетью // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 4 (80). С. 55—60.
3. Григорьев В. В., Дроздов В. Н., Сабинин Ю. А. и др. Импульсные системы фазовой автоподстройки частоты. Л.: Энергоатомиздат, 1982. 88 с.
4. Абдуллин А. А., Дроздов В. Н. Синтез алгоритма управления прецизионного следящего электропривода // Тр. VII Междунар. (VIII Всероссийской) науч.-техн. конф. по автоматизированному электроприводу. Иваново, 2012. С. 208—212.
5. Абдуллин А. А., Дроздов В. Н. Анализ робастности неадаптивной системы управления электропривода с вариациями структуры и параметров // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 40—44.
6. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.

**Сведения об авторах**

- Артур Александрович Абдуллин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: artur.abdullin@gmail.com
- Николай Александрович Поляков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: polyakov.ets.itmo@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
электротехники и прецизионных  
электромеханических систем

Поступила в редакцию  
17.06.13 г.

УДК 681.511.4; 629.78.054.623

С. В. Лучко, С. Ю. Балувев, М. А. Ватутин, Ю. А. Кузьмичев,  
А. И. Ключников, В. П. Ефимов

## ТОЧНОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕЛИНЕЙНОГО ЗВЕНА ДЛЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Даны рекомендации по минимизации влияния отклонений от номинального значения параметров применяемых радиоэлементов для снижения погрешности измерений.

**Ключевые слова:** датчики, автоколебательный режим, погрешность измерения ускорения, акселерометр, возмущение.

Одним из способов снижения погрешности измерений с помощью серийного маятникового акселерометра является обеспечение работы его чувствительного элемента (подвижной массы) в режиме автоколебаний [1] путем введения в схему нелинейного звена (НЗ).

Электромеханическая часть маятникового акселерометра в первом приближении является системой второго порядка. Возникновение автоколебаний в такой системе обеспечивает введение нелинейности типа „петля гистерезиса“ [2], характеристика которой приведена на рис. 1.

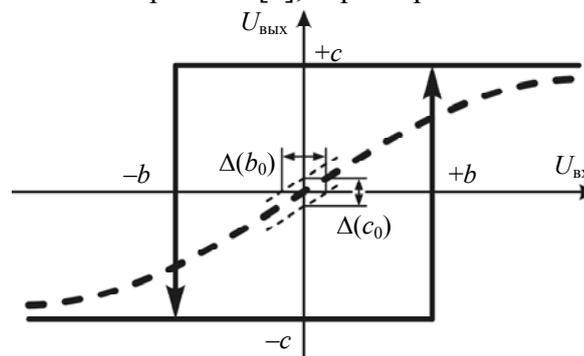


Рис. 1

Нелинейное звено характеризуется двумя параметрами — выходным уровнем сигнала  $\pm c$  и порогом срабатывания  $\pm b$ . Их нестабильность приводит к смещению характеристики от нулевого значения на  $\Delta(c_0)$  и  $\Delta(b_0)$  соответственно и повышению погрешности выполняемых измерений. Очевидно, что для снижения погрешности и увеличения стабильности производимых измерений необходимо уменьшать отклонение параметров нелинейного звена  $b$  и  $c$  от их номинальных значений.

Реализовать характеристику „петля гистерезиса“ на электронных компонентах наиболее удобно при помощи операционного усилителя (ОУ) DA и двуханодного стабилитрона VD (рис. 2) по схеме триггера Шмитта (здесь  $R_6$  — балластное сопротивление параметрического стабилитрона).

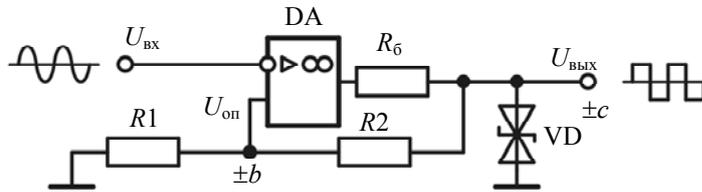


Рис. 2

В нелинейном звене формируются напряжения  $U_{\text{вых}}$  и  $U_{\text{оп}}$ , которые по сути являются параметрами  $\pm c$  и  $\pm b$  соответственно.

На неинвертирующий вход ОУ поступает напряжение  $U_{\text{вх}}$ , значение которого пропорционально углу отклонения маятника, оно сравнивается с опорным  $U_{\text{оп}}$ , на выходе НЗ формируется дискретный сигнал  $U_{\text{вых}}$  прямоугольной формы.

Величина опорного напряжения  $U_{\text{оп}}$  зависит от параметров каждого элемента, используемого в нелинейном звене:

$$U_{\text{оп}} = F(R1, R2, U_{\text{ст}}, U_{\text{см}}),$$

где  $U_{\text{ст}}$  — напряжение стабилизации стабилитрона;  $U_{\text{см}}$  — напряжение смещения операционного усилителя, и определяется следующим выражением:

$$U_{\text{оп}} = \frac{R2}{R1 + R2} U_{\text{ст}} + U_{\text{см}}. \quad (1)$$

Использование элементов с параметрами, отличными от расчетных, приводит к отклонению  $\Delta(U_{\text{оп}}^*)$  опорного напряжения от расчетной величины  $U_{\text{оп}}^*$ :

$$U_{\text{оп}} = U_{\text{оп}}^* + \Delta(U_{\text{оп}}^*). \quad (2)$$

У любого радиоэлемента отклонение от номинального значения  $\Pi_{\text{ном}}$  параметра  $\Pi$  можно разделить на статическое  $\Delta_c(\Pi)$  (разброс значения параметра, неизменно во времени) и динамическое  $\Delta_d(\Pi)$  (дрейф значения параметра во времени):

$$\Pi = \Pi_{\text{ном}} + \Delta_c(\Pi) + \Delta_d(\Pi). \quad (3)$$

Статическое отклонение параметра  $\Delta_c(\Pi)$  относится к систематической погрешности. Погрешность, вызванную отклонением параметра  $\Delta_c(\Pi)$ , можно учесть при изготовлении и калибровке измерительного прибора.

Значение отклонения параметра  $\Delta_d(\Pi)$  изменяется в процессе эксплуатации радиоэлемента, что приводит к погрешности функционирования электронного блока, в состав которого входит элемент.

Для нелинейного звена (см. рис. 2) значение дрейфа  $\Delta_d(\Pi)$  зависит от следующих элементов:

- операционный усилитель — дрейф напряжения смещения  $\Delta(U_{\text{см}})$  [4];
- стабилитрон — температурный коэффициент напряжения (ТКН) [5];
- резистор — температурный коэффициент сопротивления [6].

Отклонение опорного напряжения при произвольных значениях сопротивлений резисторов  $R1$  и  $R2$  определяется следующим образом [3]:

$$\Delta(U_{\text{оп}}^*) = \frac{\partial F}{\partial R1} \Delta(R1) + \frac{\partial F}{\partial R2} \Delta(R2) + \frac{\partial F}{\partial U_{\text{ст}}} \Delta(U_{\text{ст}}) + \frac{\partial F}{\partial U_{\text{см}}} \Delta(U_{\text{см}}). \quad (4)$$

Взяв частные производные, получим

$$\Delta(U_{\text{оп}}^*) = -\frac{R2}{(R1+R2)^2} \Delta(R1)U_{\text{ст}} + \frac{R1}{(R1+R2)^2} \Delta(R2)U_{\text{ст}} + \frac{R2}{R1+R2} \Delta(U_{\text{ст}}) + 1\Delta U_{\text{см}}.$$

Подведя выражение под общий знаменатель, окончательно получим:

$$\Delta(U_{\text{оп}}^*) = \frac{(R1\Delta(R2) - R2\Delta(R1))U_{\text{ст}}}{(R1+R2)^2} + \frac{R2\Delta(U_{\text{ст}})(R1+R2) + \Delta(U_{\text{см}})(R1+R2)^2}{(R1+R2)^2}. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что наибольшее влияние на отклонение опорного напряжения (с коэффициентом  $(R1+R2)^2$ ) оказывает дрейф напряжения смещения операционного усилителя  $\Delta(U_{\text{см}})$ . В меньшей степени (с коэффициентом  $R2(R1+R2)$ ) влияние оказывает ТКН стабилитрона.

Интересен случай  $\Delta(R1)=\Delta(R2)$ . Если предположить, что у резисторов  $R1$  и  $R2$  отклонение от номинального значения будет совпадать с высокой степенью точности, то выражение (5) примет вид

$$\Delta(U_{\text{оп}}^*) = \frac{R2\Delta(U_{\text{ст}}) + \Delta U_{\text{см}}(R1+R2)}{(R1+R2)}.$$

Промышленностью выпускаются сборки резисторов и делители напряжения [6]. Введем обозначение  $R1=R2=R$ , тогда:

$$\Delta(U_{\text{оп}}^*) = \frac{R[\Delta(U_{\text{ст}}) + 2\Delta(U_{\text{см}})]}{2R} = 0,5[\Delta(U_{\text{ст}}) + 2\Delta(U_{\text{см}})]. \quad (6)$$

Отсюда следует, что на значение отклонения опорного напряжения  $\Delta(U_{\text{оп}}^*)$  и погрешность измерения маятникового акселерометра наибольшее влияние оказывают дрейф напряжения смещения операционного усилителя  $\Delta(U_{\text{см}})$  и ТКН стабилитрона.

Делитель напряжения  $R1R2$  в типовом нелинейном звене (см. рис. 2) применяется в случаях, когда и напряжение питания  $\pm U_{\text{пит}}$  (на схеме не показано), и напряжение стабилизации стабилитрона  $\pm U_{\text{ст}}$  имеют относительно высокие значения — до  $\pm 15$  В и  $\pm (7-9)$  В соответственно, а опорное напряжение  $\pm U_{\text{оп}}$  должно иметь значение 1—5 В. При наличии низковольтного стабилитрона делитель напряжения  $R1R2$  из схемы можно исключить. В этом случае значение отклонения опорного напряжения  $\Delta(U_{\text{оп}}^*)$  будет определяться из выражения (6) без условий, предъявляемых к делителю напряжения  $R1R2$ .

Таким образом, для снижения погрешности измерений необходимо применять высокостабильные радиоэлементы, а также использовать схемотехнические решения как в линейном усилителе-преобразователе, так и в нелинейном звене, направленные на снижение их общего числа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучко С. В., Ватутин М. А. Компенсационный акселерометр в режиме автоколебаний // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 62.
2. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975.
3. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Е. М. Душина. Л.: Энергоатомиздат, 1987.

4. Операционные усилители и компараторы. Справочник. Т. 12. М.: Изд. дом „Додэка-XXI“, 2001.
5. Гитцевич А. Б., Зайцев А. А., Мокряков В. В. и др. Полупроводниковые приборы. Диоды выпрямительные, стабилитроны, тиристоры: Справочник. М.: КУБК-а, 1994. 528 с.
6. Дубровский В. В., Иванов Д. М., Пратусевич Н. Я. и др. Резисторы: Справочник. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

**Сведения об авторах**

- Сергей Викторович Лучко** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург
- Сергей Юрьевич Балугев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург
- Михаил Алексеевич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра бортовых информационных и измерительных комплексов, Санкт-Петербург
- Юрий Алексеевич Кузьмичев** — канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра автономных испытаний, Санкт-Петербург
- Алексей Игоревич Ключников** — 1-й ГИК, Архангельская обл., г. Мирный; старший инженер-испытатель
- Виталий Петрович Ефимов** — Военный институт (научно-исследовательский) Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник

Рекомендована кафедрой  
бортовых информационных и  
измерительных комплексов

Поступила в редакцию  
12.02.13 г.

---

---

# ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

---

---

УДК 681.7.013

С. М. Борзов, В. И. Козик, А. С. Феокистов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ КАМЕР

Проведено сравнение различных методов стендовой калибровки тепловизионных приемников, оценена стабильность их параметров. Показано, что выполнение коррекции непосредственно после калибровки позволяет достигать высокого качества изображений.

*Ключевые слова:* тепловизионный приемник, коррекция неоднородности, дефектные элементы.

**Введение.** Контрастность изображений, полученных в инфракрасной области излучения при комнатной температуре, довольно низка. Это накладывает жесткие требования к качеству тепловизионных приемников. Например, для достоверного распознавания объектов, температура которых различается на один градус, среднеквадратичное значение вариации чувствительности элементов не должно превышать 0,1—0,2 % [1]. Несмотря на успехи в создании фотоприемных матриц невозможно обеспечить выполнение требований к уровню шума, обусловленного неоднородностью темновых сигналов и чувствительностью элементов, а также наличием дефектов, только за счет совершенствования технологии их изготовления, поэтому требуется коррекция полученных изображений. Методы коррекции и калибровки, а также периодичность калибровки приборов зависят от специфики используемых фотоприемных матриц. Для устранения такого шума проводится стендовая калибровка прибора по опорным источникам. С этой целью используется выходной сигнал от двух и более источников для вычисления коэффициентов коррекции и восстановления входного изображения. Методы коррекции различаются числом используемых источников и типом кривых, аппроксимирующих передаточные характеристики ФПУ. Наиболее прост метод двухточечной коррекции, при котором поведение элемента описывается линейной моделью [3]. В действительности зависимость выходного сигнала от входного носит более сложный характер [4, 5], поэтому необходимо выбирать оптимальную аппроксимирующую кривую. В настоящей работе исследована эффективность коррекции матричных тепловизионных приемников на основе узкозонных твердых растворов кадмий—ртуть—теллур (КРТ) [2].

**Методы калибровки.** Для оценки необходимой степени нелинейности аппроксимирующей кривой исследовалась эффективность коррекции тепловизионных фотоприемных устройств на базе матричного КРТ-фотоприемника 320×256 элементов при аппроксимации передаточной функции полиномами различных степеней.

Для калибровки использовались наборы однородных тестовых изображений, полученные в результате съемки абсолютно черного тела (АЧТ) исследуемым прибором. Каждый набор изображений включает серии по 100 кадров для заданных значений температуры АЧТ.

Изображения получены для характерного рабочего диапазона температур — от 10 до 60 °С. Чтобы исследовать временную стабильность коррекции, испытания проводились в течение как одного сеанса работы прибора, так и нескольких (в разные дни).

Перед калибровкой элементов ФПУ проводился поиск дефектных элементов. Можно разделить дефекты путем сравнения соответствующей характеристики (темновой сигнал, чувствительность, шум) с некоторым пороговым значением.

Целесообразно отсекают дефектные по темновым сигналам и чувствительности элементы, чтобы сигналы оставшихся элементов укладывались в диапазон оцифровки АЦП в рабочем диапазоне температур, т.е.

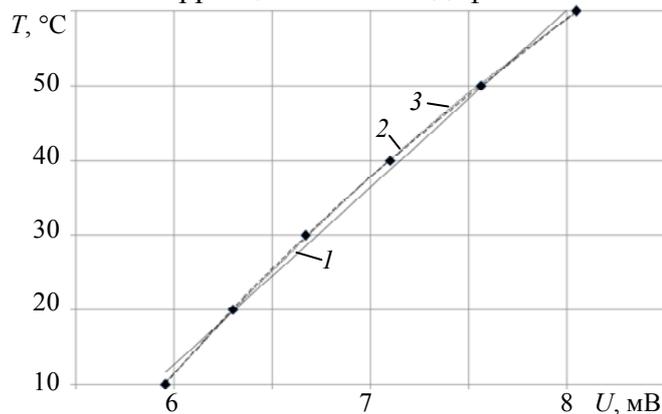
$$U_t (1 + P_t) + \Delta U (1 + P_{\Delta U}) \leq U_{\max},$$

где  $U_t$  — средний темновой сигнал,  $\Delta U$  — средняя разность максимальных и минимальных сигналов для рабочего диапазона температур,  $P_t$  и  $P_{\Delta U}$  — пороговые значения (в процентах) для темнового сигнала и разности сигналов соответственно,  $U_{\max}$  — верхняя граница диапазона АЦП. Поэтому в общем случае условия дефектности по темновым сигналам и чувствительности должны зависеть от характеристик ФПУ — средних значений темновых и максимальных сигналов, разрядности АЦП.

Для определения среднего значения темновых сигналов при температуре АЧТ 10° С считывалась серия кадров, по каждому из них выполнялась медианная фильтрация с целью устранения влияния дефектных элементов, после чего вычислялся усредненный по серии массив, по которому определялось среднее значение выходного сигнала. Аналогичная процедура выполнялась при температуре АЧТ 60 °С для определения максимальных сигналов. У исследуемого прибора  $U_t \approx 6 \cdot 10^3$ , а  $\Delta U \approx 2,2 \cdot 10^3$ . Разрядность АЦП составляла 14, т.е.  $U_{\max} \approx 16 \cdot 10^3$  градаций. Приняв  $P_t = P_{\Delta U} = P$ , чтобы не выйти за диапазон оцифровки АЦП, получаем  $P_{\max} \approx 95$  %. Дефектным считался элемент, темновой сигнал или чувствительность которого превышала средний на 90 % или чувствительность была ниже средней на 50 %.

Дефектные элементы по шуму определялись из условия обеспечения требуемого разрешения (рассчитывалась эквивалентная шуму разность температур — NETD). Величина порога составляла 50 % от среднего значения.

Чтобы избежать влияния дефектов на оценку работы алгоритмов калибровки, при выполнении коррекции значения дефектных элементов заменялись на средние по полю.



Для сравнения использовались линейная, квадратичная и кубическая аппроксимации. Каждый из 100 кадров пересчитывался с использованием аппроксимирующих полиномов в эквивалентное температурное поле, результат усреднялся ( $\bar{u}$ ). Примеры различных вариантов аппроксимации динамической характеристики элемента приведены на рисунке (1 — линейная, 2 — квадратичная, 3 — кубическая аппроксимация). Кривые для квадратичной и кубической аппроксимаций практически сливаются. Достоверность для

линейной, квадратичной и кубической аппроксимации составила соответственно

$$R_1^2 = 0,9948, R_2^2 = 0,9991 \text{ и } R_3^2 = 0,9998,$$

$$\text{где } R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2, SST = \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}.$$

В табл. 1 представлены результаты коррекции при разных методах аппроксимации, приведены СКО ( $\delta$ ) по матрице, а в последней строке — средняя ошибка ( $\bar{\Delta}$ ) и среднее СКО ( $\bar{\delta}$ ) по всем значениям температуры. Видно, что квадратичная аппроксимация обеспечивает существенно меньшее среднее значение ошибки, чем линейная. Более высокая степень аппроксимации не приводит к существенному снижению ошибки. Квадратичная аппроксимация по сравнению с линейной дает выигрыш более чем в 8 раз, а кубическая по сравнению с квадратичной — примерно на 20 %. Если учесть соотношение вычислительных затрат, можно сделать вывод о предпочтительности использования полинома 2-й степени, хотя при этом разброс значений по различным элементам примерно в два раза больше, чем при использовании полинома 3-й степени.

Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	Линейная аппроксимация		Квадратичная аппроксимация		Кубическая аппроксимация	
	$\bar{U}$	$\delta$	$\bar{U}$	$\delta$	$\bar{U}$	$\delta$
10	11,45	0,60	10,03	0,11	9,93	0,05
20	19,77	0,16	20,07	0,17	20,19	0,12
30	28,64	0,56	29,77	0,16	29,83	0,12
40	38,93	0,62	40,07	0,24	40,01	0,14
50	49,90	0,25	50,16	0,38	50,06	0,31
60	61,31	0,67	59,88	0,66	59,98	0,11
$\bar{\Delta}, \bar{\delta}$	<b>0,92</b>	<b>0,48</b>	<b>0,11</b>	<b>0,29</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>

**Стабильность качества коррекции.** Коррекция неоднородности и замещение дефектов позволяют существенно повысить качество изображения. Однако серьезную проблему представляет временная нестабильность элементов ФПУ, которую можно разделить на два типа. К первому относятся СКО, рассчитанные по последовательности кадров, полученных в результате одного сеанса измерений (как отмечалось, элементы с высоким значением СКО можно определить как дефектные по шуму). Ко второму типу относится изменение характеристик от сеанса к сеансу.

Для оценки стабильности характеристик определялись ухудшение качества коррекции и изменение маски дефектных элементов. Чтобы оценить изменение качества коррекции, как реперное использовалось среднее значение NETD отдельных элементов по матрице в целом, при этом усреднение проводилось по серии для каждого значения температуры и по различным тепловым полям. Ниже приведен разброс сигналов элементов ФПУ при однородной заливке при различных сеансах. Как видно, из-за изменения параметров погрешность увеличивается примерно в три раза.

#### Разброс сигналов

Без коррекции.....	30—60 NETD
Коррекция неоднородности после расчета коэффициентов.....	<1,7 NETD
Коррекция неоднородности через сутки.....	3—4 NETD

В табл. 2 отображено число дефектных элементов по темновому сигналу, чувствительности и шуму для разных сеансов измерений.

Таблица 2

Элементы	Первый день	Второй день	Третий день
Дефектные по темновому сигналу, шт.	3761	3590	3349
Дефектные по чувствительности, шт.	2111	2378	968
Дефектные по СКО, шт.	668	510	493
Не совпавшие по темновому сигналу, шт.	1099		
Не совпавшие по чувствительности, шт.	2063		
Не совпавшие по СКО, шт.	253		

**Заключение.** Традиционные процедуры коррекции, такие как устранение неоднородности чувствительности и замещение дефектных элементов, позволяют достигать высокого качества изображений при их применении непосредственно после выполнения калибровки. Показано, что вполне оправданно использование квадратичной аппроксимации, обеспечивающей погрешность измерений по матрице менее 1,7 NETD. Более высокая степень аппроксимации не приводит к существенному снижению ошибки приближения.

Существенное влияние на качество получаемых изображений оказывает временная изменчивость параметров элементов ФПУ. Погрешность измерений, выполненных через сутки после осуществления процедуры калибровки, увеличивается до 3—4 NETD. Кроме того, большое влияние на качество изображений оказывают дефектные элементы. При этом существуют дефектные элементы, которые не изменяют своих параметров от сеанса к сеансу, и элементы, проявляющие себя как дефектные лишь в некоторых сеансах. Элементы, дефектные по чувствительности, в различных сеансах практически не совпадают.

В связи со значительной временной нестабильностью параметров элементов необходимо использовать методы коррекции в „полевых“ условиях, позволяющие компенсировать изменение во времени значений чувствительности и темнового сигнала и определять и замечать дефектные элементы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 11-07-00202), Программы Президиума РАН (проект № 15.3) и Программы СО РАН (интеграционный проект № 74).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Friedenberg A., Goldblatt I.* Nonuniformity two-point lines correction errors in infrared focal plane arrays // *Opt. Eng.* 1998. N 37.
2. *Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г.* и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001.
3. *Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г.* Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004.
4. *Borovytsky V. N.* Residual error after non-uniformity correction // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2000. Vol. 3, N 1. P. 102—105.
5. *Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И.* Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2009. Т. 52, № 6. С. 11—17.

#### Сведения об авторах

- Сергей Михайлович Борзов** — канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск; заведующий лабораторией; E-mail: borzov@iae.nsk.su
- Виктор Иванович Козик** — канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск; старший научный сотрудник; E-mail: kozik@iae.nsk.su
- Артем Сергеевич Феоктистов** — Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирский государственный университет, кафедра автоматизация физико-технических исследований; инженер-программист; E-mail: feoktistov.artem@gmail.com

Рекомендована  
ИАиЭ СО РАН

Поступила в редакцию  
22.03.13 г.

Ю. В. БАЁВА, Е. В. ЛАПОВОК, С. И. ХАНКОВ

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА КРУГОВЫХ ОРБИТАХ

Получено аналитическое описание энергетического баланса изотермического сферического космического объекта с учетом высоты и угла наклона орбиты. Предложена методика, включающая определение интегральных коэффициентов облученности Землей и отраженным ею солнечным излучением. Разработана математическая модель для расчетов нестационарных температур таких объектов при попеременном заходе в тень Земли и выходе на освещенный Солнцем участок траектории.

**Ключевые слова:** космический объект, коэффициент облученности, тепловой режим, теплообмен излучением.

**Введение.** Определение нестационарных тепловых режимов космических объектов (КО) различного класса, например, космических аппаратов (КА), движущихся по разным траекториям вокруг Земли, является актуальной задачей. Расчет температурных полей реальных КА требует использования специальных программ расчетов. С точки зрения теории и практики очень важно исследовать общие закономерности формирования тепловых режимов идеализированных и обобщенных моделей КА, а именно КО простых типовых конфигураций.

Целями настоящей статьи являются разработка математической модели нестационарного теплового режима КО с учетом высоты и угла наклона орбиты, проведение расчетных исследований и получение на этой основе математической модели для тестирования более сложных расчетных программ. В качестве эталонной конфигурации принята сферическая форма КО. В математической модели особое внимание уделено циклограммам изменения интегральных коэффициентов облученности, которые ранее были введены без учета их изменения во времени на конкретных траекториях [1, 2].

**Тепловая модель космического объекта, параметры его траектории.** Для составления математической модели и получения аналитических формул для расчетов нестационарных температур КО введем ряд ограничений и допущений:

- рассматриваются круговые орбиты с различными углами наклона  $\beta$ , меньшими предельного значения  $\beta_0$ , т.е. орбиты, имеющие теневые участки;
- в расчетах Земля принимается изотермичным объектом с серой диффузной поверхностью; удельная мощность теплового излучения Земли принимается постоянной на ее теневой и освещенной Солнцем поверхностях, что соответствует общепринятой модели [1];
- в тепловом балансе КО не рассматриваются внутренние источники тепловыделений, тепловой режим КО формируется внешними тепловыми воздействиями: прямым солнечным излучением, собственным тепловым излучением Земли и отраженным ей солнечным излучением;
- поверхность КО, так же как и поверхность Земли, принимается серой и диффузной, при этом степени черноты и коэффициенты поглощения солнечного излучения не зависят ни от координат по поверхности, ни от температуры;
- пренебрегается рефракцией солнечного излучения при переходе КО через терминатор;
- рассчитывается среднеповерхностная температура КО в пренебрежении возможной температурной неравномерностью по поверхности и без учета его внутренней структуры, что соответствует либо сплошной структуре КО, либо оболочке с толстой стенкой из теплопроводного материала; такой подход соответствует принципу поэтапного моделирования,

согласно которому дальнейшая детализация температурных полей выполняется по результатам определения средних температур тел.

Схемы рассматриваемых траекторий КО представлены на рис. 1 ( $a$  — круговая траектория в направлении наблюдения от Солнца). Отрезок  $A'B'$  соответствует диаметру орбиты. Движение КО по круговой орбите  $AMB$ , которая вследствие ее наклона видна в виде эллиптической проекции. Подсвеченный участок траектории находится в пределах части эллипса  $NAM$ . Теневой участок траектории заключен в пределах части эллипса  $NBM$  и угла  $2\omega$ . На рис. 1,  $b$  представлен вид сбоку, теневая часть Земли выделена темным цветом, орбита видна как проекция  $A'O'B'$ , наклонение орбиты определяется углом  $\beta$ . Предельное значение угла наклона орбиты  $\beta_0$  соответствует величине угла наклона  $\beta$ , начиная с которого (при  $\beta > \beta_0$ ) КО никогда не заходит в тень Земли (рис. 1,  $в, г$ ).

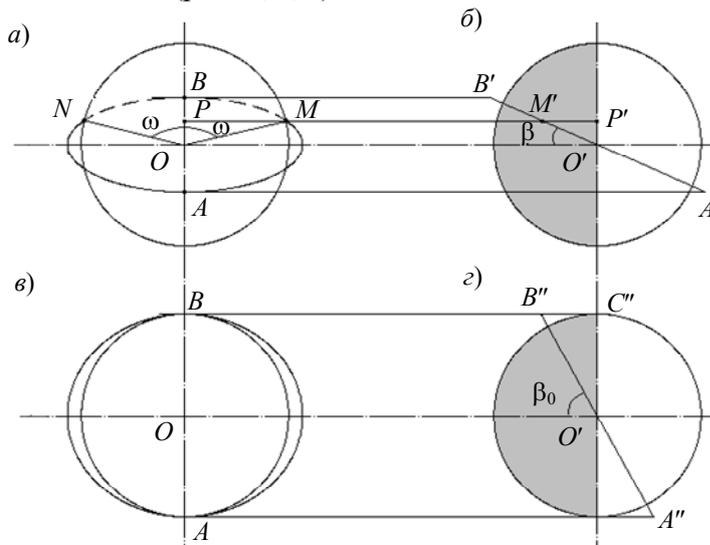


Рис. 1

Величину предельного угла нетрудно вычислить

$$\beta_0 = \arcsin \sqrt{\varphi_0} = \theta_0; \quad \varphi_0 = \left( \frac{R}{R+h} \right)^2, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус Земли;  $h$  — высота орбиты над поверхностью Земли;  $\varphi_0$  — коэффициент облученности Землей горизонтальной площадки, лежащей в плоскости местного горизонта (локальный коэффициент);  $\theta_0$  — половинный угол, под которым с КО видна Земля.

Период обращения КО вокруг Земли  $t_0$  зависит от высоты орбиты и описывается известным соотношением [3], которое для дальнейших расчетов удобно выразить через локальный коэффициент облученности  $\varphi_0$  в виде

$$t_0 = 2\pi \frac{(R+h)^{3/2}}{Rg^{1/2}} \approx 2 \frac{\sqrt{R}}{\varphi_0^{3/4}} = 5048 \varphi_0^{-3/4} \text{ с} = 84,1 \varphi_0^{-3/4} \text{ мин}, \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения.

Для учета времени нахождения КО на солнечном и теневом участках траектории необходимо определить угол  $2\omega$  (см. рис. 1). Из тригонометрических расчетов можно получить следующее соотношение:

$$2\omega = 2 \arcsin \left( \sqrt{\frac{\varphi_0 - \sin^2 \beta}{\varphi_0 (1 - \sin^2 \beta)}} \right) \text{ при } \beta < \beta_0. \quad (3)$$

С учетом (1) из (3) следует:  $\omega = 0$  при  $\beta = \beta_0$ . В диапазоне  $\beta_0 \leq \beta \leq \pi/2$  выполняется условие  $\omega = 0$ . При  $\beta > \pi/2$  принимается схема орбиты, симметричная горизонтальной оси на рис. 1. В этом случае отсчет угла  $\beta$  осуществляется зеркально схеме рис. 1, а.

При равномерном круговом движении КО время его нахождения в тени Земли  $t_1$  и на подсвеченном Солнцем участке траектории  $t_2$  может быть определено использованием схемы рис. 1 и соотношения (3):

$$t_1 = 0,5(1-n)t_0; \quad t_2 = 0,5(1+n)t_0; \quad n = \sqrt{\frac{1-\varphi_0}{1-\sin^2\beta}}. \quad (4)$$

Оценим время нахождения КО в тени и на Солнце. При высоте орбиты  $h = 600$  км ( $\beta_0 = 66^\circ$ ) и наклонении орбиты  $\beta = 30^\circ$  получим  $\varphi_0 = 0,835$ ,  $\omega = 75,13^\circ$ ,  $n = 0,469$  и  $t_1 = 0,2655t_0$ ,  $t_2 = 0,7345t_0$ , при периоде обращения  $t_0 = 96,3$  мин  $t_1 = 25,6$  и  $t_2 = 70,7$  мин.

**Тепловой баланс объекта в околоземном космическом пространстве.** Из уравнений теплового баланса КО определяется его нестационарная среднеповерхностная температура, равная среднеобъемной для изотермического КО. В тепловом балансе должны быть учтены постоянная составляющая теплового потока от подсветки Земли, а также конкретная, зависящая от параметров орбиты, циклограмма изменения во времени прямой солнечной засветки и отраженного Землей солнечного излучения.

Уравнение теплового баланса КО (уравнение нестационарного теплообмена) может быть представлено в виде

$$C_s \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon(1-\varphi_s)\sigma T^4 = Q_\Sigma, \quad (5)$$

$$C_s = c_0 V/S = c_0 L; \quad c_0 = c\gamma,$$

$$Q_\Sigma = \varepsilon \varphi_s Q + \alpha_s A E \varphi_{ks} + \alpha_s E \Phi f,$$

где  $T$  — среднеповерхностная температура КО;  $C_s$  — поверхностная плотность полной теплоемкости КО;  $c_0$ ,  $c$ ,  $\gamma$  — соответственно объемная и удельная теплоемкость и плотность материала КО;  $\varepsilon$  — степень черноты поверхности;  $V$  — объем КО, за исключением пустот в его теле, для сферической оболочки он равен объему самой оболочки;  $S$  — площадь наружной поверхности КО;  $L$  — определяющий размер КО, для сферической оболочки  $L = \Delta$ , где  $\Delta$  — толщина стенки КО [2];  $\varphi_s$  — интегральный коэффициент облученности сферического объекта Землей;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> — постоянная Стефана-Больцмана;  $Q_\Sigma$  — сумма удельных тепловых потоков, поглощенных наружной поверхностью объекта в околоземном космическом пространстве;  $Q = 239$  Вт/м<sup>2</sup> — поверхностная плотность мощности, излучаемая Землей [4];  $\alpha_s$  — коэффициент поглощения солнечного излучения покрытием на внешней поверхности наружного корпуса;  $A = 0,3$  — альbedo Бонда Земли [4];  $E = 1366$  Вт/м<sup>2</sup> — солнечная постоянная [4];  $\varphi_{ks}$  — интегральный комбинированный коэффициент облученности внешней поверхности объекта отраженным Землей солнечным излучением;  $\Phi$  — фактор формы, отношение площади миделя к общей площади поверхности КО (для КО сферической формы  $\Phi = 0,25$ );  $f$  — функция, равная единице на освещенном Солнцем участке траектории и нулю — в тени Земли.

Интегральный коэффициент облученности объекта Землей известен [1, 2]:

$$\varphi_s = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \varphi_0} \right). \quad (6)$$

Значение  $\varphi_{ks}$  может быть рассчитано по формуле, выведенной с учетом данных [2]:

$$\varphi_{ks} = (1 - \delta) \varphi_s \cos \beta \cos \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{t_2 - 2(\tau - t_1)}{t_2} \right) \right]; \quad \delta = 0,25 \sqrt{\frac{H}{30}}; \quad H = h \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Здесь  $t_1 \leq \tau \leq t_2$ . Моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответствуют точкам траектории, при которых комбинированный коэффициент облученности  $\varphi_{ks}$  уменьшается до нуля, а непосредственное воздействие на КО солнечного излучения остается постоянным до захода в тень Земли. В этом заключается различие в циклограммах воздействия на КО прямого и отраженного Землей солнечного излучения, что особенно проявляется при больших высотах, когда  $t_2 \gg t_1$ , однако при этом условии значение  $\varphi_{ks}$  пренебрежимо мало [2].

Опишем циклограмму воздействия на КО внешних тепловых потоков. В тени Земли поверхностью КО поглощается удельный тепловой поток

$$Q_1 = \varepsilon \varphi_s Q \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq t_1. \quad (8)$$

После прохождения теневого участка траектории суммарный поглощаемый поток равен

$$Q_\Sigma = Q_1 + \Delta Q(\tau); \quad \Delta Q(\tau) = \alpha_s A E \varphi_{ks}(\tau) + \alpha_s E \Phi f. \quad (9)$$

Поглощение потока прямого солнечного излучения продолжается в течение времени  $t_1 \leq \tau \leq t_2$  ( $f = 1$ ), начиная с момента времени  $\tau = t_1 + t_2$  принимается  $f = 0$ .

Поглощение потока отраженного Землей солнечного излучения начинается после выхода КО из тени Земли с некоторым запаздыванием на отрезок времени  $\Delta\tau = (n/4)t_0$ . С этого момента величина комбинированного коэффициента облученности  $\varphi_{ks}$  нарастает, достигая максимума при  $\tau = t_0/2$ , а затем падает до малого значения к моменту времени  $\tau = t_0 - (n/4)t_0$ . Далее циклы повторяются. Для расчетов  $t_0$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  и  $n$  используются формулы (2), (4).

**Результаты расчетов.** В расчетах использовались значения параметров:  $c = 922$  Дж/кг К;  $\gamma = 2640$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_0 = 2,434 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup> К, что соответствует материалу КО (сплав АМГ6);  $\varepsilon = 1$ ;  $\alpha_s = 0,25$  и 1. Толщина стенки сферического оболочечного КО  $\Delta$  в расчетах варьировалась от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  м. Расчеты проводились для орбиты с параметрами  $\beta = 30^\circ$ ,  $h = 600$  км,  $t_0 = 96,3$  мин;  $t_1 = 25,6$  и  $t_2 = 70,7$  мин. Начальная температура КО принята равной 290 К.

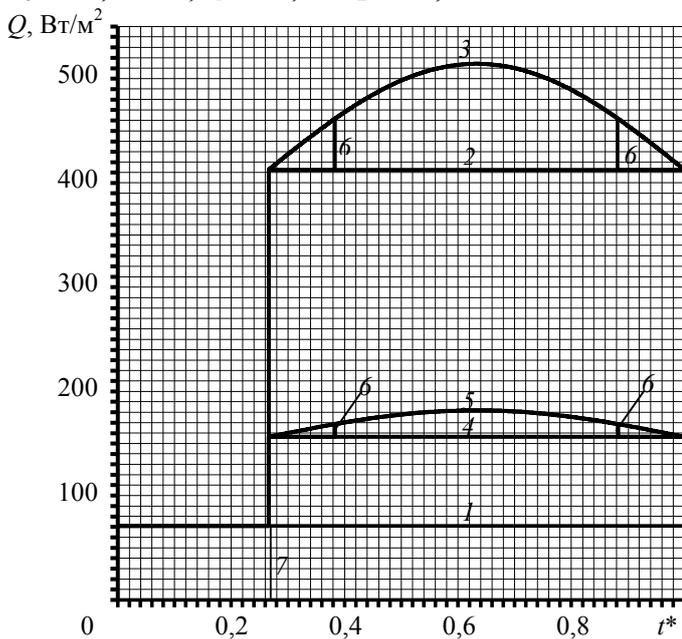


Рис. 2

Результаты расчетов периодических изменений поглощаемых тепловых потоков и температуры КО представлены на рис. 2, 3. На рис. 2 приведены циклограммы изменения во времени поглощаемых поверхностью КО тепловых потоков в пределах одного цикла. По оси абсцисс отсчитывается безразмерное время  $t^* = \tau/t_0$ , циклограмма построена в рамках одного цикла, т.е. полного периода обращения КО вокруг Земли. Линии соответствуют: 1 — поглощаемый удельный поток собственного теплового излучения Земли при  $\varepsilon = 1$ ; 2, 4 — к уровню линии 1 добавляется поглощаемый удельный поток от прямого солнечного излучения; 3, 5 — к уровню линий 2, 4 добавляется поглощаемый поток отраженного Землей солнечного излучения. Линии 2, 3 соответствуют коэффициенту поглощения поверхностью КО солнечного излучения  $\alpha_s = 1$ ; 4, 5 —  $\alpha_s = 0,25$ . Вертикальные линии 6 определяют границы перехода через терминатор, расстояние между ними равно половине цикла.

На рис. 3 представлена динамика изменения температуры КО с различными теплоемкостями в пределах одного цикла ( $a$  —  $\alpha_s = 1$ ;  $b$  — 0,25). Графики построены для квазиустановившегося теплового режима КО, т.е. после прохождения участка переходного режима (линия 7 отсекает на оси абсцисс границу в пределах цикла между тенью и солнечным

участками траектории. Линии соответствуют толщине стенки сферического КО, равной 1 —  $10^{-6}$ ; 2 —  $10^{-5}$ ; 3 —  $10^{-4}$ ; 4 —  $10^{-3}$ ; 5 —  $10^{-2}$  м). Это означает, что на последующих циклах картина изменения температур полностью воспроизводится.

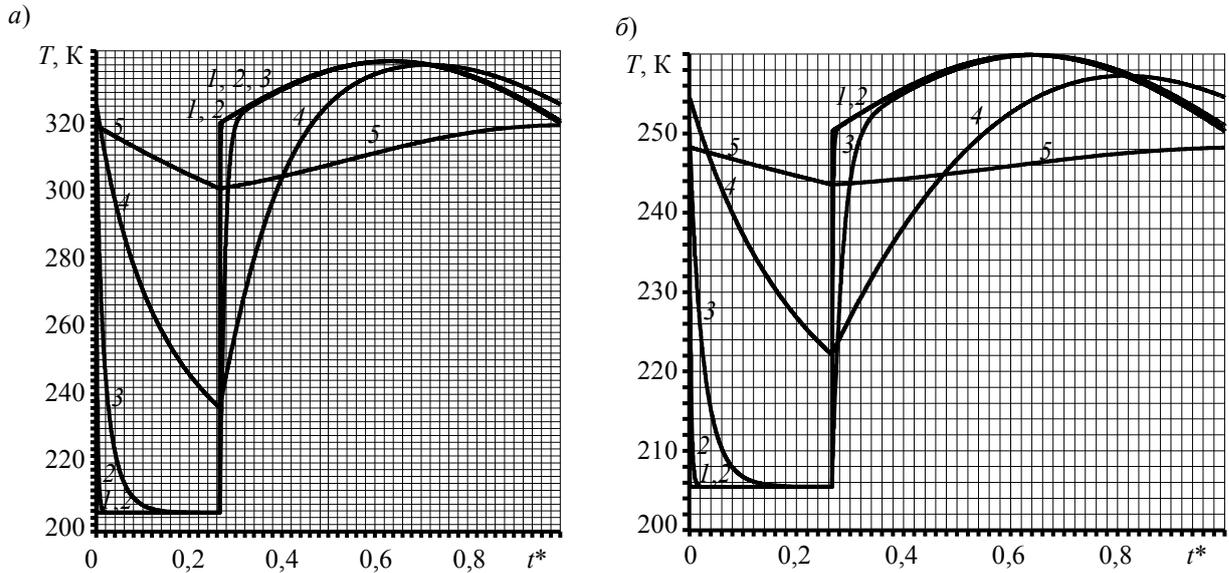


Рис. 3

Из рис. 3 можно сделать общие выводы:

— безынерционному в тепловом отношении объекту соответствует толщина стенки сферического КО до  $10^{-5}$  м (линии 1 и 2), температурная динамика таких КО полностью воспроизводит циклограмму изменения поглощаемых тепловых потоков, а амплитуда колебаний их температур максимальна — 132 К при  $\alpha_s = 1$  и 44 К при  $\alpha_s = 0,25$ . Нижний уровень температуры (в тени Земли) безынерционных КО одинаков (он зависит от  $\epsilon$ ) и при  $\epsilon = 1$  составляет  $\sim 206$  К;

— при толщине стенки сферического КО  $10^{-4}$  м объект нельзя считать безынерционным, хотя с некоторым запаздыванием (на  $t_1/2$  и  $t_2/2$ ) изменение температуры соответствует изменению во времени поглощаемых тепловых потоков. Такой КО можно считать малоинерционным;

— при толщине стенки  $10^{-3}$  м объект является термоинерционным, размах колебаний его температуры уменьшается в основном за счет повышения температурного уровня на теневом участке траектории (процесс охлаждения), на солнечном участке траектории динамика изменения температуры запаздывает относительно циклограммы изменения тепловых потоков и максимум смещен к концу цикла;

— при толщине стенки  $10^{-2}$  м термическая инерция КО велика, амплитуда колебаний температуры составляет всего 18 К при  $\alpha_s = 1$  и 4 К при  $\alpha_s = 0,25$ . Очевидно, что при дальнейшем увеличении толщины стенки КО можно будет отнести к классу термостабилизированных объектов, т.е. таких, у которых колебание температуры относительно среднего уровня можно считать практически незначимым.

**Выводы.** Разработана математическая модель для расчета нестационарных температур изотермического сферического КО с учетом высоты и наклона орбиты. Модель включает описание циклограмм поглощаемых поверхностью КО всех тепловых потоков в околоземном космическом пространстве. Проведенные расчеты позволили выявить закономерности формирования нестационарных тепловых режимов КО. Установлены критерии отнесения объектов к классу безынерционных или термостабилизированных (с большой тепловой инерцией). Разработанная методика расчета может применяться и для КО с другими конфигурациями (цилиндр, параллелепипед) после уточнения формул для коэффициентов облученности.

Модель нестационарного теплового режима изотермического сферического КО может использоваться как эталонная, она удобна для тестирования более сложных расчетных программ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г. И. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
2. Каменев А. А., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. 2006. 186 с.
3. Богомолов С. И. Введение в специальность „Радиосвязь, радиовещание и телевидение“: Учеб. пособие. Томск: ТМЦДО, 2004. 162 с.
4. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009, Vol. 90, N 3. P. 311—323.

#### Сведения об авторах

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

Рекомендована кафедрой  
компьютерной теплофизики и  
энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию  
15.01.13 г.

В. П. ВЕЙКО, Е. А. ШАХНО, Д. А. СИНЕВ

## ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ХРОМА ПУТЕМ МНОГОКРАТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Теоретически исследован способ увеличения разрешения планарных структур, записываемых с помощью технологии локального лазерного окисления тонких пленок хрома с последующим травлением путем многократного воздействия на область.

*Ключевые слова:* лазерное окисление, дифракционные структуры, металлическая пленка.

**Введение.** Лазерная литография является одним из лучших способов формирования топологии дифракционных оптических элементов (ДОЭ), устройств звуко- и видеозаписи и фотосаблонов интегральных схем. Один из наиболее перспективных методов лазерной литографии — термохимический, основанный на локальном лазерном окислении тонкой металлической пленки с последующим травлением необлученной области [1]. Однако до настоящего времени не определены пределы разрешающей способности этого метода, что принципиально ограничивает диапазон его возможных применений. Ранее нами было показано теоретически и подтверждено экспериментально [2], что разрешающая способность термохимического изображения на тонких пленках хрома в режиме записи сканирующим пучком непрерывного излучения превышает разрешающую способность термического изображения и при диаметре облученной области 0,2 мкм составляет 0,6 мкм<sup>-1</sup> и выше. Изучению потенциальных возможностей повышения разрешающей способности лазерного локального окисления тонких металлических пленок посвящена настоящая работа.

**Постановка задачи.** При локальном поверхностном окислении пленки хрома лазерным излучением ее оптические и теплофизические свойства в зоне обработки необратимо изменяются: коэффициент отражения падает с 0,55 для чистого хрома Cr до 0,06 для чистого оксида хрома Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на длине волны 532 нм, а теплопроводность уменьшается с 47 до 20 Вт/м·К при сквозном окислении пленки [3]. Поэтому можно ожидать, что при повторном облучении области температура в зоне воздействия будет значительно выше, чем при первичном за счет роста поглощательной способности пленки и уменьшения оттока тепла. Все это принципиально может привести к локализации окисленной области и повышению разрешающей способности по сравнению с однократным воздействием лазерного излучения. Рассмотрим изменение локализации термохимического изображения при многократном воздействии лазерного излучения на одну и ту же область пленки.

Одной из наиболее важных областей практического применения лазерного термохимического метода является изготовление ДОЭ [1]. Поэтому для улучшения и конкретизации

сравнения с экспериментом нами была использована учитывающая топологические особенности (кольцевую структуру) и условия записи ДОО физико-математическая модель локального окисления поверхности тонкой пленки хрома при лазерном сканировании пучка непрерывного лазерного излучения с малым размером поперечного сечения и гауссовым распределением интенсивности [4]. Толщина слоя оксида увеличивается в соответствии с вагнеровским законом окисления [5]:

$$H = \sqrt{2B \exp\left(-\frac{T_a}{T_{\max}}\right) t_e},$$

где  $B$  — константа параболического окисления,  $T_a$  — энергия активации, выраженная в К,  $T_{\max}$  — максимальная температура в области воздействия, значение „эквивалентного“ времени  $t_e$  определяется динамикой температуры при лазерном воздействии [5]:

$$t_e = \sqrt{\frac{2\pi T_{\max}^2}{T_a |T_{tt}''(t_0)|}},$$

где  $T_{tt}''(t_0)$  — вторая производная температуры по времени в точке поверхности пленки в момент, когда температура в ней достигает своего максимального значения  $T_{\max}$ .

В режиме сканирования пленки лазерным пучком с гауссовым распределением интенсивности [4]:

$$T = G \int_0^{\infty} \frac{\xi}{\xi^2 + b^2} e^{-\frac{\xi^2}{4}} J_0\left(\xi \frac{r}{r_0}\right) d\xi,$$

где  $G = \frac{P(1-R)}{2\pi kh} e^{\frac{b^2}{4}}$ ,  $b = \frac{Vr_0}{2a}$ ,  $r = \sqrt{\left(x - Vt - \frac{Vr_0^2}{4a}\right)^2 + y^2}$ ,  $x$  и  $y$  — пространственные координаты,

$t$  — время,  $J_0(x)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка,  $P$  — мощность лазерного излучения,  $V$  — скорость сканирования,  $R$  — отражательная способность вещества,  $h$  — начальная толщина пленки хрома,  $k$  — теплопроводность пленки хрома,  $a = 0,22 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с — температуропроводность пленки хрома,  $r_0$  — характерный размер гауссова распределения интенсивности излучения в пучке. Значение температуры отсчитывается от начального.

В работе была принята экспоненциальная интерполяция зависимости поглощательной способности материала от толщины слоя оксида на поверхности пленки хрома. Для появления устойчивого изменения поглощательной способности на поверхности хрома необходимо создать 2—3 молекулярных слоя оксида (с учетом структурных дефектов — „просветов“ между молекулами, дислокаций, неравномерностей рельефа и пр.). В этом случае поглощательная способность пленки хрома, покрытой оксидом, может быть рассчитана по формуле:

$$A = 1 - R = 1 - \left( R_{\text{Cr}_2\text{O}_3} + (R_{\text{Cr}} - R_{\text{Cr}_2\text{O}_3}) \exp\left(-\frac{H}{jd_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}\right) \right),$$

где  $j$  — параметр, равный количеству молекулярных слоев оксида, а  $d_{\text{Cr}_2\text{O}_3} = 2\sqrt[3]{\frac{3\nu_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}{4\pi}} =$

$= 2\sqrt[3]{\frac{3}{4\pi} \frac{\mu}{\rho N_A}}$  — диаметр молекулы оксида хрома,  $\mu$  — молярная масса оксида хрома,

$\rho$  — плотность оксида хрома [3],  $N_A$  — число Авогадро. Объем молекулы  $\nu$  принят равным объему шара соответствующего размера.

**Расчетное распределение слоя оксида в многопроходовом режиме.** Результаты расчетов для воздействия непрерывного лазерного пучка  $P=3,8$  мВт,  $r_0=0,2$  мкм,  $V=0,5$  м/с на пленку хрома  $h=30$  нм (рис. 1, а) показывают утолщение окисленного слоя после каждого прохода (1 — 1, 2 — 2, 3 — 3 прохода). Рассмотрено поперечное распределение толщины оксида: после третьего прохода  $H=3$  нм, этого достаточно для защиты от травления.

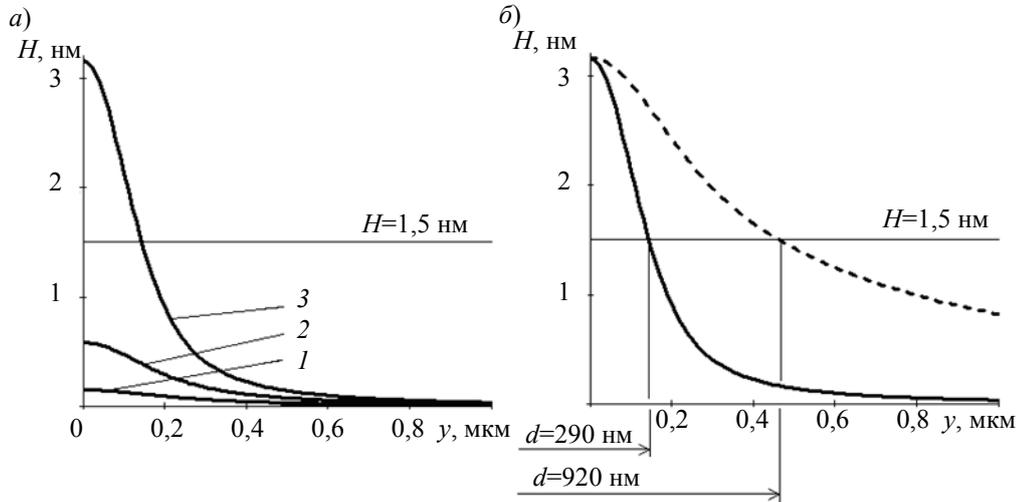


Рис. 1

Сравним режимы, требуемые для получения одинаковой толщины при однопроходовой и многопроходовой обработке. Чтобы получить слой оксида толщиной 3 нм при однопроходовой обработке, требуется уменьшить скорость сканирования с 0,5 (сплошная) до 0,077 м/с (пунктир) при сохранении значений других параметров. По причине теплопроводности минимальный размер элемента (при условии, что для защиты от последующего травления необходима толщина слоя 1,5 нм)  $d=920$  нм, в то время как при обработке за три прохода это значение составляет  $d=290$  нм (рис. 1, б). Надо заметить, что наряду с увеличением разрешающей способности при многопроходовом воздействии возрастает производительность, поскольку оптимальная скорость значительно увеличивается. Так, при заданных параметрах обработки при трех проходах расчетная разрешающая способность возрастает в 3,2 раза; скорость сканирования — в 6,5 раз, что соответствует увеличению производительности в 2,2 раза.

Аналогичным образом были построены и рассчитаны модели двулучевой однопроходовой и многопроходовой обработки, при которой сканирование ведется одновременно двумя пучками ( $P_1 = P_2 = 2,5$  мВт), пространственно разнесенными на 3,2 мкм (рис. 2, а).

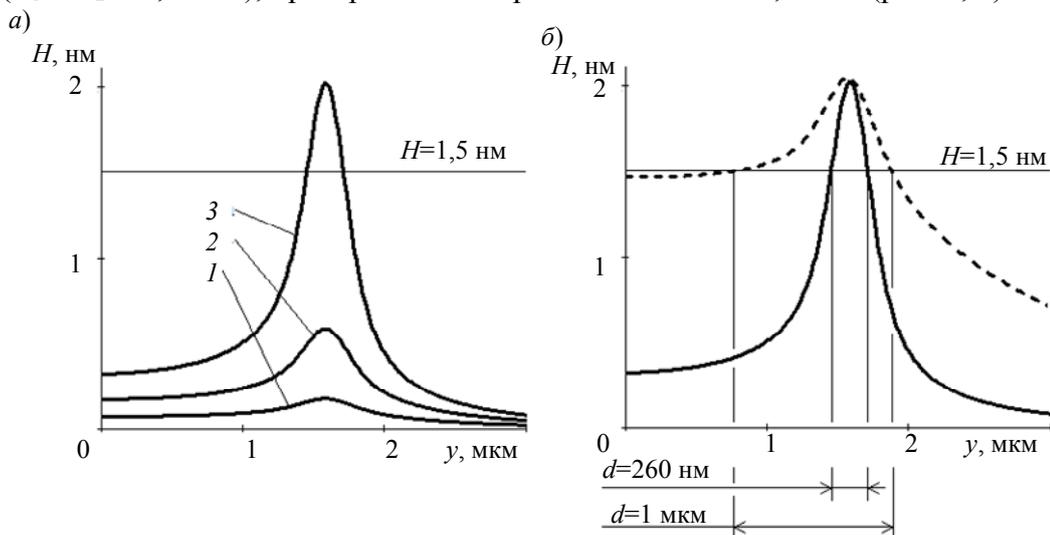


Рис. 2

При двулучевой однопроходовой обработке, чтобы получить слой оксида заданной толщины, требуется уменьшить скорость сканирования до 0,148 м/с (рис. 2, б, пунктир), что, как и в предыдущем случае, приводит к расширению нагретой области. В результате пространственное распределение толщины оксида нельзя считать контрастным, так как в центре между треками толщина слоя оксида практически достигает 1,5 нм. При увеличении числа проходов до трех скорость сканирования может быть увеличена до 0,5 м/с (сплошная). В отличие от однопроходового режима, многопроходовой ускоряет рост толщины оксида от прохода к проходу, что приводит к значительному контрасту пространственного распределения слоя оксида, поскольку толщина слоя оксида между треками мала (рис. 2, б).

**Влияние малых смещений пучка на качество записи.** Основную технологическую сложность при записи треков в режиме многопроходовой обработки представляют сдвиги обрабатываемого пятна в поперечном сечении на случайную величину (биения), вызываемые нестабильностью позиционирования механизмов, управляющих лазерным лучом.

Для моделирования биений записываемого луча был выполнен псевдослучайный поперечный сдвиг  $\Delta$  облученной области на определенную величину в заданном направлении при каждом четном проходе (рис. 3). Рассматривалось влияние  $\Delta$  на смещение положения максимума толщины оксида  $\varphi$  и относительное увеличение ширины окисленной области по уровню половины толщины  $\chi$ .

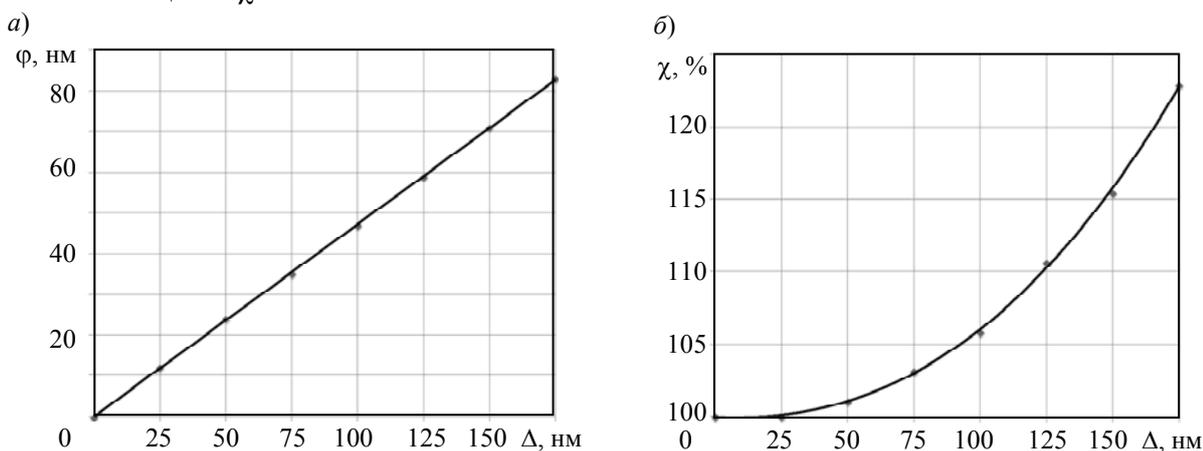


Рис. 3

Очевидным представляется общее негативное влияние биений на результат термохимической записи структур: положение максимума линейно смещается в сторону биения на величину  $\approx \Delta/2$  (рис. 3, а). Однако стоит отметить, что влияние биений на разрешающую способность записи (рис. 3, б) становится критическим только при достижении  $\Delta \sim r_0$  (при  $\Delta = 200$  нм толщина получаемого оксида меньше 1,5 нм — значения, необходимого для устойчивой защиты от травления). В целом стоит отметить, что, согласно результатам расчета, рассмотренная проблема не является критической для процесса записи методом локального лазерного окисления в указанных условиях.

**Закключение.** Приведенные расчетные данные демонстрируют преимущества многократной обработки для технологии прямой лазерной термохимической записи. Благодаря увеличению поглощения излучения при окислении и снижению теплопроводности становится возможным использовать высокие скорости сканирования, при которых повышается не только разрешающая способность, но и результирующая производительность процесса записи. В рассмотренном случае трехпроходовой обработки повышение разрешающей способности в 3,2 раза сопровождается повышением производительности обработки в 2,2 раза. Показано, что методика многопроходового воздействия может применяться и при многолучевой обработке.

Работа поддержана проектами РФФИ №12-02-00974а и №13-02-00971а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Метев С. М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд-во Болгарской АН, 1991.
2. Вейко В. П., Синев Д. А., Шахно Е. А., Полещук А. Г., Саметов А. Р., Седухин А. Г. Исследование особенностей многопучковой лазерной термохимической записи дифракционных микроструктур // Компьютерная оптика. 2012. Т. 36, № 4. С. 562—571.
3. Физико-химические свойства оксидов: Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978.
4. Veiko V. P., Shakhno E. A., Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Matyzhonok V. N. Local laser oxidation of thin metal films: ultra-resolution in theory and in practice // J. of Laser Micro/Nanoengineering. 2008. Vol. 3, N 3. P. 201—205.
5. Либенсон М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб: Наука, 2007. 423 с.

**Сведения об авторах**

- Вадим Павлович Вейко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Елена Аркадьевна Шахно** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: elena.shakhno@rbcmail.ru
- Дмитрий Андреевич Синев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения; E-mail: sinev\_dm@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерных технологий и экологического  
приборостроения

Поступила в редакцию  
19.09.13 г.

УДК 535.31; 681.7; 53.082.5

В. К. Баля, И. Ю. Денисюк, Е. Б. Шекланова, Н. Д. Ворзобова

**НЕРЕГУЛЯРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА  
ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА ЛИНИИ**

Исследован лазерный генератор линии, основанный на дифракционных решетках со „сбитым“ периодом, изготовленных методом наноимпринт-копирования. Мастер-штамп для копирования изготавливался методом лазерной гравировки термочувствительной пленки. Измерены оптические характеристики полученного дифракционного оптического элемента.

**Ключевые слова:** ДОЭ, лазерный генератор линии, наноимпринт.

Одна из сложных задач классической оптики — формирование пучков с заданным, не гауссовым распределением энергии в телесном угле, например, в виде линии. Лазерные генераторы линии используются в различных областях техники: для контроля рельсового пути и поверхности обрабатываемых деталей, в посадочных огнях и огнях береговой обстановки. Стандартные методы создания генераторов линии используют цилиндрические линзы и объективы на их основе, однако в этом случае распределение освещенности в линии оказывается гауссовым, что часто не соответствует техническим требованиям к элементу. Асферические линзы позволяют преодолеть проблемы, но их изготовление сложно и затратно.

В последнее время для этой цели применяются дифракционные оптические элементы (ДОЭ). Недостатком такого подхода является требование высокой точности взаимного расположения микроэлементов структуры и прорисовки линий на нанометровом уровне. Это трудно выполнимо, поскольку любой литограф имеет фиксированный размер пиксела и реальный ДОЭ всегда отличается от расчетного. В результате ДОЭ весьма чувствительны к точности изготовления.

С учетом характеристик существующего оборудования и его точности более эффективным решением оказывается создание дифракционных решеток сложного профиля, период которых непостоянен [1]. На рис. 1 представлена картина дифракции (тонкая кривая) на решетке с глубоким штрихом и угловая зависимость интенсивности (жирная).

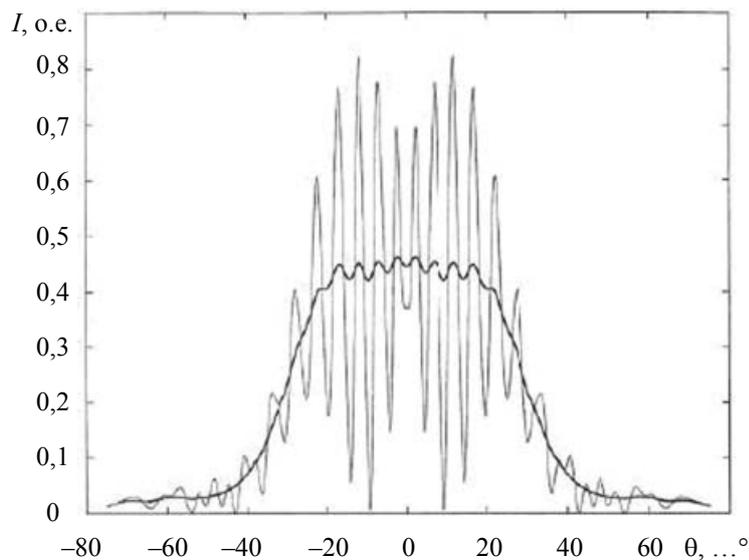


Рис. 1

Как видно из рисунка, благодаря глубине штриха, много большей половины длины волны, интенсивность высших дифракционных порядков возрастает многократно, следовательно, обеспечивается необходимое распределение энергии в линии, отличное от гауссова.

**Условия эксперимента.** Использованная технология лазерной гравировки подробно описана в статье [2]. Гравировка выполнялась с использованием гравера Laser Graver LG 10F15, обеспечивающего получение структур с разрешением до 2,5 мкм (10160 dpi). Решетки формировались методом обработки черной полимерной или металлизированной пленки при абляции поверхностного слоя лучом непрерывного Nd—YAG-лазера с длиной волны 1,06 мкм. Эксперименты проводились с использованием полиэфировой пленки с термочувствительным слоем на базе ПММА с наночастицами сажи, обеспечивающими поглощение лазерного излучения. Толщина испаряемого слоя 13—15 мкм.

Изготовленная структура копировалась на акриловую фотоотверждаемую композицию методом наноимпринта [3].

**Экспериментальные результаты.** Оптическая схема генератора линии, рассматриваемого в настоящей работе, приведена на рис. 2 (1 — лазер, 2 — линза, 3 — ДОЭ, 4 — распределение интенсивности излучения в горизонтальной плоскости в дальней зоне). В схеме использована отрицательная линза, обеспечивающая нужную величину расходимости в вертикальной плоскости, за ней установлена решетка, расширяющая пучок в горизонтальной плоскости, не изменяя ширину индикатрисы в вертикальной плоскости.

В приведенном примере лазерный луч с гауссовым распределением интенсивности и диаметром 1 мм преобразуется в линию шириной 40° в горизонтальной плоскости и 10' в вертикальной.

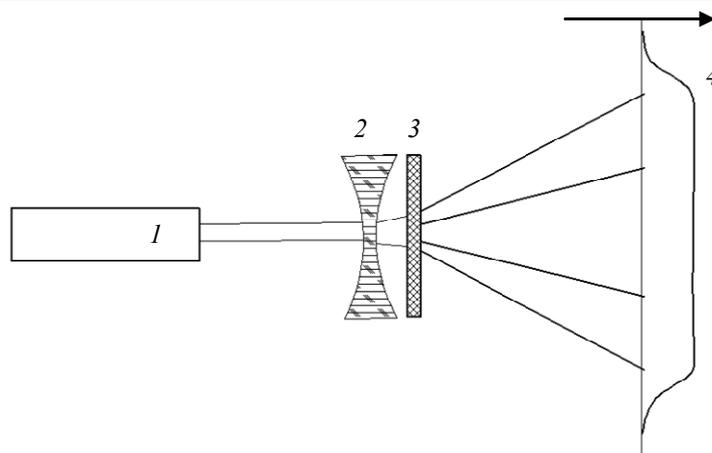


Рис. 2

Рассмотрим подробнее конструкцию ДОЭ. Лазерный луч — монохроматический, следовательно, необходимое расширение пучка может быть выполнено посредством дифракционной решетки, имеющей неравномерное распределение дифракционных порядков, при котором интенсивность высших порядков значительно больше, чем первых и вторых. Требуемое повышение энергии в области высших порядков достигается использованием дифракционной решетки, высота штрихов которой существенно больше половины длины волны, а профиль штриха — треугольный, причем угол треугольника в сечении такой, что преломление света происходит в направлении углов  $\pm 20^\circ$ .

ДОЭ формирует пучок в виде узкой линии, размер которой по вертикали определяется использованной отрицательной линзой и естественной расходимостью лазерного луча, по горизонтали — углами дифракции решетки и составляет  $\pm 20^\circ$  по полуширине в приведенном примере. Элемент универсален и имеет близкие характеристики для зеленого, желтого и красного диапазонов спектра.

Недостатком простой конструкции на базе одиночной дифракционной решетки постоянного периода являются четко видимые дифракционные максимумы в линии, что создает значительную неравномерность распределения света по длине линии.

Наличие четких дифракционных порядков является принципиальным недостатком расщепителей, основанных на дифракционных решетках, преодолеть который можно, изготовив решетки со „сбитым“ периодом. Действительно, если наложить друг на друга дифракционные решетки с различным периодом, можно получить взаимное наложение дифракционных порядков, что приведет к повышению однородности интенсивности в линии. Обычно решетки изготавливают с помощью делительных машин, которые не позволяют задавать переменные периоды, однако в нашем случае применение лазерного гравера с компьютерным управлением позволяет обойти это ограничение и задавать любой период, кратный одному пикселу гравера (2,5 мкм).

В работе получена решетка, образованная повторяющимися элементами, в каждом из которых полоски идут со „сбитым“ периодом, например, 7,5; 10; 12,5; 15 мкм. При этом решетка со „сбитым“ периодом вследствие непостоянства шага не дает четко видимых дифракционных порядков и линия становится более однородной по длине.

На рис. 3, а приведена схема расположения штрихов дифракционной решетки, б — микрофотография решетки. Форма штриха не идеально треугольная вследствие заплывания поверхности при лазерной обработке, что не является недостатком, поскольку возникающее расплывание дифракционных максимумов благоприятно сказывается на однородности формируемой линии.

На рис. 3, б хорошо видны группы штрихов одинакового периода, совокупность которых и образует необходимый оптический элемент. Нерегулярность высоты штриха обусловлена

взаимовлиянием прорезаемых параллельно канавок, когда первая вызывает нагрев окружающей области, а вторая получается шире за счет большей скорости абляции нагретого материала.

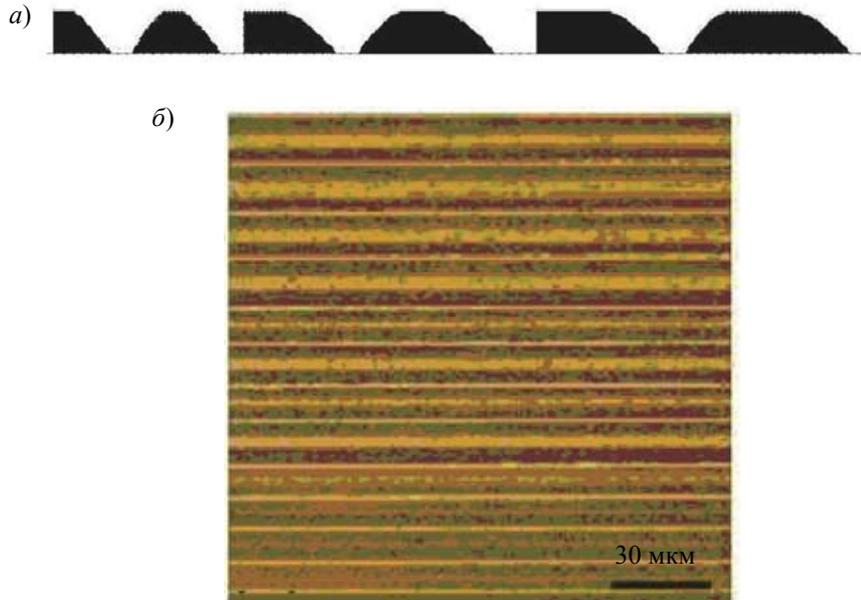


Рис. 3

На рис. 4 представлено распределение энергии в линии, сформированной периодической решеткой (а) и решеткой со „сбитым“ периодом (б). Несмотря на неидеальную форму канавок распределение энергии в линии получено близким к требуемому (рис. 4, б).

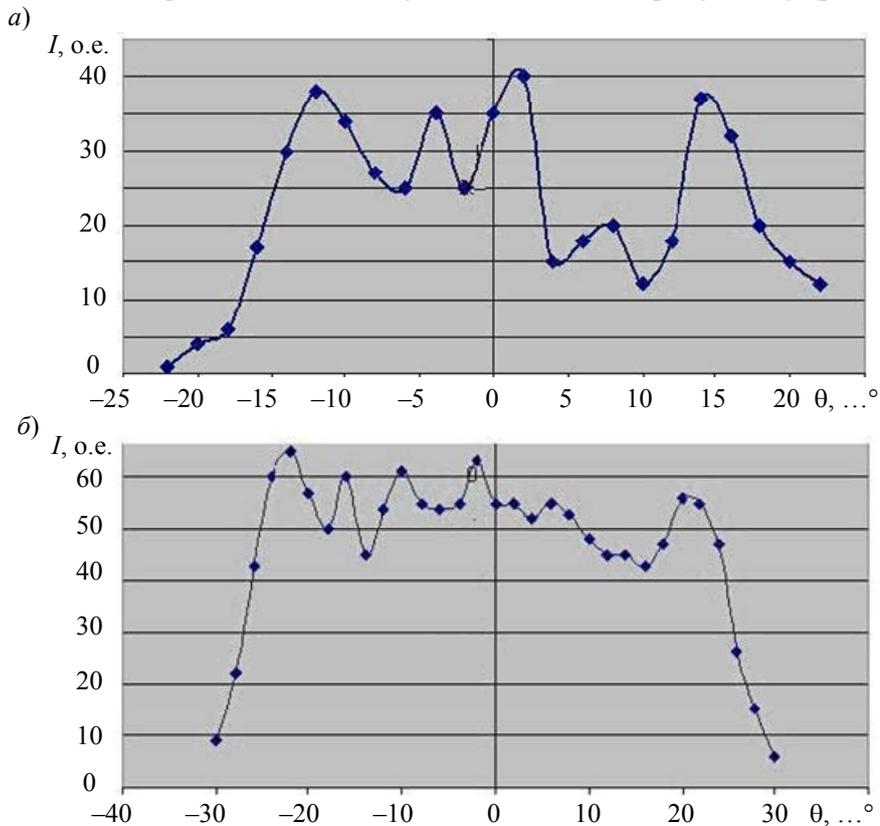


Рис. 4

Линия, формируемая генератором, представлена на рис. 5. Как видно из рисунка, получена тонкая линия света с заданными параметрами распределения интенсивности в телесном угле. Фотометрирование генератора линии на базе красного лазера ( $\lambda=635$  нм) дает следую-

щие параметры: сила света в линии шириной 10' при мощности 200 мВт — 15 000 кД в горизонтальной плоскости, вне линии (+/- 10' от оси) — 900 кД, далее сила света уменьшается на три порядка и определяется величиной светорассеяния в оптических элементах.

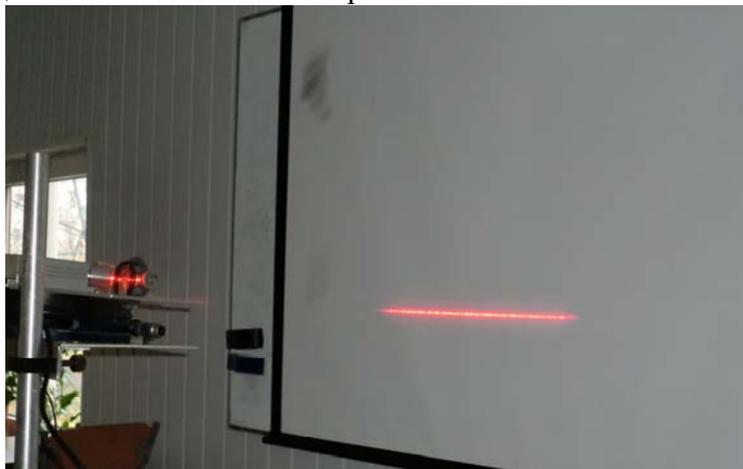


Рис. 5

**Выводы.** Изготовлен прототип лазерного генератора линии, основанного на дифракционных решетках со „сбитым“ периодом; изготовлен мастер-штамп решетки со „сбитым“ периодом на лазерном гравере, его копия получена методом наноимпринт-копирования. Измерены распределения силы света в линии и показано, что таким способом можно преобразовать пучок лазера с гауссовым распределением в пучок с прямоугольным в сечении распределением силы света. Изготовление решеток со „сбитым“ периодом несложно, не требует прецизионного оборудования, а их тиражирование возможно по методу наноимпринта, когда получение элементов с нанометровым разрешением не является обязательным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lautanen J., Honkanen M., Kettunen V., Kuittinen M., Laakkonen P., Turunen J. Wide-angle far-field line generation with diffractive optics // Optics Communications. 2000. Vol. 176, Is. 4—6. P. 273—280.
2. Баля В. К., Денисюк И. Ю. Формирование микрооптических элементов для защиты с использованием лазерного гравера // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 3. С. 51—56.
3. Арефьева Н. Н., Денисюк И. Ю. Применение метода наноимпринта для единичного копирования полимерной френелевской и микрооптики // Оптический журн. 2008. Т. 75, № 7. С. 71—74.

#### Сведения об авторах

- Вера Константиновна Баля** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; инженер-исследователь; E-mail: Vera\_Balya@mail.ru
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; кафедра оптики квантоворазмерных систем; заведующий кафедрой; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru
- Елизавета Борисовна Шекланова** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; инженер; E-mail: e.sheklanova@gmail.com
- Надежда Дмитриевна Ворзобова** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; E-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
оптики квантоворазмерных систем

Поступила в редакцию  
30.11.12 г.

---

---

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

---

---

УДК 004.942

С. В. ИВАНОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

### АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ: УСВОЕНИЕ ДАННЫХ И АНСАМБЛЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обсуждается совокупное использование методов усвоения данных и ансамблевых технологий для анализа неопределенности предсказательного моделирования сложных систем на примере задачи предотвращения наводнений в Санкт-Петербурге.

**Ключевые слова:** математическая модель, неопределенность, предсказательное моделирование, сложная система.

Построение и использование математических моделей сопряжено с оценкой и анализом неопределенности предсказательного моделирования (ПМ). Понятие неопределенности (*uncertainty*) наследует основные черты метрологической интерпретации погрешности, однако его природа обусловлена абстрактностью математической модели (как инструмента косвенных измерений) и в ряде случаев не подразумевает введения исходного эталона [1]. Неопределенность ПМ является объективным свойством применяемых моделей, ее источники — входные данные, эмпирические параметры модели, а также построенные на их основе замыкания и формализации отдельных составляющих. Неопределенность входных данных может быть вызвана не только погрешностью их измерений, но и косвенными факторами, характерными для ПМ сложных систем, состоящих из большого числа взаимодействующих компонентов различной природы, такими как *прогрессирующая* неопределенность, отражающая использование результатов ПМ в качестве входных данных для других моделей. Неопределенность ПМ не может быть полностью устранена путем уточнения структуры модели или детализации входных данных, но ее можно снизить за счет управления процессом ПМ непосредственно в ходе вычислений:

— *оперативное усвоение данных в начальные и граничные условия модели*: для этого используются различные оптимизационные постановки, включая оптимальную интерполяцию и фильтрацию Калмана;

— *оперативное усвоение данных в параметры модели*: точность ПМ оптимизируется по наблюдениям на ближайшей предыстории внутри скользящего временного окна;

— *ретроспективное усвоение данных в параметры модели (калибровка параметров)*: оптимизация выполняется „в среднем“ за длительный „ретроспективный“ интервал, по которому имеются наблюдения. Это требует существенно меньших вычислительных затрат, чем при оперативном усвоении, однако остается открытым вопрос о длине ретроспективного интервала и периодичности калибровки.

Подход к усвоению данных как к задаче оптимизации позволяет детализировать структуру прогрессирующей неопределенности, устраняя эффекты, связанные с неполнотой и неточностью исходных данных для функционирования моделей, но оставляет нерешенной задачу исследования неопределенности, обусловленной внутренней структурой самих моделей. Хотя применение аналитических методов для отдельных классов моделей допустимо, анализ неопределенности ПМ сложных систем общего вида с произвольной структурой обмена данными, по-видимому, возможен только численно. Для этого применяются ансамблевые технологии, основанные на прямом моделировании различных сценариев поведения моделей и обобщении результатов статистическими методами. Принципиальным является выбор способа построения ансамбля, что определяет возможности технологии:

— формирование ансамбля внесением случайного возмущения во входные данные (включая начальные и граничные условия) и в параметры модели с помощью метода Монте-Карло. Этот прием наследует принципы анализа чувствительности моделей (*sensitivity analysis*) [2], отличаясь тем, что задается вероятностное возмущение, описывающее изменчивость процессов, определяющих входные данные;

— применение набора альтернативных моделей и вариантов их использования допустимо в предметных областях, в которых существуют альтернативные модели различных авторов, а также иерархии-поколения моделей (от простого — к сложному). Ансамбль составляется из результатов расчетов по разным моделям и вариантам их использования (например, разным формализациям в составе одной и той же модели);

— бутстреппирование (*bootstrapping*), основанное на воссоздании ансамбля комбинированием различных источников данных и вычислительных моделей, приемлемо для моделирования сложных систем с разветвленной структурой обмена данными между моделями. Ансамбль строится как путем сочетаний альтернативных моделей и источников данных (внешнее бутстреппирование), так и перебором вариантов их использования (внутреннее бутстреппирование).

Рассмотренные подходы ресурсоемки, поскольку вычислительные затраты на формирование ансамбля на несколько порядков превышают затраты на собственно ПМ. Использование современных суперкомпьютерных систем для таких задач неэффективно в силу их существенной неоднородности: вычислительные модели в составе ансамбля имеют различную ресурсоемкость, программы написаны на разных языках, используют различные технологии параллельного программирования и обладают разными требованиями к операционным системам и параллельной вычислительной архитектуре. Их интеграция может быть обеспечена в рамках облачных технологий второго поколения, поддерживающих абстракцию *композиционных приложений*, представляющих собой динамическое объединение различных сервисов, ориентированных на решение общей задачи в среде распределенных вычислений. Такая технология реализована в многопрофильной инструментально-технологической платформе CLAVIRE [3]. Она может служить основой для построения ансамблевых методов исследования неопределенности ПМ сложных систем. В частности, в задаче прогноза и предотвращения наводнений в Санкт-Петербурге на основе платформы CLAVIRE реализована среда вычислительного эксперимента, обеспечивающая возможность оценивания неопределенности прогнозов наводнений и планов маневрирования затворами комплекса защитных сооружений. Проведенные на ретроспективных данных 2010—2013 гг. расчеты показали, что введение усвоения данных позволило снизить неопределенность прогнозов на 20 %, а последующее использование ансамблевого метода на основе набора альтернативных моделей — на 25 %, что и определяет эффективность технологии.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации постановления № 220 Правительства Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цветков Э.И. Основы математической метрологии. СПб: Политехника, 2005. 510 с.
2. Saltelli A., Tarantola S., Chan K. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output // *Technometrics*. 1999. Vol. 41, N 1. P. 39—56.
3. Knyazkov K.V. et al. CLAVIRE: e-Science Infrastructure for Data-driven Computing // *J. of Computational Science*. 2012. Vol. 3(6). P. 504—510.
4. Ivanov S.V. et al. Simulation-based collaborative decision support for surge floods prevention in St. Petersburg // *J. of Computational Sci.* 2012. Vol. 3(6). P. 450—455.

**Сведения об авторах****Сергей Владимирович Иванов**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Научно-исследовательский институт Научно-исследовательских компьютерных технологий; E-mail: sergei.v.ivanov@gmail.com

**Александр Валерьевич Бухановский**

— д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Научно-исследовательский институт Научно-исследовательских компьютерных технологий; директор НИИ НКТ; E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию  
07.11.13 г.

УДК: 534.08+004.312+681.787

М. Ю. ПЛОТНИКОВ, И. Г. ДЕЙНЕКА

## РАЗРАБОТКА БЛОКА ГЕНЕРАЦИИ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СХЕМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИДРОФОНА

Предложен метод генерации гармонических сигналов на основе полиномов Чебышева для схемы цифровой обработки информации в волоконно-оптическом гидрофоне интерферометрического типа. Разработана и отмоделирована рабочая схема метода для программируемой логической интегральной схемы.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гидрофон, программируемые логические интегральные схемы, гармонические сигналы, полиномы Чебышева.

**Введение.** В волоконно-оптических датчиках интерферометрического типа существует проблема стабилизации положения рабочей точки интерферометра. С целью исключения влияния нестабильности положения рабочей точки на полезный сигнал разработано множество методов приема и демодуляции сигналов для волоконно-оптических гидрофонов [1]. Одним из распространенных методов демодуляции является пассивный гомодинный прием [2].

Согласно схеме [2], рассматриваемый метод приема сигналов предполагает использование в схеме цифровой обработки сигналов волоконно-оптического гидрофона опорного генератора гармонических сигналов.

Статья посвящена разработке стабильного высокоточного опорного генератора гармонических сигналов для цифровой схемы пассивного гомодинного приема на основе ПЛИС в волоконно-оптическом гидрофоне.

Широкое распространение ПЛИС послужило основой для появления новых методов генерации гармонических сигналов, наиболее эффективными из которых являются табличный метод генерации сигналов и метод прямого цифрового синтеза DDS [3].

Несмотря на простоту табличный метод не получил широкого распространения ввиду необходимости хранения очень большого объема данных в памяти ПЛИС [3] — на его основе невозможно создание универсального блока генерации гармонических сигналов.

Метод прямого цифрового синтеза предполагает хранение в памяти ПЛИС значений гармонического сигнала (например, косинуса) за один период, взятых не через интервалы времени, соответствующие требуемой частоте дискретизации, а через промежутки, соответствующие одинаковому изменению фазы. Этот фазовый шаг в аккумуляторе фазы [3] обычно выбирается очень малым для более точного получения требуемой частоты гармонического сигнала. Такая структура DDS имеет некоторые существенные недостатки. В реальных DDS младшие биты аккумулятора фазы отбрасываются для экономии ресурсов ПЛИС, что при преобразовании фазы гармонического сигнала в амплитуду приводит к периодической ошибке.

Для реализации опорного генератора могут потребоваться более точные методы генерации гармонических сигналов, чем метод прямого цифрового синтеза. В процессе реализации метода пассивного гомодинного приема на ПЛИС возникла задача разработки высокоточного стабильного генератора гармонических сигналов, лишённого перечисленных недостатков. Для ее решения разработан алгоритм генерации сигналов на основе разложения гармонических сигналов по полиномам Чебышева.

Для корректной работы схемы пассивного гомодинного приема в генераторе гармонических сигналов должны отсутствовать ошибки, связанные с усечением значений аккумулятора фазы. Одним из путей решения этой задачи является отказ от табличного представления гармонических сигналов. Для этого необходимо вычислять как текущее значение фазы сигнала, так и его амплитуду.

Для вычисления амплитуды гармонического сигнала удобно использовать разложения гармонической функции в ряд. Так, в основу разрабатываемого метода положено разложение функции косинуса по полиномам Чебышева. Такой выбор обусловлен тем, что они обеспечивают наименьшую максимальную ошибку равномерной аппроксимации на интервале  $-1 < x < 1$  [4].

Применение полиномов Чебышева позволяет использовать старший член аппроксимирующего полинома наименьшей степени, что приводит к уменьшению времени вычислений и затрачиваемых ресурсов ПЛИС.

Для пояснения сути метода рассмотрим однополупериодный одиночный косинусоидальный импульс:

$$f(t) = \cos(2\pi vt), \quad (1)$$

где  $-\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{4}$ .

Введя переменную  $x = \frac{4t}{T}$ , получим

$$f(x) = \cos\left(\frac{\pi}{2}x\right), \quad (2)$$

где  $-1 \leq x \leq 1$ . Разложение функции  $f(x)$  по полиномам Чебышева на промежутке  $-1 \leq x \leq 1$  можно представить как [4]:

$$f(x) = C_0T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_nT_n(x), \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{f(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad C_n = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{f(x)T_n(x)}{\sqrt{1-x^2}} dx, \quad (4)$$

Для полиномов Чебышева известно следующее соотношение [5]:

$$\int_0^1 T_{2k}(x) \cos(ax) \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}} = (-1)^k \frac{\pi}{2} J_{2k}(a), \quad (5)$$

в котором  $J_{2k}(a)$  — функция Бесселя первого рода.

Тогда с учетом (5) можно рассчитать коэффициенты разложения (4) для выражения (3) с учетом четности функции (2).

В результате получим

$$f(x) = J_0\left(\frac{\pi}{2}\right)T_0(x) + \sum_{n=1}^n (-1)^n 2J_{2n}\left(\frac{\pi}{2}\right)T_{2n}(x), \quad (6)$$

где  $T_{2n}(x)$  являются полиномами Чебышева первого рода [5].

Таким образом, из (6) можно получить выражения для аппроксимации функции (2) с различной точностью:

$$f_1(x) = J_0\left(\frac{\pi}{2}\right)T_0(x) - 2J_2\left(\frac{\pi}{2}\right)T_2(x), \quad (7)$$

$$f_2(x) = J_0\left(\frac{\pi}{2}\right)T_0(x) - 2J_2\left(\frac{\pi}{2}\right)T_2(x) + 2J_4\left(\frac{\pi}{2}\right)T_4(x). \quad (8)$$

На рис. 1 представлен график абсолютной погрешности  $\Delta n$  вычисления значений функции (2) для выражения (8). На его основе можно сделать вывод о том, что для разложения функции косинуса с  $\Delta n < 10^{-3}$  (или относительной погрешностью менее 0,1 %) достаточно использовать три члена разложения (6).

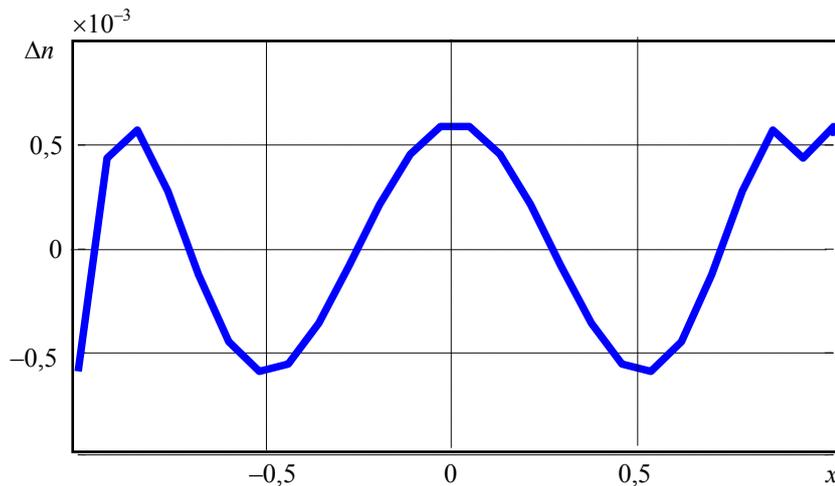


Рис. 1

Использование выражения (8) позволяет получить значения косинуса на промежутке  $-1 \leq x \leq 1$  ввиду периодичности функции косинуса. Выражение (8) может быть использовано для генерации гармонического сигнала косинуса.

На рис. 2 представлены результаты функционального моделирования схемы генератора гармонических сигналов на основе полиномов Чебышева, выполненного в программе верификации логических схем iSim среды разработки ISE Xilinx Design Suite 13.4 [6].

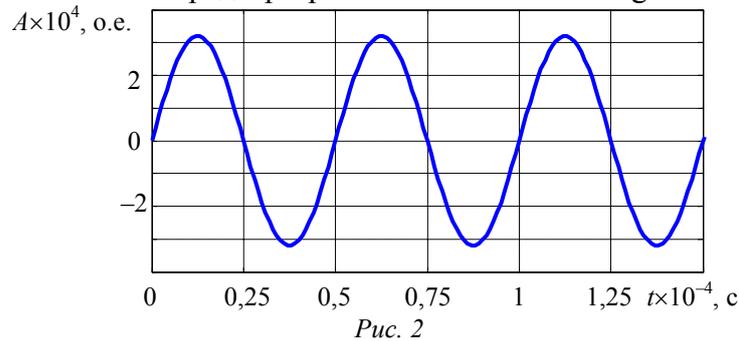


Рис. 2

График косинуса с амплитудой  $A$  и частотой 20 кГц подтверждает работоспособность предложенного алгоритма генерации гармонических сигналов на основе полиномов Чебышева и правильность построения схемы генерации гармонических сигналов на ПЛИС.

Таким образом, представлены метод генерации гармонических сигналов и его программная реализация на ПЛИС. Преимуществами предложенного метода являются возможность вычисления значений гармонического сигнала с высокой точностью, отсутствие ошибок, связанных с конечными размерами аккумулятора фазы, а также устранение необходимости хранения в памяти ПЛИС значений фазы или отсчетов гармонических сигналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yin Sh., Ruffin P. B., Yu F. T. S. Fiber Optic Sensors. Pennsylvania State University: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 477 p.
2. Варжель С. В., Стригалева В. Е. Метод устранения влияния сигнала помехи на чувствительность приема гидроакустической антенны на основе волоконных брэгговских решеток // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2010. Вып. 5(69). С. 5—8.
3. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и технологии. 2001. № 7. С. 50—54.
4. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Сов. радио, 1977. 608 с.
5. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов сумм рядов и произведений. М.: Физматгиз, 1963. 1100 с.
6. Тарасов И. Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. 252 с.

#### Сведения об авторах

**Михаил Юрьевич Плотников**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; инженер-исследователь; E-mail: plotnikov-michael@yandex.ru

**Иван Геннадьевич Дейнека**

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; младший научный сотрудник; E-mail: vanoDNK@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
физики и техники оптической связи

Поступила в редакцию  
13.05.13 г.

## SUMMARY

### P. 3—6.

#### AREA PREDICTION OF LAUNCHER DETACHABLE ELEMENT FALL BASED ON MEASURED DATA

The problem of accuracy improvement of area prediction of launcher detachable element fall is considered. An approach to refinement of model of detachable element movement is proposed based on the use of data obtained with measuring instruments along the space apparatus launch rout.

**Keywords:** launcher, detachable element, impact area, functional, measurement.

##### *Data on authors*

- Nikolay F. Averkiev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Navigation and Ballistic Support in Aerospace Means Application and Aircraft Flight Theory, St. Petersburg, Chief of the Department, E-mail: averkievnf@yandex.ru
- Dastanbek A. Bulekbaev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Higher Mathematics; St. Petersburg, E-mail: atiman@mail.ru

### P. 7—14.

#### TEST POLYNOMIALS OF GORDON—MILLS—WELCH SEQUENCES

An algorithm of Gordon—Mills—Welch sequences building up is proposed. The algorithm is based on the use of structural properties of finite fields with double expansion.

**Keywords:** sequences with compound period, correlation function, finite fields, indivisible and primitive polynomials.

##### *Data on author*

- Victor G. Starodubtsev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Wireless Telecommunications; E-mail: vgstarod@mail.ru

### P. 14—19.

#### FRACTAL ANALYSIS OF BRAIN TOMOGRAMS

The fractal analysis application for quantitative estimation of object structure is studied. Results of Hurst parameter calculation for magnetic resonance images of brain are presented. The distribution parameters are evaluated, and probability intervals are estimated. Stochastic modeling carried out for the normal and the uniform distributions reveals specific features of Hurst parameter used as a diagnostic indicator.

**Keywords:** Hurst parameter, fractal analysis, tomography, distribution, modeling.

##### *Data on authors*

- Alla A. Vinogradova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: vinogradova\_a@list.ru

- Anna O. Kaznacheeva** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography; E-mail: a\_kazn@mail.ru
- Viktor M. Musalimov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; Head of the Department; E-mail: musvm@yandex.ru

P. 20—24.

### TRENDS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY PROGRESS IN THE FIELD OF SERVERS MANUFACTURING FOR DATA CENTERS

Analysis of server equipment market is presented; comparative analysis of servers' characteristics is carried out using the production of largest manufacturers as an example. The main tendencies in research and development of the server equipment manufacturing for data-centers are formulated.

**Keywords:** server, processor, technologies, software, blade server, energy efficiency.

#### *Data on authors*

- Yury L. Leokhin** — Dr. Techn. Sci., Professor; National Research University Higher School of Economics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics; E-mail: yleokhin@hse.ru
- Igor N. Dvoretzkiy** — National Research University Higher School of Economics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics; Researcher; E-mail: idvoretzkiy@hse.ru

P. 25—32.

### PARALLEL SOLUTION OF THE HARTREE–FOCK PROBLEM FOR GRAPHENE MOLECULE: SCALABILITY AND HYPEREFFICIENCY

A method of parallel solution of Hartree–Fock problem based on DC algorithm is considered. Calculation of the self-consistency problem solution is partly carried out with local processors to minimize the computational time.

**Keywords:** self-consistency problem, grapheme, parallel algorithm, Hartree–Fock problem, computation time minimization, quantum chemistry, scalability.

#### *Data on authors*

- Andrey I. Svitenkov** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute; Engineer; E-mail: svitenkov@yandex.ru
- Dmitry M. Spelnikov** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute; Junior Scientist; E-mail: pilule@yandex.ru
- Vladimir G. Maslov** — Dr. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Research Center of Information Optical Technologies; Leading Scientist; E-mail: maslov04@bk.ru
- Alexander V. Bukhanovsky** — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute; Director; E-mail: avb\_mail@mail.ru

## P. 33—38.

**NEURAL NETWORK CONTROL SYSTEM OF NONLINEAR DYNAMICS OF BUCK CONVERTER**

A design of neural network control system of buck converter based on direction-to-target method is presented. With the system, given nonlinear dynamic properties of the converter are maintained.

**Keywords:** pulse converter, nonlinear dynamics, bifurcation, periodic mode, method of direction to target.

*Data on authors*

- Alexey I. Andriyanov* — Cand. Techn. Sci.; Bryansk State Technical University, Department of Electronics, Radioelectronic and Electrotechnical Systems; E-mail: ahaos@mail.ru
- Nikita A. Krasnov* — Post-Graduate Student; Bryansk State Technical University, Department of Electronics, Radioelectronic and Electrotechnical Systems; E-mail: nike\_borzoy@mail.ru

## P. 38—43.

**PHASE LOCKED LOOP SYSTEM SYNTHESIS FOR THREE-PHASE ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER CONTROL SYSTEM**

Phase locked loop system synthesis method is described in terms of state space formalism. Implementation of synthesized phase locked loop system in three phase active voltage rectifier control system allows to compensate for reactive power component and to correct current shape in mains.

**Keywords:** active voltage rectifier, phase locked loop, state regulator, reduced dimensionality observer.

*Data on authors*

- Artur A. Abdullin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrotechnics and Precision Electromechanical Systems; E-mail: artur.abdullin@gmail.com
- Nikolay A. Polyakov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrotechnics and Precision Electromechanical Systems; E-mail: polyakov.ets.itmo@gmail.com

## P. 43—46.

**ACCURACY PARAMETERS OF A NONLINEAR LINK FOR SELF-OSCILLATORY ACCELEROMETER**

The effects of deviation of radioelement parameters from their nominal values on accuracy of measurements with pendulum accelerometer in self-oscillatory operation mode are considered. Recommendations for minimization of the effects are formulated.

**Keywords:** sensor, self-oscillatory mode, acceleration measurement error, accelerometer, indignation.

*Data on authors*

- Sergey V. Luchko* — Dr. Techn. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measuring Complexes, St. Petersburg
- Sergey Yu. Baluev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measuring Complexes, St. Petersburg
- Michael A. Vatutin* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Airborne Information and Measuring Complexes, St. Petersburg
- Yury A. Kuzmichev* — Cand. Techn. Sci.; Mozhaysky Military Space Academy, Department of Autonomous Testing, St. Petersburg
- Alexey I. Klyuchnikov* — 1-st GIK, Mirny, Arkhangelsk region; Senior Testing Engineer
- Vitaly P. Efimov* — Mozhaysky Military Space Academy, Military Research Institute, St. Petersburg; Senior Scientist

P. 47—50.

### ANALYSIS OF EFFICIENCY OF INFRARED IMAGERS DATA CORRECTION

Comparison of various methods of test bench calibration of infrared imagers is carried out and stability of the imagers' parameters is estimated. Correction procedure performed just after calibration is shown to allow for high quality of images.

**Keywords:** infrared imager, non-uniformity correction, defective elements.

#### *Data on authors*

- Sergey M. Borzov* — Cand. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk; Head of Laboratory; E-mail: borzov@iae.nsk.su
- Victor I. Kozik* — Cand. Techn. Sci.; Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk; Senior Scientist; E-mail: kozik@iae.nsk.su
- Artem S. Feoktistov* — Novosibirsk State University, Department of Automation of Physical and Technical Research; Software Engineer; E-mail: feoktistov.artem@gmail.com

P. 51—56.

### A METHOD FOR CALCULATION OF NON-STATIONARY TEMPERATURE OF SPACE OBJECT ON A CIRCULAR ORBIT

A formula for energy balance of spherical space object with uniform temperature is derived with the account for the orbit altitude and slope. The proposed approach incorporates evaluation of integral coefficients of the object exposure to the Earth infrared radiation and solar radiation reflected by the Earth. A mathematical model for calculation of non-stationary temperatures of the object in transition between shadowed to sun-illuminated orbit segments is presented.

**Keywords:** space object, irradiation coefficient, thermal condition, radiative heat transfer.

#### *Data on authors*

- Yulia V. Bayova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Evgeniy V. Lapovok* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Sergey I. Khankov* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring

**P. 57—61.****IMPROVEMENT OF LASER THERMOCHEMICAL RECORDING ON THIN CHROMIUM FILMS USING REPEATED PROCESSING**

A method for improvement of spatial resolution of planar structures produced by repeated local laser-induced oxidation of thin chromium film and subsequent etching is investigated theoretically.

**Keywords:** laser-induced oxidation, diffractive optical elements, metallic film.

*Data on authors*

- Vadim P. Veiko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Ecological Engineering; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru
- Elena A. Shakhno* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Ecological Engineering; E-mail: elena.shakhno@rbcmail.ru
- Dmitry A. Sinev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Laser Technologies and Ecological Engineering; E-mail: sinev\_dm@mail.ru

**P. 61—65.****NONREGULAR DIFFRACTION GRATING FOR LASER LINE GENERATOR**

Manufacturing of diffraction grating of “battered” period for laser line generator is analyzed. The method under consideration is based on nano-imprint replication of master sample made by laser engraving of thermosensible film. Optical characteristics of the obtained diffraction optical element are measured.

**Keywords:** diffraction optical element, laser line generator, nano imprint.

*Data on authors*

- Vera K. Balya* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; Engineer-Researcher; E-mail: Vera\_Balya@mail.ru
- Igor Yu. Denisyuk* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; Head of the Department: denisiuk@mail.ifmo.ru
- Elisabeth B. Sheklanova* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; Engineer; E-mail: e.sheklanova@gmail.com
- Nadezhda D. Vorzobova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; E-mail: vorzobova@mail.ifmo.ru

**P. 66—68.****UNCERTAINTY ANALYSIS OF PREDICTION MODELING OF COMPLEX SYSTEMS: DATA UNDERSTANDING AND ENSEMBLE TECHNOLOGIES**

Combined application of data understanding methods and ensemble technologies to uncertainty analysis of prediction modeling of complex systems is discussed using the problem of St. Petersburg flood prevention as an example.

**Keywords:** mathematical modeling, uncertainty, prediction modeling, complex system.

*Data on authors*

- Sergey V. Ivanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute
- Alexander V. Bukhanovsky* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute; Director;  
E-mail: avb\_mail@mail.ru

P. 68—71.

**DESIGN OF HARMONIC SIGNAL GENERATION BLOCK OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING CIRCUIT IN FIBER-OPTIC HYDROPHONE**

A method of harmonic signals generation using Chebyshev polynomials is proposed for the digital signal processing circuit in interferometric-type fiber-optic hydrophone. Realization of the method with a field programmable gate array was developed and tested.

**Keywords:** fiber-optic hydrophone, field programmable gate array, digital signal processing, harmonic signals, Chebyshev polynomials.

*Data on authors*

- Mikhail Yu. Plotnikov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Department of Optical Communications Physics and Technology;  
E-mail: plotnikov-michael@yandex.ru
- Ivan G. Deyneka* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Department of Optical Communications Physics and Technology;  
E-mail: vanoDNK@yandex.ru

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2013 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А.	Метод поиска оптимальной программы движения ракет-носителей для минимизации площади рассеивания отделяемых частей	7
Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А.	Метод синтеза программы движения ракеты космического назначения для минимизации затрат на выведение полезного груза	10
Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А.	Прогнозирование районов падения отделяемых частей ракет-носителей с учетом информации измерительных средств	12
Виноградова А. А., Казначеева А. О., Мусалимов В. М.	Фрактальный анализ томограмм головного мозга	12
Волхонский В. В.	Критерии выбора контролируемых средствами обнаружения параметров в системе безопасности	1
Воронюк М. Н.	Математическое моделирование процессов фильтрации в перколяционных решетках с использованием вычислительных систем сверхвысокой производительности	5
Духанов А. В., Болгова Е. В., Гервич Л. Р., Колпаков В. Г., Кравченко Е. Н., Курочкин И. И., Масленников Е. Д., Офёркин И. В., Рубцов А. О., Смирнов С. А., Штейнберг О. Б., Юрушкин М. В.	Предметно-ориентированные технологии создания виртуальных рабочих пространств в среде облачных вычислений CLAVIRE	5
Красильников А. В., Красильников Р. В.	Исследование способа пуска подводных аппаратов с надводного носителя	10
Леохин Ю. Л., Дворецкий И. Н.	Тенденции развития науки и техники в области производства серверного оборудования для дата-центров	12
Лысенко И. В., Птушкин А. И., Соколов Б. В.	Методика синтеза комплекта ЗИП на основе динамического программирования	3
Лямкин А. А., Микуленко Н. П., Тревогода Т. Ф.	Язык описания процессов обработки информации в технических системах	5

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Нивин А. Е., Саушев А. В., Шошмин В. А.	Синтез ортогональных фильтров при статистической идентификации динамических систем	10
Попов Р. И.	Высокоуровневый синтез цифровых схем с использованием инфраструктуры LLVM	3
Рожнев А. Ю., Сергеев Б. С., Тильк И. Г.	Повышение надежности систем передачи информации на основе теории запретов булевых функций	1
Свитенков А. И., Спельников Д. М., Маслов В. Г., Бухановский А. В.	Параллельное решение задачи Хартри—Фока для молекулы графена: масштабируемость и гиперэффективность	12
Сеньченков В. И.	Решающие правила в алгоритмах определения технического состояния системы	3
Сизиков В. С., Кириянов К. А., Экземпляров Р. А.	Два быстрых алгоритма восстановления смазанных изображений	10
Стародубцев В. Г.	Проверочные полиномы последовательностей Гордона—Миллса—Велча	12
Терехов В. А., Майков К. А., Жиряков С. М.	Построение семантически содержательных правил экспертных систем в задачах с повышенной точностью решения	1

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Абдуллин А. А., Поляков Н. А.	Синтез системы фазовой автоподстройки частоты для трехфазного активного выпрямителя напряжения	12
Андрянов А. И., Краснов Н. А.	Нейросетевая система управления нелинейной динамикой непосредственного понижающего преобразователя напряжения	12
Арсеньев В. Н., Кохановский А. Г., Фадеев А. С.	Математическая модель связи изохронных вариаций переменных состояния системы управления с возмущениями параметров ее составных частей	3
Арсеньев В. Н., Фадеев А. С.	Методика проверки соответствия характеристик системы управления заданным требованиям по ограниченному числу испытаний	10
Камкин О. Ю., Ремизова О. А., Сыроквашин В. В., Фокин А. Л.	Робастная стабилизация многомерного линейного объекта с запаздываниями по управлению	10
Карагодин В. В.	Особенности оптимального по быстродействию управления интегрирующим звеном с присоединенным гармоническим осциллятором	10

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Кузнецов А. Б., Осипов Н. А., Дорожко И. В.	Методика диагностирования автоматизированных систем управления сложными объектами с использованием априорной информации	1
Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватугин М. А., Гурьев И. С.	Влияние внешних возмущений на погрешность инерциальных датчиков	1
Лучко С. В., Балуев С. Ю., Ватугин М. А., Кузьмичев Ю. А., Ключников А. И., Ефимов В. П.	Точностные параметры нелинейного звена для автоколебательного акселерометра	12
Мусалимов В. М., Заморуев Г. Б., Монахов Ю. С.	Моделирование динамики измерительной системы мониторинга подземных камер	10
Фургат И. Б.	Адаптивное управление неминимально-фазовыми нелинейными объектами	3
Фургат И. Б.	Робастный статический алгоритм управления линейными объектами с запаздыванием	1
Андреев Ю. С., Медунецкий В. В.	Исследование изменения микрорельефа поверхностей в процессе их трения скольжения	9
Безрядин М. М., Лозгачев Г. И.	Построение модального робастного регулятора при возмущающих и задающих воздействиях	7
Голубчиков М. А., Кузьмин Ю. П.	Образование регулярного микрорельефа на станке с числовым программным управлением	9
Калявин В. П., Нгуен Ч. В., Та Х. Т.	Использование метода чувствительности функции передачи для анализа диагностической модели гребной электрической установки	5
Красильников А. В.	Поворотный гидродинамический стенд и методика оценки его габаритных характеристик	5
Малышев В. В., Кабанов Д. С.	Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости	7

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Данилова Т. В., Архипова М. А.	Определение ориентации космического аппарата в геоцентрической экваториальной системе координат на основе астроизмерений при отсутствии данных о параметрах орбиты	7
Лестев А. М., Ефимовская А. В.	О влиянии нелинейных факторов на динамику микромеханического гироскопа с двухмассовым чувствительным элементом	5
Мысливцев Т. О.	Оценка чувствительности алгоритма вторичной обработки навигационных измерений к возмущениям параметров модели наблюдения	5

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Падерина Т. В., Соколов Д. А.	Варианты конструктивной реализации диаметральной схемы гироинклинометра для высокоширотных систем подземной навигации	7
<b>ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ</b>		
Ефремов Л. В., Кумова Ж. В.	Метрологическая оценка надежности мерительного инструмента учебного и научного назначения	3
Куликов В. А., Куликов А. В.	Цена деления и разрешающая способность шкалы	3
<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА</b>		
Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю.	Повышение точности измерения констант релаксации текущей жидкости в ядерно-магнитном спектрометре	10
Зиатдинов С. И.	Синтез оптимальных экстраполяторов	1
Коршунов А. И.	Повышение качества стабилизации выходного напряжения импульсного преобразователя постоянного тока	3
Нестеренко С. А., Чулков В. А.	Управляемый кольцевой генератор импульсов	10
Сандовский В. А., Файншмидт Е. М.	Исследование магнитной проницаемости стальных образцов в однородном переменном поле при упругой деформации на растяжение	3
Шимаров А. И.	Способ определения углового положения объектов	1
<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ</b>		
Алексеев С. А., Матвеев Н. В.	Способ измерения поляризационной чувствительности приемников оптического излучения	5
Андреев А. Л., Коротаяев В. В., Пашковский Д. М.	Селекция изображений малоразмерных объектов на неоднородном фоне в условиях помех	10
Араканцев К. Г., Горбачёв А. А., Серикова М. Г.	Стереоскопическая система контроля фактического положения железнодорожного пути	5
Балошин Ю. А., Рыжов М. Г., Силин П. Н., Сорокин А. А., Устинсков М. А.	Использование ближнепольного ВЧ-зондирования для оценки степени поверхностной активности полиэтиленового покрытия трубопроводов	1
Белов Н. П., Грисимов В. Н., Смирнов Ю. Ю., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д.	Колориметрический датчик на основе трехэлементного RGB-фотодиода	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Белов Н. П., Грисимов В. Н., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д.	Моделирование интегрирующей сферы с экраном	5
Большаков О. П., Котов И. Р., Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т.	Анализ влияния перекрестной интерференции на погрешность интерферометра сдвига	5
Васильев А. С., Краснящих А. В., Кортаев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Широков А. С.	Математическая модель лесного пожара как источника инфракрасного излучения	7
Васин Н. Н., Куринский В. Ю.	Измерение скорости движения протяженных объектов системами видеонаблюдения	10
Вейко В. П., Самохвалов А. А.	Лазерная очистка растриванных валов со спектральным контролем	3
Гарютин И. А.	Формирование критерия подобия цветовых характеристик газоразрядных металлогалогенных ламп	3
Головков В. А., Емельянов В. Н., Солк С. В.	Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК-диапазоне	5
Горбунова Е. В., Кортаев В. В., Перегягин В. С., Чертов А. Н.	Моделирование многокомпонентного источника излучения	5
Ерофеев И. В.	Автоколлимационная фокусировка оптико-электронных систем инфракрасного спектра	7
Зрюмов Е. А., Пронин С. П.	Анализ частотно-контрастной характеристики видеосистемы на основе ПЗС-фотоприемника при вибрации тест-объекта	3
Латыев С. М., Воронин А. А., Андинг К., Линц Э., Курицын П. А.	Оптико-электронные методы и средства идентификации веществ и материалов	10
Лобачев В. В.	Оценка эффективности высокоэнергетического лазера-усилителя	3
Пикуль О. Ю., Куликова Г. В., Строганов В. И.	Трансформация коноскопических картин кристалла при изменении оптической системы наблюдения	1

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Саушин А. С., Лещёв А. М., Михеев Г. М.	Расчет неослепляющего светодиодного светильника	7
Смирнов Н. В., Прокофьев А. В.	Оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности	7
Смирнова М. В., Воронин А. А., Бурбаев А. М.	Способ повышения разрешающей способности спектрофотометра с вогнутой дифракционной решеткой	5
Собещук Н. О., Денисюк И. Ю., Фокина М. И.	Исследование эффективности фокусировки излучения полимерными торцевыми микрооптическими элементами, сформированными путем фотополимеризации	1
Соколов С. В., Каменский В. В.	Оптический пространственно-частотный аналого-цифровой преобразователь	7
Сушков А. Л.	Исправление сферической аберрации и хроматизма в синглете и дублете введением осевого градиента показателя преломления	10
Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Фесько Ю. А., Кудряшов К. В., Луговских С. В.	Методика расчета звездной величины Международной космической станции	5
Шкурский Б. И.	Обнаружение цифровых сигналов в оптико-электронных пеленгаторах	10
Яковлева Т. В., Арефьева Н. Н.	Расчет геометрических параметров канальных волноводов для электрооптических модуляторов	5

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Астафьев С. А.	Решение интегродифференциального уравнения теплопереноса в задаче моделирования процесса распространения лесного пожара	7
Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И.	Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли	7
Баёва Ю. В., Ханков С. И.	Обеспечение термостабильности телескопа дистанционного зондирования Земли за счет выбора параметров бленды	5
Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И.	Методика расчета нестационарных температур космического объекта на круговых орбитах	12
Борзов С. М., Козик В. И., Феоктистов А. С.	Исследование эффективности коррекции данных тепловизионных камер	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А.	Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа	5
Громов Д. С., Шарков А. В.	Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов	1
Кораблев В. А., Минкин Д. А., Савинцева Л. А., Шарков А. В.	Исследование мощности тепловыделений в элементах электронной и оптоэлектронной техники	3
Пилипенко Н. В., Польщиков Г. В., Сиваков И. А.	Установка для определения динамических характеристик сенсоров теплового потока	5
Ходунков В. П.	Качество псевдооживления: путь к энергоресурсосберегающим технологиям	1
Ходунков В. П.	Определение теплопроводности электропроводных материалов методами радиационной термометрии	3
<b>ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ</b>		
Баля В. К., Денисюк И. Ю., Шекланова Е. Б., Ворзобова Н. Д.	Нерегулярная дифракционная решетка для лазерного генератора линии	12
Вейко В. П., Шахно Е. А., Синев Д. А.	Повышение разрешающей способности лазерной термохимической записи на тонких пленках хрома путем многократного воздействия	12
Каракулев Ю. А.	Статистический анализ методов контроля соосности отверстий в корпусных деталях машин	7
Кинжагулов И. Ю., Быченко В. А.	Методика лазерно-ультразвукового контроля качества изготовления паяных соединений	5
Ларин В. П., Шелест Д. К.	Операционный контроль в процессе изготовления электронных модулей с внутренним монтажом	1
Мамалимов Р. И., Щербаков И. П., Мамедов Р. К.	Механолюминесценция кварца и органического стекла при ударном воздействии	7
Медунецкий В. М., Шмидберская А. А.	Формирование регулярных микрорельефов на поверхности твердых тел остросфокусированным пучком тяжелых ионов	7
Мешковкий И. К., Варжель С. В., Беликин М. Н., Куликов А. В., Брунов В. С.	Термический отжиг решеток Брэгга при изготовлении волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков	5

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Юльметова О. С., Валетов В. А., Щербак А. Г.	Использование теории планирования эксперимента при оптимизации шероховатости функциональных поверхностей	1
Яковлева С. А., Щербак А. Г., Беляев С. Н.	Методы формообразования аэродинамического профиля газового подшипника	5

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

Алешко Р. А., Гурьев А. Т.	Методика тематического дешифрирования спутниковых снимков лесных территорий на основе структурных моделей	7
Горбунова Е. В., Павленко Н. А., Чертов А. Н.	Модель оптического сепаратора руд твердых полезных ископаемых	7
Горбунова Е. В., Петухова Д. Б., Чертов А. Н.	Некоторые аспекты автоматической оценки применимости оптического метода для обогащения руд твердых полезных ископаемых	10
Иванов С. В., Бухановский А. В.	Анализ неопределенности предсказательного моделирования сложных систем: усвоение данных и ансамблевые технологии	12
Марцуков А. А., Воронин А. А., Бурбаев А. М.	Анализ технических средств для обнаружения посторонних объектов	5
Павлычева Н. К., Лукин А. В., Мельников А. Н., Муслимов Э. Р., Петрановский Н. А.	Опыт использования комплекса „Основы дифракционной оптики и голографии“	10
Плотников М. Ю., Дейнека И. Г.	Разработка блока генерации гармонических сигналов для схемы цифровой обработки информации волоконно-оптического гидрофона	12

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****РЕЧЕВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ**

Алейник С. В., Симончик К. К.	Алгоритмы выделения типовых помех и искажений в речевых сигналах	2
Алейник С. В., Столбов М. Б.	Подавление акустических помех аудиоустройств с использованием асинхронного опорного сигнала	2
Бибиков С. В., Маркисонов М. Е., Панасюк С. А.	Современная мобильная система оповещения о приближении поездов	2
Дырмовский Д. В., Коваль С. Л.	Особенности человеко-машинного интерфейса современных систем биометрической идентификации	2
Матвеев Ю. Н.	Исследование информативности признаков речи для систем автоматической идентификации дикторов	2

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Матвеев Ю. Н.	Оценка доверительного интервала общего решения ансамбля классификаторов	2
Пеховский Т. С., Сизов А. Ю.	Сравнение различных смесей гауссовых PLDA-моделей в задаче текстонезависимого распознавания диктора	2
Смирнова Н. С., Хитров М. В.	Фонетически представительный текст для фундаментальных и прикладных исследований русской речи	2
Соломенник А. И., Таланов А. О., Соломенник М. В., Хомицевич О. Г., Чистиков П. Г.	Оценка качества синтезированной речи: проблемы и решения	2
Соломенник А. И., Чистиков П. Г., Рыбин С. В., Томашенко Н. А.	Автоматизация процедуры подготовки нового голоса для системы синтеза русской речи	2
Ткачя А. В., Давыдов А. Г., Киселёв В. В., Хитров М. В.	Классификация эмоционального состояния диктора с использованием метода опорных векторов и критерия Джини	2
Хомицевич О. Г., Рыбин С. В., Аничкин И. М.	Использование лингвистического анализа для нормализации текста и снятия омонимии в системе синтеза русской речи	2
Чистиков П. Г., Корольков Е. А., Таланов А. О., Соломенник А. И.	Гибридная технология синтеза речи на основе скрытых марковских моделей и алгоритма Unit Selection	2

## ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

### УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Арановский С. В., Фрейдович Л. Б., Никифорова Л. В., Лосенков А. А.	Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя. Часть I. Моделирование	4
Арановский С. В., Фрейдович Л. Б., Никифорова Л. В., Лосенков А. А.	Моделирование и идентификация динамики золотникового гидрораспределителя. Часть II. Идентификация	4
Бирюков Д. С., Дударенко Н. А., Ушаков А. В.	Контроль вырождения динамических объектов и систем: грамианный подход	4
Блинников А. А., Бойков В. И., Булатов В. В., Кульчицкий А. А., Спорягин А. В.	Коррекция искажений перспективы в системе технического зрения	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бобцов А. А., Ведяков А. А., Колюбин С. А., Пыркин А. А.	Гибридный алгоритм управления по выходу с компенсацией неизвестного мультисинусоидального возмущения	4
Бойков В. И., Быстров С. В., Королёв А. Ю.	Динамика пьезопривода с управлением от широтно-импульсного модулятора с тремя состояниями	4
Болтунов Г. И., Лямин А. В., Петрик А. И.	Алгоритм управления движением мобильного колесного робота в задаче слежения за экзосистемой	4
Боргуль А. С., Зименко К. А., Маргун А. А., Кремлев А. С.	Многофункциональный активный протез руки	4
Бушуев А. Б., Мансурова О. К.	Синтез управлений в двумерной системе с гладкими нелинейностями	4
Григорьев В. В., Бойков В. И., Быстров С. В., Рябов А. И., Мансурова О. К.	Исследование процессов позитивных систем на основе качественной экспоненциальной устойчивости	4
Григорьев В. В., Бушуев А. Б., Коровьяков А. Н., Литвинов Ю. В.	Анализ влияния ветровых возмущений на систему стабилизации курса летательных аппаратов	4
Григорьев В. В., Быстров С. В., Першин И. М., Наумова А. К., Гурьянова А. Н.	Экспоненциальная устойчивость линейных систем с распределенными параметрами	4
Капитанюк Ю. А., Чепинский С. А.	Задача управления многоканальной динамической системой по кусочно-гладкой траектории	4
Кремлев А. С., Колюбин С. А., Вражевский С. А.	Автономная мультиагентная система для решения задач мониторинга местности	4
Музыка Д. А., Пещеров Р. О., Тертычный-Даури В. Ю.	Эредитарная модель инерционного запаздывания в задаче оптимального управления	4
Пыркин А. А., Мальцева Т. А., Лабадин Д. В., Суров М. О., Бобцов А. А.	Синтез системы управления квадрокоптером с использованием упрощенной математической модели	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Слита О. В., Ушаков А. В.	Обобщенное модальное управление в задаче синтеза параметрически инвариантных дискретных систем	4
Чеботарев С. Г., Кремлев А. С.	Синтез интервального наблюдателя для линейной системы с переменными параметрами	4

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Алехин А. А., Горбунова Е. В., Кортаев В. В., Ольховский А. М., Петухова Д. Б., Чертов А. Н.	Оптико-электронная система экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом	11
Андреев А. Л., Вараткова А. П.	Эффективность алгоритмов формирования и обработки межкадрового разностного сигнала при обнаружении объектов в сложных условиях наблюдения	11
Беднова М. В., Конопелько Л. А.	Аттестация стандартных образцов поверочных газовых смесей с помощью лазерного интерференционного рефрактометра	11
Беднова М. В., Конопелько Л. А.	Применение новых стандартных образцов наркотических газов при проверке медицинской аппаратуры	11
Васильев А. С., Краснящих А. В., Лашманов О. Ю.	Алгоритмы фильтрации задымленного изображения	11
Виноградова К. А., Бугров В. Е., Ковш А. Р., Одноточков М. А., Николаев В. И., Романов А. Е.	Деградация белых и синих светодиодов при длительном времени работы	11
Горбачёв А. А., Кортаев В. В., Пантюшина Е. Н.	Оптико-электронная система контроля положения поршня в клапане	11
Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Подгорных Ю. А.	Варианты зеркальных оптических систем с главным зеркалом сферической формы	11
Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Тимощук И. Н.	Волновая аберрация изображения точки при центральном экранировании входного зрачка	11
Зверев В. А., Карпова Г. В., Тимощук И. Н.	Телеобъектив с афокальной двухзеркальной насадкой	11
Зверева Е. Н., Лебедько Е. Г., Фи Хуан Тунг	Потери информации при преобразовании поля в оптическом тракте оптико-электронного прибора	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Иванов А. Н., Киреев В. Е., Носова М. Д.	Дифракционные методы контроля пространственного положения объектов	11
Ивукин И. Н., Белов А. Ю., Бугров В. Е., Ковш А. Р., Одноблюдов М. А., Романов А. Е.	Оптимизация радиатора ретрофитной светодиодной лампы	11
Ковалева А. С.	Метод расчета концентрических зеркальных, зеркально-линзовых и линзовых систем	11
Коняхин А. И., Молев Ф. В., Тимофеев А. Н.	Синтез отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с встроенным матричным полем	11
Латыев С. М., Буй Динь Бао	Методы центрировки линз в оптических системах	11
Леонов М. Б., Разумовский И. Т.	Концептуальная модель трехкоординатного оптико-электронного целеуказателя	11
Малютин В. Е., Толстоба Н. Д., Емельянов Э. В., Якопов Г. В.	Автоматизация обработки данных при контроле оптических систем методом Гартмана	11
Смехов А. А., Коняхин И. А.	Исследование облученности виньетируемого изображения в автоколлимационной системе с помощью компьютерного моделирования	11

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

**К 45-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
ЮГО-ЗАПАДНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Бобынцев Д. О., Борзов Д. Б., Типикин А. П.	Анализ качества размещения параллельных подпрограмм в матричных мультиконтроллерах	6
Бобырь М. В.	Проектирование адаптивной нечетко-логической системы управления. Часть II	6
Бобырь М. В., Титов В. С.	Проектирование адаптивной нечетко-логической системы управления. Часть I	6
Борзов Д. Б., Соколова Ю. В., Минайлов В. В.	Перераспределение подпрограмм в отказоустойчивых мультипроцессорных системах	6
Бредихин Р. В., Ньян Лин, Зотов И. В.	Об организации встроенного аппаратного взаимоконтроля в логических мультиконтроллерах	6

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Ватугин Э. И., Леонов М. Е.	Использование смежной окрестности при жадном последовательном формировании блоков разбиения граф-схем параллельных алгоритмов	6
Ватугин Э. И., Титов В. С.	Алгоритмическая оптимизация программной реализации метода параллельно-последовательной декомпозиции граф-схем параллельных алгоритмов	6
Егоров С. И., Авдеев В. О., Ватугин Э. И., Панищев В. С.	Декодер LDPS-кодов для цифрового телевидения	6

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

## ВОПРОСЫ ХРАНЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Акмалходжаев А. И., Козлов А. В.	Новый алгоритм списочного декодирования турбокодов	8
Алексеев М. О.	Нижняя граница длины систематических равномерно надежных кодов	8
Афанасьева А. В., Иванов Д. О., Рыжов Д. А.	Алгоритм вставки цифровых водяных знаков при использовании стандарта H.264	8
Бакин Е. А., Смирнов К. Н.	Метод оценки топологии беспроводной сети с применением априорной информации о расположении устройств	8
Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В.	Оценка надежности отказоустойчивых кластеров с непосредственным подключением устройств хранения	8
Веселов А. И., Гильмутдинов М. Р., Филиппов Б. С.	Метод генерации сторонней информации для систем распределенного кодирования видеоисточников	8
Гранкин М. А., Пустовалов Е. В., Тюрликов А. М.	Анализ процедуры погашения интерференции в OFDM-системе со случайным множественным доступом	8
Гурнов К. Б., Евсеев Г. С.	Синтез оптимального правила приема сигнала на фоне перекрестных помех в системе WCAN	8
Дужин В. С., Евсеев Г. С., Линский Е. М.	Оценка эффективности алгоритма управления объемом разделов кэша системы хранения данных	8
Ковалев Д. А., Беззатеев С. В.	Защита протоколов ультралегкой аутентификации от атак на LSB	8
Козлов А. В., Крук Е. А., Овчинников А. А.	Подход к построению блочно-перестановочных кодов с малой плотностью проверок на четность	8

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Крук Е. А., Маличенко Д. А.	Расчет задержки при использовании кодирования на транспортном уровне сети передачи данных	8
Пустовалов Е. В., Тюрликов А. М.	Анализ режимов энергосбережения мобильного пользовательского устройства	8
Федоренко С. В.	Модификация алгоритма Герцеля—Блейхута	8

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК****К 50-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ  
ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ И БИМЕДИЦИНСКОЙ ОПТИКИ НИУ ИТМО**

Беззубик В. В., Белашенков Н. Р.	Определение функции контрастной чувствительности для систем технического зрения	9
Беликов А. В., Скрипник А. В., Зулина Н. А.	Лазерный синтез наноразмерных углеродных структур и их свойства	9
Беликов А. В., Скрипник А. В., Шатилова К. В.	Лазерное текстурирование твердых биотканей	9
Ведерников Ю. Н., Ермаков И. А., Папченко Б. П., Пичугин А. Н., Тараканов Е. В.	Исследование оптической мощности излучения и температуры чипа УФ-светодиода в импульсном режиме	9
Веселовский А. Б., Гузалов П. И., Кириянова В. В., Митрофанов А. С., Фефилов Г. Д., Храмов В. Ю.	Пространственно-энергетические характеристики светодиодов, используемых в фотохромотерапии	9
Веселовский А. Б., Митрофанов А. С., Фефилов Г. Д.	Возможность применения полупроводникового лазера в дифрактометрии	9
Веселовский А. Б., Митрофанов А. С., Фефилов Г. Д.	Погрешность определения размера микрообъекта круглой формы дифракционным методом при неравномерной амплитуде облучающего светового поля	9
Гагарский С. В., Гнатюк П. А., Сергеев А. Н., Храмов В. Ю.	Твердотельные лазеры с диодной накачкой для 3D-маркировки в объеме прозрачных диэлектриков	9
Гагарский С. В., Кийко В. В., Кондратьев В. А., Подвизников В. А., Сергеев А. Н., Чевокин В. К.	Управление временными характеристиками излучения Nd+3:YAG:Cr+4-минилазера с использованием активной внутрирезонаторной оптики	9

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Гагарский С. В., Кийко В. В., Кондратьев В. А., Сергеев А. Н., Храмов В. Ю., Якобсон В. Э.	Компрессия импульсов микрочип-лазера с диодной накачкой при встречном ВКР-преобразовании	9
Гримм В. А., Рудакова М. С., Смирнов С. А.	Микропроекторные системы смешанной и дополненной реальности на плоских волноводных экранах	9
Иночкин М. В., Назаров В. В., Сачков Д. Ю., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю.	Модель многочастотной 3 мкм-генерации излучения лазеров на эрбиевых кристаллах с диодной накачкой	9
Иночкин М. В., Назаров В. В., Федин К. А., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю.	Мощный малогабаритный Nd:YAG-лазер с неустойчивым резонатором	9
Окулов М. В.	Модель визуализации случайного фазового объекта	9
Скрипник А. В.	Оптермический волоконный конвертер лазерного излучения	9
Фефилов Г. Д.	Пространственно-временной бинарный фильтр с перестраиваемыми параметрами для лазерной системы измерительного типа	9
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>		
—	Виталий Семенович Титов. К 70-летию со дня рождения	6
—	Сообщение о международном симпозиуме «Фундаментальные основы лазерных микро-и нанотехнологий»	3
Шехонин А.А., Гвоздев С.С., Алексеева С.А.	Сообщение о конкурсе выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров по направлениям „Приборостроение“, „Оптехника“, „Фотоника и оптоинформатика“, „Лазерная техника и лазерные технологии“ 2012 г.	5