

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Соколов С. В., Кучеренко П. А. Решение задачи нелинейной параметрической идентификации стохастических объектов с использованием критерия минимума вероятности ошибки оценивания..... 5
- Лужков Ю. В. Метод адаптивного скалярного квантования в схемах необратимого сжатия изображений..... 12
- Гладышев К. К., Шульгин Е. А. Система автоматического распознавания речевых команд 17
- Тулупьев А. Л. Преобразование ациклических байесовских сетей доверия в алгебраические байесовские сети..... 21
- Кириллов А. Н. Динамические системы с переменной структурой и размерностью.... 23
- Барбашов Е. А., Демин А. В., Кулагин В. С., Начкебия А. Б. Имитационное моделирование при исследовании временных характеристик дискретных систем 29

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Кабанов С. А., Петухова Е. С. Оптимальное управление ветроэнергетической установкой колебательного типа..... 32

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Тазетдинов А. Д. Технология построения обучающих диалогов в компьютерных системах репетиторского типа 38
- Голицына Т. Д. Интеграция систем управления данными об изделии и систем автоматизированного проектирования: от частных решений к глобальной стратегии 42

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Козлов В. Л. Спектроанализатор доплеровских сигналов 46
- Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н., Стяпшин В. М. Влияние прозрачного покрытия на оптоэлектрический сигнал в нанографитных пленках 51
- Смирнов В. Д., Егельский И. Д., Бендюговский А. Е. Фоторегистрирующие устройства для воспроизведения информации космической метеорологической аппаратуры третьего поколения..... 56
- Нгуен Куанг Хиен, Якушенкова Т. И. Расчет и исследование двухзеркальных композиций оптических систем..... 60

Андреев Л. Н., Комарова Ю. А. Абберационные свойства отражающих поверхностей второго порядка	66
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	
Скворцов А. М., Фам Куанг Тунг. Структура нанокластеров кремния в системе кремний — диоксид кремния	69
Беляев С. Н. Технологические особенности выбора материалов и методов напыления узлов гиросприборов	73
SUMMARY	80

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Sokolov S. V., Kucherenko P. A.** Solution of the Problem of Nonlinear Parametrical Identification of Stochastic Objects Based on the Minimum Criterion of the Estimation Error Probability..... 5
- Luzhkov Yu. V.** Method of Adaptive Scalar Quantization in Lossy Image Compression Schemes..... 12
- Gladyshev K. K., Shulgin E. A.** Speech Commands Automatic Recognition System 17
- Tulupyev A. L.** Transformation of Singly-Connected Bayesian Belief Networks into Algebraic Bayesian Networks 21
- Kirillov A. N.** Dynamic Systems with Variable Structure and Dimension 23
- Barbashov E. A., Demin A. V., Kulagin V. S., Nachkebiya A. B.** Imitating Modeling at Research of Time Characteristics of Discrete Systems..... 29

DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Kabanov S. A., Petukhova E. S.** Optimal Control of Wind-Driven Powerplant by Oscillating Mode..... 32

COMPUTING TECHNIQUE

- Tazetdinov A. D.** Technology of Training Dialogues Construction in Computer Tutorial Training Systems 38
- Golitsyna T. D.** Integration of Product Data Management Systems and Computer-Aided Design Systems: from Partial Solution to Global Strategy 42

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Kozlov V. L.** Doppler Signals Spectrum Analyzer..... 46
- Mikheev G. M., Zonov R. G., Obraztsov A. N., Styapshin V. M.** Influence of Transparent Material on Optoelectric Signal in Nanographite Films..... 51
- Smirnov V. D., Egelsky I. D., Bendugovsky A. E.** Photo Registering Devices for Reproduction of Space-Meteorological Systems of 3rd Generation 56
- Nguyen Quang Hiep, Yakushenkova T. I.** Calculation and Research of Double-Mirror Composition of Optical Systems..... 60
- Andreev L. N., Komarova Yu. A.** Aberrational Properties of Reflecting Surface of the Second Order 66

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

Skvortsov A. M., Pham Quang Tung. Structure of Silicon Nanocluster within the System Silicon — Silicon Oxide.....	69
Belyaev S. N. Technological Features of Choice Materials and Sputtering Methods for Gyro-Devices Units.....	73
SUMMARY	80

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

С. В. СОКОЛОВ, П. А. КУЧЕРЕНКО

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ МИНИМУМА ВЕРОЯТНОСТИ ОШИБКИ ОЦЕНИВАНИЯ

Рассматривается проблема нелинейной параметрической идентификации стохастических объектов. Предлагается метод решения задачи идентификации параметра дискретного наблюдателя с использованием критерия минимума вероятности ошибки оценивания. Для иллюстрации эффективности предлагаемого подхода рассматривается численный пример.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, ошибка оценивания, минимум критерия, фильтр Калмана.

Введение. Расширение области практического использования методов и алгоритмов стохастической параметрической идентификации обуславливает устойчивый рост интереса к развитию теории идентификации и разработке новых подходов к решению существующих в данной сфере проблем. Как показывает анализ публикаций, большинство работ посвящено вопросам, связанным с идентификацией параметров модели наблюдаемого стохастического объекта, в то время как вопросы, касающиеся определения параметров измерителя (наблюдателя) вектора состояния объекта, остаются практически не освещенными [1—9]. При этом задачи подобного рода часто возникают в различных областях телекоммуникации и связи, радионавигации, метрологии и др. К числу наиболее распространенных можно отнести задачи определения характеристик тракта передачи (времени распространения сигналов, параметров самой среды передачи и др.), а также определения коэффициентов усиления аппаратуры приемника.

В настоящей статье предлагается метод решения задачи параметрической идентификации, позволяющий, во-первых, освободиться от присущих известным методам ограничений (таких, как линейность модели измерителя относительно параметров, необходимость нормального вида распределения аддитивных шумов объекта и помех наблюдаемых сигналов и пр.), а во-вторых, повысить потенциальную точность процедуры идентификации за счет использования обобщенного вероятностного критерия, зависящего в общем случае нелинейно от апостериорной плотности распределения вероятности вектора состояния.

Следует отметить при этом, что вопросы идентификации по критериям, основанным на минимизации среднеквадратического отклонения ошибки оценивания, рассматривались ранее в работах [3—6]. Однако эти критерии в силу неравенства Чебышева являются (как это будет видно из последующих рассуждений) лишь частными случаями обобщенного нелинейного критерия, составляющего основу предлагаемого в настоящей статье подхода.

Для упрощения изложения остановимся подробнее на скалярных уравнениях, определяющих нелинейную модель наблюдаемого объекта и структуру его измерителя.

Постановка задачи параметрической идентификации. Пусть дискретный объект задан нелинейным разностным уравнением

$$x_k = f(x_{k-1}) + n, \quad x_1 = x(1), \quad (1)$$

где n — возмущающее воздействие (шум) с известной функцией плотности распределения вероятности $q(n)$; x_k — переменная состояния объекта в k -й момент времени; f — известная нелинейная функция, x_1 — значение переменной состояния объекта в начальный момент времени.

Наблюдение за переменными состояниями в дискретном времени осуществляется измерителем, описываемым также нелинейным (как относительно параметра наблюдателя, так и относительно переменной состояния объекта) уравнением следующего вида:

$$z_k = \chi(c, x_k) + w, \quad (2)$$

где z_k — дискретный отсчет сигнала измерителя; c — искомый параметр измерителя; w — шум измерителя с известной функцией плотности распределения вероятности $g(w)$; χ — известная нелинейная функция наблюдения.

При этом отметим, что идентифицируемость параметров измерителя обеспечивается [10] единственностью апостериорной плотности распределения вероятности (АПРВ) вектора состояния наблюдаемого объекта, содержащей максимально полную информацию о совокупности переменных его состояния и параметрах измерителя.

Для упрощения совокупности дискретных отсчетов сигнала измерителя $z_i, i=1 \dots k$, обозначим через z_1^k .

В рассматриваемом общем нелинейном стохастическом случае задача идентификации неизвестного параметра c может быть сформулирована как задача нахождения его значения, доставляющего оптимум некоторому обобщенному вероятностному критерию J , зависящему от АПРВ вектора состояния. В качестве условия оптимизации (минимизации) критерия J используем далее условие минимума апостериорной плотности распределения вероятности текущей ошибки оценивания σ переменных состояния объекта на выбранном интервале ее предельно допустимого изменения — от σ_{\min} до σ_{\max} , т.е.

$$\min_c J = \min_c \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \rho(\sigma_k | z_1^k) d\sigma_k,$$

где $\sigma_k = x_k - \hat{x}_k$ — текущая ошибка оценивания, \hat{x}_k — текущая оценка переменной состояния объекта; $\rho(\sigma_k | z_1^k)$ — АПРВ ошибки оценивания.

Учитывая линейную зависимость значений ошибки σ_k и переменной состояния x_k , выразим АПРВ ошибки оценивания $\rho(\sigma_k | z_1^k)$ через АПРВ переменной состояния $p(x_k | z_1^k)$ (выражение для которой будет получено ниже):

$$\rho(\sigma_k | z_1^k) = p(\sigma_k + \hat{x}_k | z_1^k).$$

В этом случае минимизация критерия может быть представлена следующим образом:

$$\min_c J = \min_c \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \rho(\sigma_k | z_1^k) d\sigma_k = \min_c \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} p(\sigma_k + \hat{x}_k | z_1^k) d\sigma_k. \quad (3)$$

В результате поставленная задача сводится к нахождению АПРВ $p(\sigma_k + \hat{x}_k | z_1^k)$ и последующему определению значения искомого параметра из условия минимума критериального выражения в формуле (3).

Синтез алгоритма нелинейной параметрической идентификации. Для определения АПРВ $p(\sigma_k + \hat{x}_k | z_1^k)$ предварительно используем выражение для АПРВ $p(x_k | z_1^k)$ с последующей соответствующей заменой переменных.

Известно [11], что АПРВ информационного параметра x для k -го момента времени определяется выражением

$$p(x_k | z_1^k) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) p(x_k | x_{k-1}) dx_{k-1} p(z_k | x_k)}{h}, \quad (4)$$

где

$$h = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) p(x_k | x_{k-1}) dx_{k-1} p(z_k | x_k) dx_k.$$

Условная плотность вероятности $p(x_k | x_{k-1})$ в формуле (4) может быть определена из уравнения (1) при известном виде плотности распределения вероятности значений шума n (в предположении их взаимной статистической независимости):

$$p(x_k | x_{k-1}) = q(x_k - f(x_{k-1})).$$

Аналогичным образом из уравнения (2) можно определить и входящую в формулу (4) функцию правдоподобия:

$$p(z_k | x_k) = g(z_k - \chi(c, x_k)).$$

Так как АПРВ $p(x_{k-1} | z_1^{k-1})$ в равенстве (4) является известной функцией, рекуррентный алгоритм определения АПРВ переменной состояния для k -го момента времени при наличии дискретных отсчетов сигнала z_1^k принимает следующий вид:

$$p(x_k | z_1^k) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) q(x_k - f(x_{k-1})) dx_{k-1} g(z_k - \chi(c, x_k))}{h^*(c)}, \quad (5)$$

где

$$h^*(c) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) q(x_k - f(x_{k-1})) dx_{k-1} g(z_k - \chi(c, x_k)) dx_k.$$

Произведя соответствующую замену переменных в уравнении (5) и обозначив критериальное выражение через $\Omega(c)$, задачу поиска минимума критерия (3) можно представить в следующем виде:

$$\min_c J = \min_c \Omega(c), \quad (6)$$

где

$$\Omega(c) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} p(\sigma_k + \hat{x}_k | z_1^k) d\sigma_k =$$

$$= \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) q((\sigma_k + \hat{x}_k) - f(x_{k-1})) dx_{k-1} g(z_k - \chi(c, \sigma_k + \hat{x}_k))}{h^*(c)} \right) d\sigma_k.$$

Здесь важно отметить, что в общем случае решения поставленной задачи оценка переменной состояния \hat{x}_k , входящая в формулу (6), представляет собой некоторый функционал (оператор) L от апостериорной плотности распределения вероятности переменной состояния, т.е. $\hat{x}_k = L(p(x_k | z_1^k))$, и, следовательно, в силу выражения (1) является нелинейной функцией от искомого параметра c : $\hat{x}_k = U(c)$.

Тогда критериальное выражение в уравнении (6) окончательно можно представить в следующем обобщенном виде:

$$\Omega(c) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) q((\sigma_k + U(c)) - f(x_{k-1})) dx_{k-1} g(z_k - \chi(c, \sigma_k + U(c)))}{h^*(c)} \right) d\sigma_k. \quad (7)$$

Идентификация параметра, удовлетворяющего условию минимума критерия (6), предполагает минимизацию полученного критериального выражения (7). Для этой цели в зависимости от конкретного вида получаемой функции $\Omega(c)$ можно использовать известные и широко применяемые методы оптимизации: градиентный, метод Ньютона, метод сопряженных направлений, различные прямые методы и др. Выбор метода определяется особенностями наблюдаемого объекта и его измерителя.

Многомерный метод нелинейной параметрической идентификации. Минимизацию критерия (6) можно легко обобщить для многомерного случая, когда уравнения объекта и наблюдателя описываются следующими векторными уравнениями:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{n}; \quad \mathbf{z}_k = \chi(\mathbf{C}, \mathbf{x}_k) + \mathbf{w},$$

где \mathbf{x}_k и \mathbf{x}_{k-1} — n -мерные векторы переменных состояния в k -й и $(k-1)$ -й моменты времени (шаги) соответственно; \mathbf{z}_k — m -мерный вектор сигналов измерителя; \mathbf{n} — n -мерный вектор шума с известной n -мерной функцией плотности распределения вероятности $q(\mathbf{n})$; \mathbf{C} — вектор (или матрица) параметров наблюдателя; \mathbf{w} — m -мерный вектор шума с известной m -мерной функцией плотности распределения вероятности $g(\mathbf{w})$.

Поскольку методика синтеза алгоритмов, соответствующих многомерному случаю, является полностью аналогичной изложенной выше для скалярного случая, приведем окончательную форму критериального выражения для рассматриваемого векторного случая:

$$\Omega(\mathbf{C}) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \dots \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} p(\sigma_k + \hat{\mathbf{x}}_k | \mathbf{z}_1^k) d\sigma_k =$$

$$= \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \dots \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{z}_1^{k-1}) q((\boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k) - f(\mathbf{x}_{k-1})) d\mathbf{x}_{k-1} g(\mathbf{z}_k - \chi(\mathbf{C}, \boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k))}{h^*(\mathbf{C})} \right) d\boldsymbol{\sigma}_k;$$

$$h^*(\mathbf{C}) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{z}_1^{k-1}) q((\boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k) - f(\mathbf{x}_{k-1})) d\mathbf{x}_{k-1} g(\mathbf{z}_k - \chi(\mathbf{C}, \boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k)) \right) d\mathbf{x}_k,$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ — вектор оценок переменных состояния; \mathbf{z}_1^k — совокупность векторов сигналов $\mathbf{z}_i, i=1\dots k$; $\boldsymbol{\sigma}_k$ — вектор ошибки оценивания.

Эффективность использования предложенного подхода проиллюстрируем на следующем примере.

Пример. Рассмотрим стохастический дискретный объект, заданный нелинейным разностным уравнением

$$x_k = 3x_{k-1} - (x_{k-1})^2 + n, \quad x_1 = 1, \quad (8)$$

где n — белый гауссов шум с дисперсией $D_n = 0,02$ и нулевым средним.

Наблюдение за переменными состояния объекта осуществляется измерителем, описываемым следующим нелинейным уравнением:

$$z_k = c(2x_k - 0,5(x_k)^2) + w, \quad (9)$$

где c — искомый параметр наблюдателя (для рассматриваемого примера выберем исходное значение этого параметра $c = 1,5$); w — белый гауссов шум с нулевым средним и дисперсией $D_w = 0,25$.

Определение оценок произведем с использованием рекуррентного алгоритма калмановской фильтрации. Линеаризованные уравнения (8) и (9) принимают при этом следующий вид:

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k + n, \quad x_1 = 1; \quad z_k = c(E_k x_k + P_k) + w,$$

где $A_k = 3 - 2\hat{x}_{k-1}$, $B_k = (\hat{x}_{k-1})^2$, $E_k = 2 - \hat{x}_{k-1}$, $P_k = 0,5(\hat{x}_{k-1})^2$ — коэффициенты, полученные в результате линеаризации функций $f(x_{k-1})$ и $\chi(c, x_k)$ в окрестностях оценок переменной состояния объекта для $(k-1)$ -го шага.

Для определения текущего значения оценки переменной состояния объекта использовался оптимальный фильтр Калмана [11], который в рассматриваемом случае определяется как

$$\hat{x}_k = U(c) = A_k \hat{x}_{k-1} + B_k + K_k (z_k - c(E_k (A_k \hat{x}_{k-1} + B_k) + P_k)), \quad \hat{x}_1 = 0,5;$$

$$K_k = c \frac{R_k}{D_w}, \quad R_k = \left(\frac{1}{R_{k-1} + D_n} + \frac{c^2}{D_w} \right)^{-1}, \quad R_1 = 0,5.$$

Критериальное выражение $\Omega(c)$ на k -м шаге алгоритма для данного примера примет вид

$$\Omega(c) = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} p(\boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k | \mathbf{z}_1^k) d\boldsymbol{\sigma}_k = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \left(\frac{1}{D_n D_w 2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(x_{k-1} | z_1^{k-1}) e^{-\frac{\tau^2}{2D_n}} dx_{k-1} e^{-\frac{\upsilon^2}{2D_w}}}{h^*(c)} \right) d\boldsymbol{\sigma}_k, \quad (10)$$

$$\tau = \boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k - 3x_{k-1} + (x_{k-1})^2, \quad \upsilon = z_k - c(2(\boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k) - 0,5(\boldsymbol{\sigma}_k + \hat{\mathbf{x}}_k)^2).$$

АПРВ для первой итерации алгоритма выберем нормальной с дисперсией $D_0 = 0,5$ и нулевым математическим ожиданием. При этом отклонение среднего значения апостериорной плотности от начального значения переменной состояния не оказывает в дальнейшем существенного влияния на качество процедуры идентификации.

На рис. 1 представлен полученный в результате моделирования график входящей в формулу (10) АПРВ текущей ошибки оценивания для k -го шага алгоритма ($k=50$), которая, являясь функцией текущей ошибки σ_k , зависит также и от значений искомого параметра c :

$$(p(\sigma_k + \hat{x}_k | z_1^k) = p(\sigma_k + U(c) | z_1^k) = V(c, \sigma_k)).$$

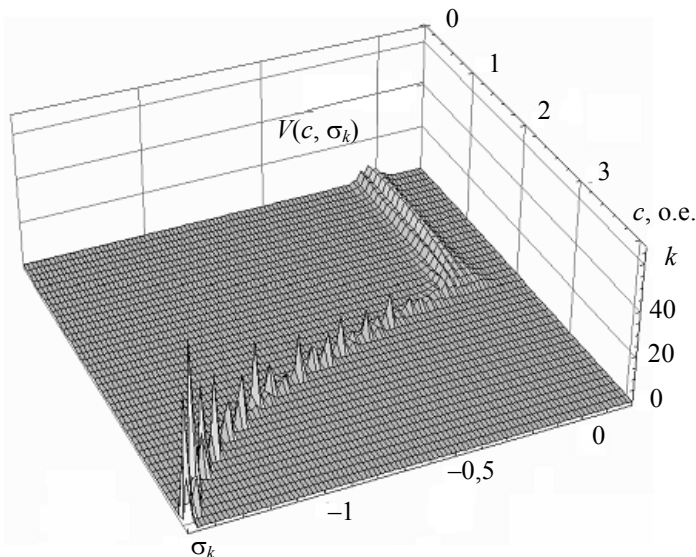


Рис. 1

Определение интегралов в выражении (10) производилось численно с использованием квадратурных формул с шагом $\Delta = 0,03$. Бесконечные пределы интегрирования по переменной состояния x были заменены на конечные значения, удовлетворяющие точностным требованиям к алгоритму оценки ($x_{\min} = 0$, $x_{\max} = 4$).

На рис. 2 приведен график зависимости функции критериального выражения $\Omega(c)$ от искомого параметра при $k=50$. Границы интервала интегрирования по текущей ошибке оценивания также выбирались исходя из требований, обеспечивающих необходимую точность алгоритма оценки ($\sigma_{\min} = -1,5$, $\sigma_{\max} = 0,2$).

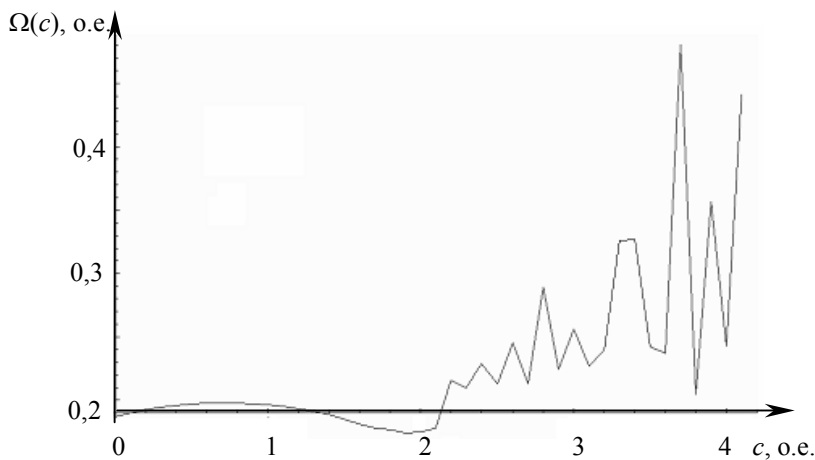


Рис. 2.

Как показали результаты моделирования, вид приведенной на рис. 2 зависимости является характерным для критериальных выражений, получаемых на различных итерациях алгоритма (7).

Здесь важно отметить, что, являясь многоэкстремальными, критериальные выражения на различных шагах алгоритма (см. рис. 2) принимают наименьшие значения при $c = 2$.

Для минимизации функции критериального выражения на очередном шаге алгоритма, т.е. для однозначного определения численного значения текущей оценки искомого параметра, целесообразно, задав некоторый интервал возможных значений параметра c (в рассмотренном примере $0 \leq c \leq 5$), применить один из методов прямой минимизации. В данном случае использовался модифицированный симплексный метод прямой минимизации Нелдера — Мида — метод Бокса, обладающий достаточной вычислительной эффективностью и удобной программной реализацией [12].

Результаты компьютерного моделирования процедуры нелинейной параметрической идентификации показали, что если количество дискретных значений сигнала измерителя больше 250, то отклонение оценки параметра наблюдателя от его истинного значения $c = 2$ не превышает 9,7 %.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают принципиальную возможность эффективной реализации метода нелинейной параметрической идентификации с использованием критерия минимума АПРВ текущей ошибки оценивания. При этом важно отметить, что упомянутые выше методы параметрической идентификации [3—6] в изложенной постановке рассмотренную задачу решить не позволяют.

Заключение. Полученное выражение (7) определяет самый общий вид алгоритма нелинейной параметрической идентификации, обладающего рядом принципиально новых свойств. К их числу следует отнести:

— более высокий по сравнению с традиционными методами уровень потенциальной точности процесса идентификации благодаря использованию обобщенных вероятностных критериев, зависящих в общем случае нелинейно от апостериорной плотности распределения вероятности вектора состояния объекта;

— инвариантность к виду плотности распределения вероятности шума как объекта, так и измерителя;

— возможность применения метода для нелинейных объектов и наблюдателей, в том числе, при нелинейной зависимости функции наблюдения от искомого параметра.

Таким образом, предложенный метод нелинейной параметрической идентификации на основе обобщенных вероятностных критериев может быть весьма эффективно использован в различных областях связи, управления, метрологии и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грон Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
3. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975.
4. Сейдж Э., Мелса Дж. Идентификация систем управления. М.: Мир, 1974.
5. Пугачев В. С., Казаков И. Е., Евланов Л. Г. Основы статистической теории автоматических систем. М.: Машиностроение, 1974.
6. Пащенко Ф. Ф. Введение в состоятельные методы моделирования систем. Идентификация нелинейных систем. М.: Финансы и статистика, 2007.
7. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Гольденблат И. И., Ульянов С. В. Теория моделей в процессах управления. М.: Наука, 1978.
8. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
9. Штейнберг Ш. Е. Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1987.
10. Пугачев В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. М.: Наука, 1985.

11. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991.
12. Банди Б. Методы оптимизации: Вводный курс. М.: Радио и связь, 1988.

Сведения об авторах

- Сергей Викторович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на ж.-д. транспорте, Ростов-на-Дону
- Павел Александрович Кучеренко** — аспирант; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на ж.-д. транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: pavelpost83@mail.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики и телемеханики
на ж.-д. транспорте

Поступила в редакцию
21.05.08 г.

УДК 004.627

Ю. В. ЛУЖКОВ

МЕТОД АДАПТИВНОГО СКАЛЯРНОГО КВАНТОВАНИЯ В СХЕМАХ НЕОБРАТИМОГО СЖАТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассматривается проблема адаптивной генерации матриц квантования. Для схем сжатия изображений с потерей качества, использующих спектральные преобразования, предложен способ адаптивного скалярного квантования спектральных коэффициентов на основе весового критерия и рассмотрены способы определения этого критерия.

Ключевые слова: сжатие изображений, адаптивное квантование, весовой критерий, JPEG.

Введение. В настоящее время одним из распространенных форматов сжатия изображений с потерей качества является JPEG (Joint Photographic Experts Group) [1]. Разработаны и другие схемы сжатия (см., например, работы [2, 3]), эффективность которых существенно превосходит алгоритмы на основе дискретных спектральных преобразований. Однако вследствие широкой распространенности последних перед исследователями встает следующий вопрос: возможно ли модифицировать существующую схему компрессии таким образом, чтобы повысить степень сжатия, не меняя при этом алгоритм декомпрессии? Решение этой задачи позволит вносить изменения в существующие программы-компрессоры, не заботясь о наличии у пользователей специального (модифицированного) программного обеспечения для декомпрессии изображений.

В применяемых алгоритмах сжатия используются некоторые параметры по умолчанию. Например, в формате JPEG к таким параметрам относятся матрицы квантования и таблицы Хаффмана: они сохраняются в заголовке сжатого файла, и формат допускает самостоятельное определение пользователем их значений, что является одним из путей повышения степени компрессии. Так, известны несколько подходов к составлению матриц квантования в формате JPEG (например, [4, 5]), которые, однако, не являются универсальными и требуют сравнительно большого объема вычислений.

В настоящей статье рассматривается обобщенный подход к адаптивному скалярному квантованию коэффициентов спектра, предлагаемый способ прост в реализации и может быть применен, в частности, для формата JPEG.

Адаптивное квантование сигнала. Квантование — способ обработки сигнала, сопряженный с внесением в него искажения. Суть квантования сводится к разбиению диапазона значений сигнала z на конечное число интервалов с последующим выбором одного значения для представления любой величины из данного интервала. При *векторном квантовании* — это разбиение пространства возможных значений векторной величины на конечное число областей. Наиболее полный аналитический обзор вопросов квантования приведен в работе [6].

Так, пусть заданы множество интервалов $S = \{S_i; i \in \mathbb{Z}\}$ и множество точек $C = \{y_i; i \in \mathbb{Z}\}$, тогда функция квантования сигнала z определяется как $q(z) = y_i$ для $z \in S_i$. При *равномерном скалярном квантовании* множество интервалов можно представить в виде

$$S_i = [d + \Delta i, d + \Delta(i+1)), \quad i \in \mathbb{Z},$$

где Δ — параметр, или шаг, квантования; величина d задает смещение интервалов S_i относительно нуля, $d \in [-\Delta/2, \Delta/2)$; i — номер интервала, который и является кодируемым объектом.

Тогда операция квантования может быть сведена к простому делению с округлением:

$$q(x) = i = \left[(z - d) / \Delta \right], \quad (1)$$

где $[\cdot]$ — операция округления до ближайшего целого.

При восстановлении сигнала z привносится ошибка $e: z = q(z) - e$.

Методы *адаптивного квантования* могут быть разделены на две группы: адаптивное скалярное квантование; векторное и кодовое квантование.

Адаптивность в скалярном квантовании достигается путем индивидуального выбора параметра квантования Δ для каждого квантуемого значения.

Адаптивное скалярное квантование на основе весового критерия. Предлагаемый в настоящей статье подход основан на *статистическом анализе коэффициентов спектра*. Этот подход может быть использован в схемах сжатия (например, JPEG) при условии, что окно сканирования сигнала имеет постоянный размер.

Так, пусть дана последовательность коэффициентов спектра, разбитая на M одинаковых блоков по N значений в каждом, при этом $n = \overline{0, N-1}$ — номер (позиция) коэффициента в данном блоке, т.е. каждый коэффициент имеет аналог в любом другом блоке. Суть предлагаемого подхода заключается в следующем: для каждого n -го номера вычисляется значение специального весового критерия, и значение параметра квантования данного коэффициента спектра тем больше, чем меньше соответствующее ему значение весового критерия.

Таким образом, идея метода основана на том, что процедура квантования выполняется с учетом некоторой статистической информации о сигнале, заданном как $\mathbf{z} = \{z_{0,0}, \dots, z_{N-1, M-1}\}$, полученной от M блоков для каждого порядкового номера n . Функция квантования (1) в этом случае будет обозначаться как $q(\mathbf{z}, n)$, а функция параметра квантования — как $\Delta(\mathbf{z}, n)$.

Введем критерий T , назвав его *весом спектрального коэффициента*. Величина T отражает степень значимости спектральных коэффициентов $z_{n,m}$, имеющих одинаковый порядковый номер n , для всех M блоков, $m = \overline{0, M-1}$. Рассмотрим некоторые способы определения критерия T . Первый из возможных способов основан на статистике максимальных значений:

$$T_n = \sum_{m=0}^{M-1} c_n, \quad c_n = \begin{cases} 1, & |z_{n,m}| = z_{m,\max}; \\ 0, & |z_{n,m}| \neq z_{m,\max}, \end{cases}$$

где $z_{m,\max}$ — максимальный по модулю спектральный коэффициент в данном блоке.

Такой способ вычисления критерия пригоден в том случае, если нет выраженной концентрации энергии сигнала на определенных спектральных позициях. Однако, как показали, например, эксперименты с дискретным косинусным преобразованием (ДКП), в 99 % случаев коэффициент с номером 0 определяется как максимальный, причем для более чем 90 % номеров n значение критерия T равно 0, что препятствует практическому использованию данного критерия в схемах сжатия на основе ДКП.

Другой способ вычисления T является развитием предыдущего и основан на *пороговом ограничении спектральных коэффициентов*:

$$T_n = \sum_{m=0}^{M-1} c_n, \quad c_n = \begin{cases} 1, & |z_{n,m}| \geq P; \\ 0, & |z_{n,m}| < P, \end{cases} \quad 0 < P \leq z_{m,\max},$$

где P — порог ограничения.

Использование порогового ограничения позволяет решить проблему непропорционального распределения энергии сигнала, присущую первому способу. Однако основной недостаток порогового вычисления T — необходимость определения значения P .

Следующий алгоритм вычисления T оперирует средними амплитудами спектра, не используя при этом порог P :

$$T_n = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} |z_{n,m}|. \quad (2)$$

Достоинством данного способа является отсутствие обязательной дополнительной обработки сигнала (для определения порога P). К недостаткам можно отнести операции с числами с плавающей запятой (при использовании предыдущих способов выполняется просто увеличение счетчиков на единицу).

На рис. 1, *а*, *б* представлена зависимость $T(n)$, вычисленная по формуле (2) для коэффициентов ДКП при $M = 8 \times 8 = 64$: *а* — результаты вычислений для матрицы яркости Y изображений "Lena" и "Oldman", *б* — для хроматических матриц изображения "Oldman". На графиках значения T упорядочены так, чтобы значения критерия не возрастали. Как видно, динамика изменения величины T достаточно резкая, что в некоторых случаях может привести к чрезмерному квантованию малозначимых спектральных коэффициентов.

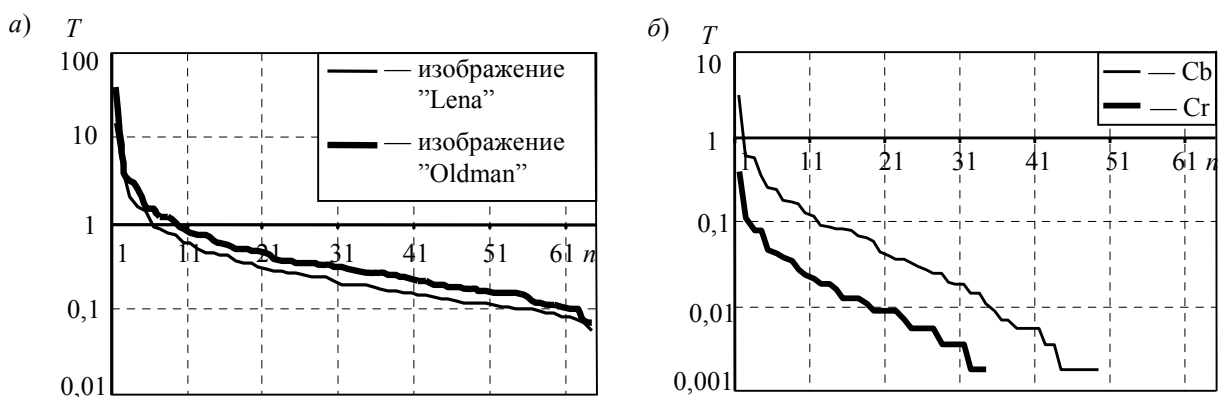


Рис. 1

Скорректировать ситуацию можно, выбирая в качестве значения критерия максимальные амплитуды коэффициентов:

$$T_n = \max |z_{n,m}|. \quad (3)$$

Обратимся далее к определению функции $\Delta(\mathbf{z}, n)$. Пусть ее значения ограничены диапазоном $[a_1, a_2]$, $0 \leq a_1 < a_2$. Введем линейную функцию от T :

$$E(T) = a_1 + \frac{T_{\max} - T_n}{T_{\max} - T_{\min}}(a_2 - a_1).$$

Также может использоваться нелинейная функция от T , что достигается введением корректирующей функции \hat{f} :

$$E(T) = a_1 + \frac{\hat{f}(T_{\max}) - \hat{f}(T_n)}{\hat{f}(T_{\max}) - \hat{f}(T_{\min})}(a_2 - a_1). \quad (4)$$

Поскольку любое значение критерия T_n в общем случае зависит от всех коэффициентов исходного спектрального вектора \mathbf{z} , то функция E также зависит от \mathbf{z} . Фактически это есть функция параметра квантования сигнала $\Delta(\mathbf{z}, n)$. Введем обозначение $f(\mathbf{z}, n) = \hat{f}(T_n)$. Тогда формула (4) окончательно принимает следующий вид:

$$\Delta(\mathbf{z}, n) = \Delta(T) = a_1 + \frac{f(\mathbf{z}, n_{\max}) - f(\mathbf{z}, n)}{f(\mathbf{z}, n_{\max}) - f(\mathbf{z}, n_{\min})}(a_2 - a_1). \quad (5)$$

Таким образом, функция параметра квантования локализована в диапазоне от a_1 до a_2 . Варьируя ее форму, можно осуществлять квантование коэффициентов спектра с данным порядковым номером с большим или меньшим шагом: см. рис. 2, а (значения T упорядочены по возрастанию). На рисунке кривая 1 соответствует линейному преобразованию, кривая 2 — преобразованию с использованием функции \hat{f} . Так, пусть известно, что высокочастотным коэффициентам спектра соответствуют малые значения T . Тогда для подавления высоких частот достаточно задать функцию \hat{f} с таким расчетом, чтобы ее энергия на начальном участке была большой.

Примеры корректирующих функций \hat{f} приведены на рис. 2, б.

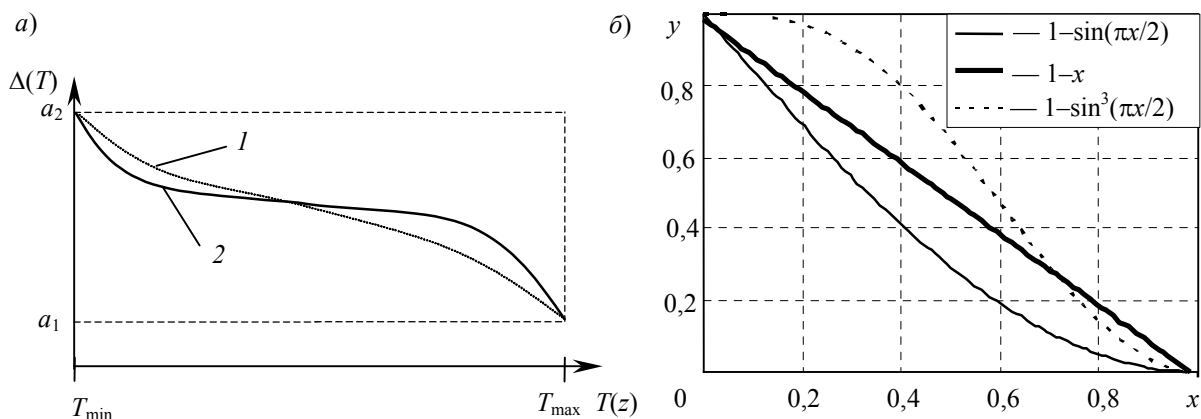


Рис. 2

Квантование с различным шагом реализовано, например, в формате JPEG. Однако значения параметра Δ не вычисляются адаптивно, а представлены значениями по умолчанию. Рассмотрим возможность применения предложенного подхода для адаптивной генерации матриц квантования в схеме JPEG. В формуле (5) будем использовать линейную корректирующую функцию и критерий максимальных амплитуд (3).

На рис. 3, *а* приведены графики стандартных функций параметра квантования в формате JPEG, а на рис. 3, *б* — графики значений Δ , сгенерированных адаптивным способом для изображения "Oldman". В обоих случаях значения упорядочены в соответствии с „зигзаг“-сканированием. Как видно, отличие сгенерированных значений от стандартных достаточно велико.

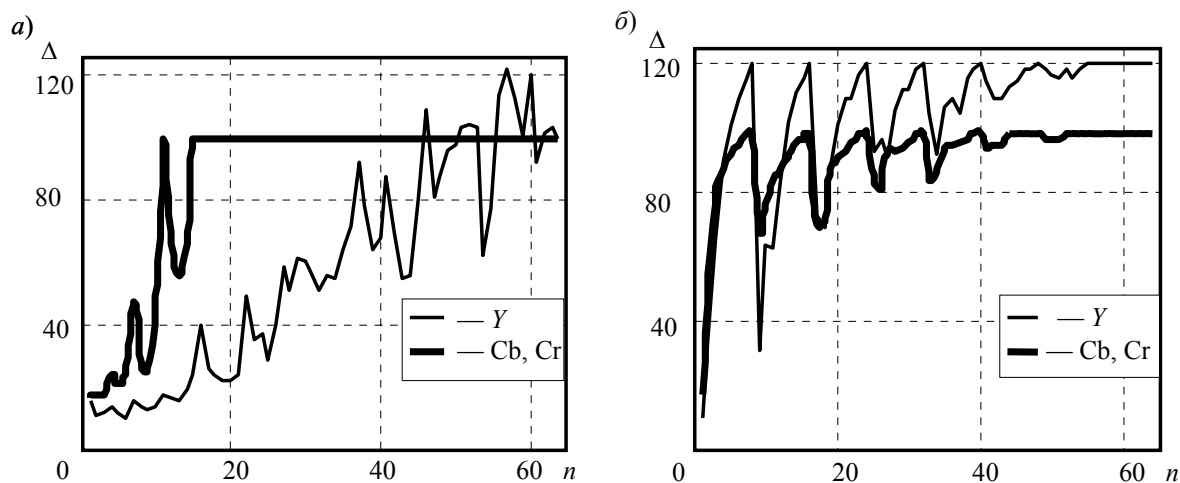


Рис. 3

График зависимости $T(n)$ для изображения "Oldman" представлен на рис. 4, *а*. На рис. 4, *б* показаны результаты сжатия этого изображения с применением функций квантования, данных по умолчанию (кривая 1), и функций, сгенерированных в рамках эксперимента (кривая 2). По оси абсцисс — среднее число бит на пиксел (b), по оси ординат — пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR). Анализ результатов показывает, что разница в степени сжатия составляет до 20 % в пользу адаптивного подхода при одинаковых значениях PSNR.

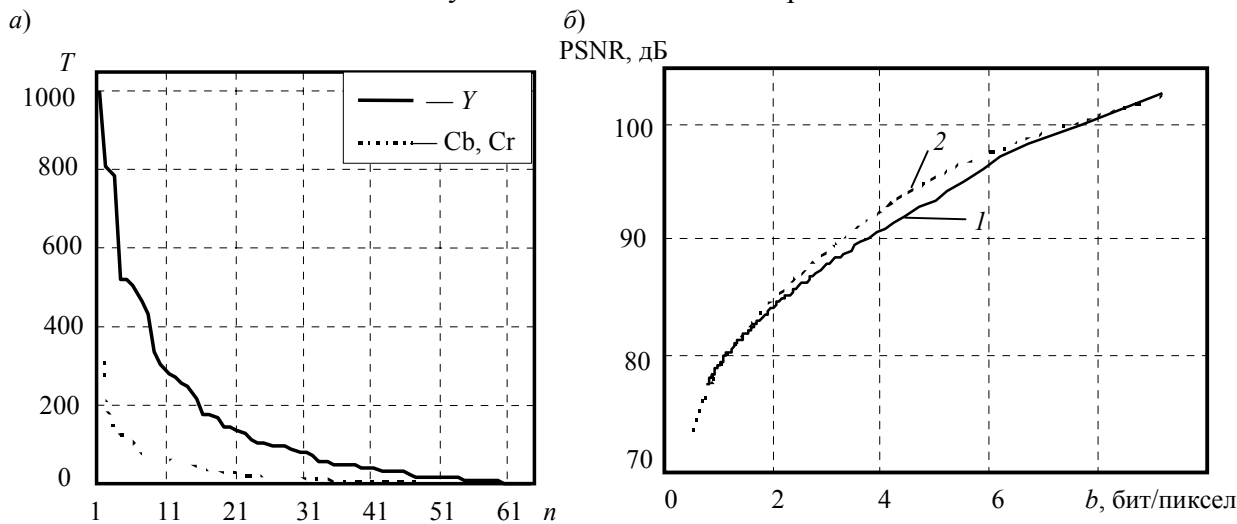


Рис. 4

Заключение. Предложенный способ адаптивного скалярного квантования коэффициентов спектра основан на вычислении критерия значимости коэффициентов спектра. Как показали эксперименты, применение рассмотренного подхода в схеме JPEG позволяет получить выигрыш по степени сжатия до 20 % по сравнению с использованием стандартных матриц квантования.

При практическом использовании рассмотренного метода квантования необходима модернизация только компрессора, а для просмотра изображений достаточно применения стандартного JPEG-декомпрессора, что является важным достоинством предложенного решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wallace G. K. The JPEG still picture compression standard // IEEE Trans. Consumer Electronics. 1992. Vol. 38, N 1. P. 18—34.
2. Shukla R. Rate-distortion optimized tree-structured compression algorithms for piecewise polynomial images // IEEE Transact. on Image Processing. 2005. Vol. 14, N 3. P. 343—359.
3. Dalai M., Leonardi R. L-inf norm based second generation image coding // Proc. of Intern. Conf. on Image Processing. 2004. P. 3193—3196.
4. Ratnakar V., Livny M. Extending RD-OPT with global thresholding for JPEG optimization // Proc. of the Conf. on Data Compression. 1996. P. 379—386.
5. Fung H. T., Parker K. J. Design of image-adaptive quantization tables for JPEG // J. of Electronic Imaging. 1996. Vol. 4, N 2. P. 144—150.
6. Gray R. M., Neuhoff D. L. Quantization // IEEE Transact. on Information Theory. 1998. Vol. 44, N 6. P. 2325—2383.

*Сведения об авторе***Юрий Валерьевич Лузков**

— аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: luzhkov@inbox.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
24.11.08 г.

УДК 004.522

К. К. ГЛАДЫШЕВ, Е. А. ШУЛЬГИН

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧЕВЫХ КОМАНД

Приводится описание системы автоматического распознавания речевых команд, состоящей из нескольких уровней: оцифровки сигнала; выделения первичных признаков речевых сигналов на основе линейных спектральных корней; поиска распознаваемой команды по базе эталонов с использованием методов динамического программирования; семантической коррекции распознанной последовательности символов по орфоэпическому словарю. Разработанная система может быть использована в сфере речевых технологий.

Ключевые слова: распознавание речи, динамическое программирование, линейное предсказание.

Полноценная замкнутая система распознавания речи (СРР) состоит из множества взаимосвязанных уровней [1—4]. Общая эффективность работы такой системы непосредственно зависит от качества реализации каждого уровня. Подобное построение системы связано с физиологическими процессами, происходящими при восприятии речи человеком. На выходе слухового аппарата человека формируется набор сигналов, которые в дальнейшем обрабатываются мозгом и преобразуются в последовательности осмысленных речевых единиц.

Обобщенно можно выделить следующие уровни человеческой системы восприятия речи [5]:

— физическое восприятие колебаний звука в ухе с помощью специального органа — улитки;

— преобразование звуковых колебаний в определенную последовательность информативных сигналов и передача их через нейроны в головной мозг;

— трансформация в головном мозге сигнала, полученного от нейронов уха, в дискретную последовательность речевых единиц;

— семантический уровень, связанный со словарем и грамматикой языка.

Соответственно в системе автоматического распознавания речи, основанной на бионическом подходе, можно выделить следующие уровни:

— преобразование голосового сигнала в последовательность значений амплитуд — оцифровка сигнала;

— формирование совокупности векторов информативных признаков сигнала;

— поиск по базе наиболее близкого к распознаваемой речевой единице эталона;

— нечеткий поиск полученной последовательности речевых единиц по ограниченному словарю;

— построение осмысленных предложений и их коррекция в соответствии с вероятностной речевой моделью языка.

Запись и оцифровка звукового сигнала выполняется через микрофон, подключенный к звуковой карте персонального компьютера. Как показано в работе [6], диапазон частот речевого сигнала составляет от 300 до 4000 Гц. Соответственно достаточная частота дискретизации составляет 8 кГц. Количество уровней квантования звуковой карты (16 бит) также вполне достаточно для восприятия человеком оцифрованного сигнала.

Первичную обработку сигнала можно выполнить при необходимости с помощью специальных программных средств, например произвести различного вида фильтрации или нормировки. Далее оцифрованный сигнал в виде массива значений амплитуд передается на следующий уровень СРР.

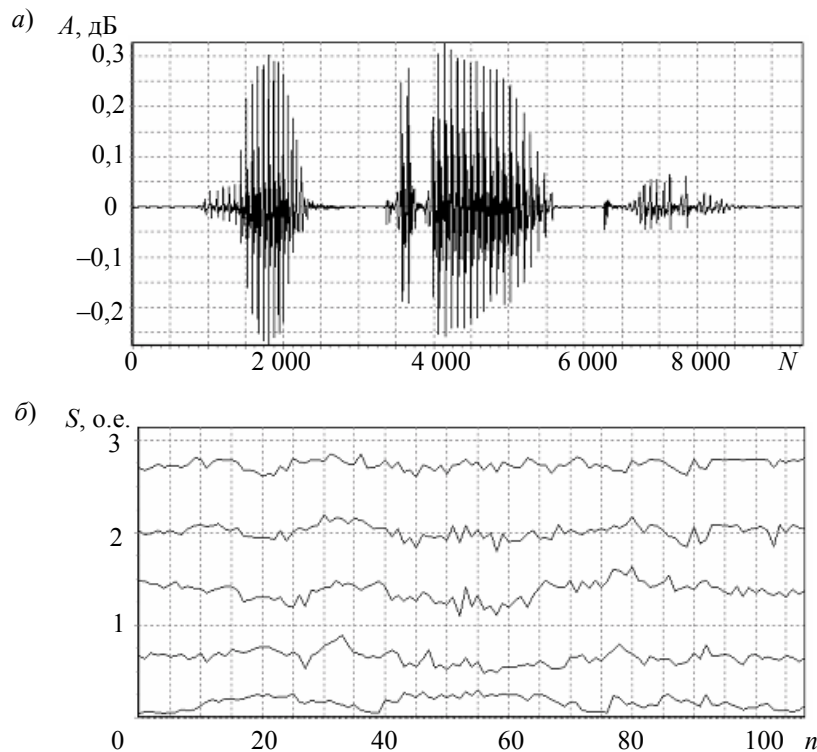
Одним из основных моментов в задачах распознавания речи является выбор метода формирования набора признаков, позволяющих выделить необходимую информацию о речевом сигнале для последующих уровней системы. В современных проектах СРР для выделения информативных признаков используют спектральный, корреляционный и кепстральный анализ, вейвлет-преобразования, линейное предсказание речи.

В системе, разработанной авторами настоящей статьи, для выделения информативных признаков используются линейные спектральные корни (ЛСК). На протяжении многих лет этот аппарат применяется в различных задачах, где необходимо экономно передавать, хранить и достаточно точно воспроизводить информацию о звуковых сигналах [7]. ЛСК позволяют получить информацию о ряде важных параметров речевого сигнала, таких как частота основного тона, ширина полос формантных частот, различные параметры состояния голосового тракта [8]. Кроме того, алгоритмы расчета ЛСК удобны при компьютерной реализации и позволяют производить вычисления в реальном масштабе времени [8].

Согласно новой теории линейных спектральных корней Ланнэ [7] существуют несколько различных вариантов расчета ЛСК. Самым распространенным, хорошо изученным и широко используемым является метод Итакуры, рассматриваемый, например, в работе [9]. Сравнительные исследования нескольких вариантов расчета ЛСК для различных фонем приведены в работе [4]. Так, для рассматриваемого в настоящей статье метода гистограммы ЛСК в пределах одной фонемы не перекрываются, поэтому значения каждого отдельно взятого корня можно эффективно использовать в качестве координаты признакового пространства.

Как показали проведенные исследования, расчет ЛСК целесообразно осуществлять с использованием окна Хэмминга. Для предотвращения потери информации о сигнале окна должны перекрываться. Размер окна выбирается примерно равным периоду основного тона — 10...20 мс — или 80...160 отсчетам при частоте дискретизации 8 кГц.

На рисунке приведен пример осциллограммы слова „настройки“ (а) и набор его ЛСК (б); здесь A — уровень амплитуды сигнала, N — номер отсчета, S — значение ЛСК, n — номер окна.



Рассчитанная совокупность векторов ЛСК передается на следующий уровень СРР для дальнейшего анализа, где происходит сравнение с эталонами.

В качестве словаря эталонов в рассматриваемой системе взят набор аллофонов (фонем в речевом окружении) русского языка. Фонема является минимальной речевой единицей. Согласно различным фонетическим школам в русском языке насчитываются порядка 40 фонем, из которых 6 — гласных фонем. Однако известно [5], что при плавной речи на звучание каждой фонемы оказывает сильное воздействие ее фонетическое окружение. Например, гласная буква „о“ произносится по-разному в словах „вода“ и „водяной“, тем не менее оба этих гласных звука (аллофона) являются разновидностями одной и той же фонемы „о“. Так, в современных системах синтеза речи [10] успешно используются именно наборы аллофонов.

По результатам работы [11], где представлены примеры классификации и способы выделения наборов аллофонов, в русском языке выделяются от 300 (минимальный набор) до 2000 (максимальный набор) аллофонов. Для правдоподобного синтеза речи достаточно минимального набора. Так, в разработанной СРР за основу взят упрощенный набор, состоящий из 50 аллофонов. В дальнейшем для повышения точности распознавания словарь эталонов должен быть расширен.

Процедура записи эталонов состоит в том, что диктором начитывается определенная последовательность слов, из которых выделяются необходимые образцы аллофонов. Границы между аллофонами определяются опытным путем. Для каждого аллофона производится расчет информативных признаков — массива линейных спектральных корней. Эти данные записываются в базу эталонов и используются в дальнейшем для сравнения с фрагментом распознаваемой речи.

Для поступающего на вход речевого сигнала для каждого отсчета векторов признаков последовательно производится сравнение с элементами словаря эталонов и выбирается наилучший эталон на основе минимального евклидова расстояния.

На вход распознающей системы могут подаваться и звуки, для которых в базе заведомо нет эталона (например, фонемы других языков или просто нечленораздельные звуки). Поэтому опытным путем установлена максимальная допустимая мера близости к ближайшему найденному эталону. Если эта мера близости превышена, то текущий фрагмент входного сигнала считается нераспознанным.

В результате подобной процедуры распознаваемый сигнал (слово) может быть представлен строкой фонем следующего вида:

<< __ннаааааа~::~оооооо~::ииииииии __>> ,

где „_“ — отсутствие сигнала, а „~“ — нераспознанный звук.

Из полученной последовательности удаляются повторяющиеся символы. Обработанная строка фонем используется на следующем уровне СРР, где по словарю производится нечеткий поиск ближайшего слова. Словарь представляет собой таблицу всевозможных слов, воспринимаемых системой, и их фонетических форм. Фактически для полноценной СРР в качестве словаря может использоваться любой орфоэпический словарь русского языка.

Для полученной строки фонем последовательно рассчитывается мера близости L к определенной словарной транскрипции, которая вычисляется по алгоритму нечеткого поиска строк Вагнера и Фишера с использованием метрики Левенштейна [12]. Данный алгоритм позволяет эффективно вычислять значения L для слов различной длины при больших объемах данных. Слово, для которого значение L минимально, считается искомым распознанным.

Ниже приведен пример, демонстрирующий результат поиска ближайшего слова в словаре.

Результат распознавания слова: **н а о и**
 Ближайшая транскрипция по словарю: **н а с т р о й к и**

Для устранения грубых ошибок при распознавании введено пороговое максимальное значение L . При превышении данного порога система выдает сообщение об ошибке распознавания и необходимости повторить распознаваемое слово. Пороговое значение определяется экспериментально.

Было проведено тестирование системы в режиме, не зависящем от особенностей речи диктора. Правильно распознано 80 % команд. Объем словаря, позволяющего системе работать в режиме реального времени, составляет 30—40 односложных команд. В настоящее время осуществляется разработка методики по увеличению скорости поиска команд по словарю, что позволит в будущем увеличить его объем при сохранении должного качества распознавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямов С. И., Кабак И. С., Курочкин С. Н., Бродин А. Г. Многоуровневая система распознавания речи // Автоматизация и управление в машиностроении. 1997. № 1.
2. Лукьяница А. А. Разработка программы распознавания русской речи для процессора SuperH RISK (Hitachi) / МГУ им. М. В. Ломоносова [Электронный ресурс]: <http://leader.cs.msu.ru/~luk/ContinuousSpeech_rus.html>.
3. Галунов В. И., Галунов Г. В. Один подход к автоматическому распознаванию речи / Междунар. конф. по компьютерной лингвистике „Диалог — 2000“ [Электронный ресурс]: <<http://www.dialog-21.ru/materials/archive.asp?id=6434&y=2000&vol=6078>>.
4. Кисляков С. В. Разработка и исследование метода распознавания фонем русского языка на основе аппарата линейного предсказания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004.
5. Чистович Л. А., Венцов А. В. Физиология речи. Восприятие речи человеком. Л.: Наука, 1976.
6. Фланаган Д. Анализ, синтез и восприятие речи М.: Связь, 1968.

7. Ланнэ А. А. Новая теория линейных спектральных корней // Тр. 3-й Междунар. конф. „Цифровая обработка сигналов и ее применение“, 29 нояб. — 1 дек. 2000 г., Москва. С.118—125 [Электронный ресурс]: <http://www.dsp.sut.ru/rus/research/publications/download/2000dspra_tom1_30_Lanne.pdf>.
8. Маркел Дж., Грей А. Х. Линейное предсказание речи. М.: Связь, 1980.
9. Ланнэ А. А., Улахович Д. А. Передача информации о состоянии фильтра-предсказателя с помощью спектральных пар // Радиоэлектроника и связь. 1991. № 1.
10. Вольская Н., Коваль А., Коваль С. и др. Синтезатор русской речи по тексту нового поколения // Тр. Междунар. конф. „Диалог — 2005“, 1—6 июня 2005 г., Звенигород [Электронный ресурс]: <http://speechtech.ru/articles/DIALOG_Orator.pdf>.
11. Лобанов Б. М., Пьорковска Б., Рафалко Я. и др. Фонетико-акустическая база данных для многоязычного синтеза речи по тексту на славянских языках // Тр. Междунар. конф. „Диалог — 2006“, 31 мая — 4 июня 2006 г., Бекасово. С. 357—364 [Электронный ресурс]: <<http://www.dialog-21.ru/dialog2006/materials/html/Lobanov.htm>>.
12. Graham A. Stephen. Анализ строк / Пер. с англ.; Под ред. П. Н. Дубнера // Материалы по математической статистике и программные алгоритмы [Электронный ресурс]: <http://infoscope.ws/string_search/Stephen-92/index.html>.

Сведения об авторах

- Константин Константинович Гладышев** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, кафедра цифровой вычислительной техники; E-mail: gladkos@gmail.com
- Евгений Александрович Шульгин** — д-р техн. наук, профессор; Невский институт языка и культуры, Санкт-Петербург, проректор по информационным технологиям; E-mail: eshu1944@mail.wplus.net

Рекомендована кафедрой
цифровой вычислительной техники
СПбГУТ

Поступила в редакцию
11.12.07 г.

УДК 004.8

А. Л. ТУЛУПЬЕВ

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ АЦИКЛИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДОВЕРИЯ В АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ

Приведены основные шаги в схеме алгоритма по преобразованию баз фрагментов знаний с неопределенностью, представленных в формате ациклических байесовских сетей доверия (т.е. со структурой полидерева), в базы фрагментов знаний, представленных в формате алгебраических байесовских сетей. Преобразование осуществляется путем последовательного расчета тензоров совместной вероятности на основе тензоров условной вероятности, хранящихся в узлах байесовской сети доверия. Процесс завершается переходом от тензоров совместной вероятности к оценкам вероятности на идеалах конъюнктов.

Ключевые слова: байесовские сети, вероятностная семантика, модели знаний с неопределенностью, логико-вероятностный вывод.

Одним из видов генерации новых знаний в условиях неопределенности по сведениям, уже накопленным в базах фрагментов знаний (БФЗ) интеллектуальных информационных систем, является логико-вероятностный вывод. Его алгоритмический аппарат особенно хорошо развит для байесовских сетей доверия (БСД) [1], однако такие сети имеют существенные

ограничения, касающиеся как их структуры, так и вида оценок вероятностей, в них использующихся. В стадии разработки находится теория алгебраических байесовских сетей (АБС) [2, 3], позволяющая справиться с частью тех ситуаций, которые невозможно обработать в байесовских сетях доверия [3].

Для того чтобы достижения в теории АБС можно было применить в базах фрагментов знаний, которые построены на основе байесовских сетей доверия, необходимо разработать алгоритмы преобразования БСД в АБС. Цель настоящей статьи — описание схемы такого алгоритма для случая байесовской сети доверия без циклов (структура такой сети имеет вид полидерева [1]). Предварительно введем определения двух названных типов байесовских сетей (в рамках логико-вероятностного подхода [3]), используя терминологию и обозначения, принятые в работе [2]. Основы применяемых теорий и свойства объектов, упоминаемых в настоящей статье, детально представлены в монографии [3].

Байесовская сеть доверия — это ациклический направленный граф с тензорами условных вероятностей вида $p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m)$ в узлах. В узлах, не имеющих родителей, эти тензоры условных вероятностей вырождаются в тензоры совместных (или маргинальных) вероятностей вида $p(\tilde{z})$. Если в БСД со структурой полидерева для некоторого узла z известны вероятности его узлов-родителей $p(\tilde{x}_1), \dots, p(\tilde{x}_m)$, то можно вычислить совместные вероятности вида

$$p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) = p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) p(\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) = p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) \prod_{i=1}^m p(\tilde{x}_i).$$

Последний переход возможен в силу определения байесовской сети и с учетом того, что между узлами x_1, \dots, x_m нет путей, кроме пути, проходящего через z . Отсутствие таких путей объясняется тем, что рассматриваемая БСД обладает структурой полидерева [1]. Также можно вычислить и вероятность вида

$$p(\tilde{z}) = \sum_{\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m} p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) p(\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) = \sum_{\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m} p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m) \prod_{i=1}^m p(\tilde{x}_i).$$

Эта формула позволяет распространить процесс дальше по направленным ребрам полидерева и рассчитывать соответствующие совместные вероятности для каждого узла БСД.

Алгебраическая байесовская сеть — это набор идеалов конъюнктов, которым приписана оценка вероятности [2]. Напомним, что идеал конъюнктов — это множество всех подцепочек некоторой заданной цепочки конъюнкций. Например, для заданной цепочки конъюнкций zx_1x_2 идеал конъюнктов будет содержать пустой конъюнкт и конъюнкты $z, x_1, zx_1, x_2, zx_2, x_1x_2, zx_1x_2, zx_1x_2$. Идеал конъюнктов с оценками вероятности их истинности называется фрагментом знаний.

В первую очередь, заметим, что по вероятностям вида $p(\tilde{z} | \tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m)$ можно рассчитать вероятности всех конъюнктов, образованных над цепочкой $\tilde{z}\tilde{x}_1 \dots \tilde{x}_m$. Таким образом, узел z байесовской сети доверия будет сопоставлен с фрагментом знаний алгебраической байесовской сети, образованным над утверждением z из самого узла и утверждениями x_1, \dots, x_m из узлов-предков. Полученный фрагмент знаний окажется связанным по отдельности с каждым фрагментом знаний, приписанным узлу-родителю. При этом рассматриваемый фрагмент знаний и фрагмент знаний из узла-родителя будут иметь лишь один общий элемент, и он будет из множества x_1, \dots, x_m . Следовательно, по исходной байесовской сети доверия будет получен набор фрагментов знаний, обладающий структурой, которая является ненаправленным деревом, а значит, будет сформирована ациклическая алгебраическая байесовская сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pearl J. Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems. N.Y.: Morgan Kaufmann Publ., 1988. 552 p.
2. Тулупьев А. Л., Сироткин А. В., Николенко С. И. Синтез согласованных оценок истинности утверждений в интеллектуальных информационных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 7. С. 20—26.
3. Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб.: Наука, 2006. 607 с.

*Сведения об авторе**Александр Львович Тулупьев*

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория прикладной информатики; E-mail: alt@iiias.spb.su

Рекомендована кафедрой технологий программирования СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию 15.02.08 г.

УДК 519.8

А. Н. КИРИЛЛОВ

**ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ И РАЗМЕРНОСТЬЮ**

Предлагается подход к математическому моделированию сложных динамических систем с переменной структурой и размерностью. Модель задается системами обыкновенных дифференциальных уравнений, количество и вид которых зависят от поведения специальных переменных. Приведен пример использования предложенного подхода в задаче стабилизации системы твердых тел.

Ключевые слова: динамическая система, математическая модель, изменение структуры, переменная размерность, декомпозиция, управление.

Введение. Решение задачи управления техническими системами и технологическими процессами связано с построением сложных математических моделей, что обусловлено, в частности, многочисленными взаимосвязями различных подсистем. Необходимость учета этих взаимосвязей приводит к созданию динамических систем, аналитическое исследование которых весьма затруднительно. К системам, в которых важную роль играют изменяющиеся во времени взаимосвязи образующих их подсистем, можно отнести крупные производственные комплексы, движущиеся объекты с переменным количеством компонентов, роботы-манипуляторы, динамические модели теории метапопуляций. Эти и многие другие аналогичные системы имеют общие свойства: в процессе функционирования их структура изменяется таким образом, что подсистемы, из которых они состоят, могут на различных интервалах времени находиться в пассивном или активном режиме. В настоящей статье для моделирования таких процессов предлагается использовать динамические системы, размерность и структура которых, в зависимости от состояния, может изменяться с течением времени, т.е. происходит динамическая декомпозиция сложной системы [1]. Отметим, что вопросы моделирования сложных систем со структурными изменениями исследовались в работах [2—7]. Настоящая статья развивает это направление.

Пусть некоторая сложная система S состоит из подсистем S_i , $i = 1, \dots, n$, которые в процессе функционирования могут отключаться от нее или, наоборот, подключаться к ней в зависимости от состояния сложной системы. Тем самым структура и, следовательно, размерность S изменяются. Перейдем к формальному описанию. Предположим, что система S

представляет собой совокупность взаимосвязанных подсистем S_i , $i = 1, \dots, n$, причем не все S_i могут входить в состав S одновременно. Итак, $S = \{S_{k_1}, \dots, S_{k_j}, \dots, S_{k_m}\}$, $k_j \in \{1, \dots, n\}$, $j = 1, \dots, m$, $m \leq n$, при этом полагаем, что $k_i \equiv k_i$, $k_i < k(i+1)$.

Определение. Вектором структуры $\gamma \in R^n$ системы S называется вектор $\gamma^T = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)$, такой что $\gamma_i = 1$, если $S_i \in S$, и $\gamma_i = 0$, если $S_i \notin S$.

Вектор γ будем также называть структурой системы S . Введем вектор $y(t) \in R^n$, $y^T(t) = (y_1(t), \dots, y_n(t))$, такой что $\gamma_i = 1$, если $y_i(t) > \tilde{y}_i$, и $\gamma_i = 0$, если $y_i(t) < \tilde{y}_i$. Здесь \tilde{y}_i — заданные постоянные (пороговые значения). Если в некоторый момент времени \tilde{t} справедливо равенство $y_i(\tilde{t}) = \tilde{y}_i$, то происходит изменение структуры системы S , а именно: если при $t \in (\tilde{t} - \delta, \tilde{t})$ подсистема S_i входит в состав S , $S_i \subset S$, т.е. $y_i(t) > \tilde{y}_i$, то происходит отключение S_i от S . Если при $t \in (\tilde{t} - \delta, \tilde{t})$ подсистема S_i не входит в состав S , $S_i \not\subset S$, т.е. $y_i(t) < \tilde{y}_i$, то происходит подключение S_i к S . Здесь $\delta > 0$ — заданная постоянная.

З а м е ч а н и е. Вектор $y(t)$ можно назвать многомерным временем эволюции системы в отличие от текущего времени t . Именно изменение компонентов $y_i(t)$ приводит к изменению структуры системы S .

Перейдем к описанию динамики системы S . При этом рассмотрим два варианта: разрывное (скачкообразное) и непрерывное изменения структуры.

Разрывное изменение структуры. Отключение S_{k_j} . Пусть в некоторый момент времени t в состав S входят подсистемы S_{k_i} : $S = \{S_{k_1}, \dots, S_{k_m}\}$, т.е. $y_{k_i}(t) > \tilde{y}_{k_i}$. Введем векторы состояний $\mathbf{X}_{k_i} \in R^{(k_i)}$ подсистем S_{k_i} , где (k_i) — размерность вектора \mathbf{X}_{k_i} . Тогда полагаем, что динамика системы S в момент времени t описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{k_i} &= f_{k_1, \dots, k_m}^{k_i}(\mathbf{X}_{k_1}, \dots, \mathbf{X}_{k_i}, \dots, \mathbf{X}_{k_m}), \quad i = 1, \dots, m; \\ \dot{y}_l &= g_{k_1, \dots, k_m}^l(\mathbf{X}_{k_1}, \dots, \mathbf{X}_{k_i}, \dots, \mathbf{X}_{k_m}), \quad l = 1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $f_{k_1, \dots, k_m}^{k_i} : R^{(k_1) + \dots + (k_m)} \rightarrow R^{(k_i)}$; $g_{k_1, \dots, k_m}^l : R^{(k_1) + \dots + (k_m)} \rightarrow R$, причем правые части обеспечивают существование и единственность решения системы (1).

Пусть в некоторый первый момент времени $t = t_{k_j}^-$ переменная $y_{k_j}(t)$ принимает значение \tilde{y}_{k_j} : $y_{k_j}(t_{k_j}^-) = \tilde{y}_{k_j}$. Введем отключающую подсистему S_{k_j} непрерывное отображение $\Phi_{k_j}^- : R^{(k_1) + \dots + (k_m) + n + 1} \rightarrow R^{(k_1) + \dots + (k_m) + n + 1}$:

$$\begin{aligned} \Phi_{k_j}^-(\mathbf{X}_{k_1}(t_{k_j}^-), \dots, \mathbf{X}_{k_j}(t_{k_j}^-), \dots, \mathbf{X}_{k_m}(t_{k_j}^-), y_1(t_{k_j}^-), \dots, \tilde{y}_{k_j}, \dots, y_n(t_{k_j}^-), t_{k_j}^-) = \\ = (\mathbf{X}_{k_1}^{(-k_j)}, \dots, \mathbf{0}^{(k_j)}, \dots, \mathbf{X}_{k_m}^{(-k_j)}, y_1^{(-k_j)}, \dots, \tilde{y}_{k_j} - \delta_{k_j}^-, \dots, y_n^{(-k_j)}, \tilde{t}_{k_j}^-), \end{aligned}$$

где $\mathbf{0}^{(k_j)}$ — нулевой вектор, $\mathbf{0}^{(k_j)} \in R^{(k_j)}$, причем $\mathbf{0}^{(k_j)}$ находится на j -м месте; постоянная $\delta_{k_j}^- > 0$; постоянная $\tilde{y}_{k_j} - \delta_{k_j}^-$ находится на $(m+j)$ -м месте; $t_{k_j}^- \leq \tilde{t}_{k_j}^-$ — заданный момент времени; $\mathbf{X}_{k_i}^{(-k_j)}$, $y_l^{(-k_j)}$ — заданные векторы и постоянные, $l = 1, \dots, n$, $l \neq k_j$, $i = 1, \dots, m$, $i \neq j$, $\mathbf{X}_{k_i}^{(-k_j)} \in R^{k_i}$. При этом полагаем

$$(y_l(t_{k_j}^-) - \tilde{y}_l)(y_l^{(-k_j)} - \tilde{y}_l) > 0, \quad l = 1, \dots, n, \quad l \neq k_j,$$

т.е. положение постоянных $y_l(t_{kj}^-)$ по отношению к пороговым значениям \tilde{y}_l после скачка не изменяется. Тогда отображение перехода φ_{kj}^- , понижающее размерность системы S , не влияет мгновенно на отключение или подключение других подсистем S_{ki} .

Далее, при $t \geq \tilde{t}_{kj}^-$ динамика системы S задается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{ki} &= f_{k1, \dots, \hat{k}_j, \dots, km}^{ki}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \hat{\mathbf{X}}_{ki}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad i = 1, \dots, m, \quad i \neq j; \\ \dot{\mathbf{X}}_{kj} &= \mathbf{0}^{(kj)}; \\ \dot{y}_l &= g_{k1, \dots, \hat{k}_j, \dots, km}^l(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \hat{\mathbf{X}}_{kj}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad l = 1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

с начальными условиями

$$\mathbf{X}_{ki}(\tilde{t}_{kj}^-) = \mathbf{X}_{ki}^{(-kj)}, \quad i = 1, \dots, m, \quad i \neq j; \quad \mathbf{X}_{kj}(\tilde{t}_{kj}^-) = \mathbf{0}^{(kj)}; \quad (3)$$

$$y_l(\tilde{t}_{kj}^-) = y_l^{(-kj)}, \quad l = 1, \dots, n, \quad l \neq kj, \quad y_{kj}(\tilde{t}_{kj}^-) = \tilde{y}_{kj} - \delta_{kj}^-. \quad (4)$$

Здесь символом $\hat{\mathbf{X}}_{ki}$ обозначен отсутствующий вектор. В силу второго уравнения системы (2) и начального условия (3) $\mathbf{X}_{kj}(t) \equiv \mathbf{0}^{(kj)}$ при $t \geq \tilde{t}_{kj}^-$. Это означает, что переменной $\mathbf{X}_{kj}(t)$ можно пренебречь. Тогда будем полагать, что при $t \geq \tilde{t}_{kj}^-$ динамика системы S задается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{ki} &= f_{k1, \dots, kj-1, kj+1, \dots, km}^{ki}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{kj-1}, \mathbf{X}_{kj+1}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad i = 1, \dots, m, \quad i \neq j; \\ \dot{y}_l &= g_{k1, \dots, kj-1, kj+1, \dots, km}^l(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{kj-1}, \mathbf{X}_{kj+1}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad l = 1, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, произошло отключение подсистемы S_{kj} . В результате динамика системы S описывается уравнениями (5) с начальными условиями (3), (4).

З а м е ч а н и е. Следует отметить, что отображение φ_{kj}^- позволяет системе S совершить временной скачок длительностью $\tilde{t}_{kj}^- - t_{kj} \geq 0$.

Подключение S_{kj} . Пусть динамика системы S задается уравнениями (5). Предположим, что в некоторый момент времени $t = t_{kj}^+$ переменная $y_{kj}(t)$ принимает значение \tilde{y}_{kj} : $y_{kj}(t_{kj}^+) = \tilde{y}_{kj}$. Отсутствие в составе S подсистемы S_{kj} при $t < t_{kj}^+$ означает, что при этом выполняется условие $y_{kj}(t) < \tilde{y}_{kj}$. Введем подключающие подсистему S_{kj} отображения $\varphi_{kj}^+ : R^{(k1)+\dots+(kj-1)+(kj+1)+\dots+(km)+n+1} \rightarrow R^{(k1)+\dots+(km)+n+1}$, так что

$$\begin{aligned} &\varphi_{kj}^+(\mathbf{X}_{k1}(t_{kj}^+), \dots, \mathbf{X}_{k(j-1)}(t_{kj}^+), \mathbf{X}_{k(j+1)}(t_{kj}^+), \dots, \mathbf{X}_{km}(t_{kj}^+), y_1(t_{kj}^+), \dots, y_n(t_{kj}^+), t_{kj}^+) = \\ &= (\mathbf{X}_{k1}^{(+kj)}, \dots, \mathbf{X}_{k(j-1)}^{(+kj)}, \mathbf{X}_{kj}^{(+kj)}, \mathbf{X}_{k(j+1)}^{(+kj)}, \dots, \mathbf{X}_{km}^{(+kj)}, y_1^{(+kj)}, \dots, y_{k(j-1)}^{(+kj)}, \tilde{y}_{kj} + \delta_{kj}^+, y_{k(j+1)}^{(+kj)}, \dots, y_n^{(+kj)}, \tilde{t}_{kj}^+), \end{aligned}$$

где δ_{kj}^+ , \tilde{t}_{kj}^+ , $y_i^{(+kj)}$ — заданные постоянные, $\delta_{kj}^+ > 0$, $\tilde{t}_{kj}^+ \geq t_{kj}^+$; $\mathbf{X}_{ki}^{(+kj)}$ — заданные векторы, $\mathbf{X}_{ki}^{(+kj)} \in R^{(ki)}$, $i = 1, \dots, m$; при этом полагаем, что $(y_l(t_{kj}^+) - \tilde{y}_l)(y_l^{(+kj)} - \tilde{y}_l) > 0$, $l = 1, \dots, n$,

$l \neq kj$, т.е. положение постоянных $y_l(t_{kj}^+)$ не изменяется по отношению к пороговым значениям \tilde{y}_l после скачка, иными словами, отображение Φ_{kj}^+ , повышающее размерность системы, не влияет мгновенно на отключение или подключение других подсистем S_{ki} .

Далее, при $t \geq \tilde{t}_{kj}^+$ динамика системы S задается уравнениями (1) с начальными условиями $\mathbf{X}_{ki}(\tilde{t}_{kj}^+) = \mathbf{X}_{ki}^{(+kj)}$, $y_l(\tilde{t}_{kj}^+) = y_l^{(+kj)}$, $y_{kj}(\tilde{t}_{kj}^+) = \tilde{y}_{kj} + \delta_{kj}^+$, $l = 1, \dots, n$, $l \neq kj$, $i = 1, \dots, m$.

Непрерывное изменение структуры. Отключение S_{kj} . Предположим, что при $t < t_{kj}^-$ динамика системы S задается уравнениями (1). Пусть $y_{kj}(t_{kj}^-) = \tilde{y}_{kj}$.

Также полагаем, что $g_{k1, \dots, km}^{kj}(\mathbf{X}_{k1}(t_{kj}^-), \dots, \mathbf{X}_{km}(t_{kj}^-)) < 0$. Пусть при $t \geq t_{kj}^-$, $\mathbf{X}_{kj}(t) \neq 0$ динамика системы S задается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{ki} &= f_{k1, \dots, km}^{-ki}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{ki}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad i = 1, \dots, m; \\ \dot{y}_l &= g_{k1, \dots, km}^{-l}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{kj}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad l = 1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где функции $f_{k1, \dots, km}^{-ki}$, $g_{k1, \dots, km}^{-l}$ обеспечивают существование и единственность решений системы (6). При этом полагаем, что в области $\{\|\mathbf{X}_{kj}\| \leq \|\mathbf{X}_{kj}(t_{kj}^-)\|\}$

$$f_{k1, \dots, km}^{-kj}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{kj}, \dots, \mathbf{X}_{km}) < -\alpha_{kj}^- < 0, \quad (7)$$

где α_{kj}^- — заданная постоянная, кроме того,

$$g_{k1, \dots, km}^{-kj}(\mathbf{X}_{k1}(t_{kj}^-), \dots, \mathbf{X}_{kj}(t_{kj}^-), \dots, \mathbf{X}_{km}(t_{kj}^-)) < 0.$$

Далее, наличие условия (7) позволяет определить момент времени \hat{t}_{kj} , такой что $\mathbf{X}_{kj}(\hat{t}_{kj}) = 0$. При этом возможны два случая: 1) траектория системы (6), находясь в области, для которой $y_{kj} < \tilde{y}_{kj}$, попадает на множество $\mathbf{X}_{kj} = 0$; 2) траектория системы (6) сначала при $t = \tilde{t}_{kj} < \hat{t}_{kj}$ попадает на плоскость $y_{kj} = \tilde{y}_{kj}$.

Рассмотрим оба случая:

1) с момента попадания траектории на множество $\mathbf{X}_{kj} = 0$ динамика системы S задается уравнениями (5); таким образом, происходит отключение подсистемы S_{kj} ;

2) после попадания траектории на плоскость $y_{kj} = \tilde{y}_{kj}$ из области $y_{kj} < \tilde{y}_{kj}$ полагаем, что динамика системы S задается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}_{ki} &= f_{k1, \dots, km}^{+ki}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{ki}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad i = 1, \dots, m; \\ \dot{y}_l &= g_{k1, \dots, km}^{+l}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{kj}, \dots, \mathbf{X}_{km}), \quad l = 1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где функции $f_{k1, \dots, km}^{+ki}$, $g_{k1, \dots, km}^{+l}$ обеспечивают существование и единственность решения.

Пусть

$$\left. \begin{aligned} g_{k1, \dots, km}^{+kj}(\mathbf{X}_{k1}(\tilde{t}_{kj}), \dots, \mathbf{X}_{kj}(\tilde{t}_{kj}), \dots, \mathbf{X}_{km}(\tilde{t}_{kj})) &\geq 0, \\ g_{k1, \dots, km}^{-kj}(\mathbf{X}_{k1}(\tilde{t}_{kj}), \dots, \mathbf{X}_{kj}(\tilde{t}_{kj}), \dots, \mathbf{X}_{km}(\tilde{t}_{kj})) &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При этом функции $g_{k1,\dots,km}^{+kj}$ обладают свойством положительного скачка: гарантируют попадание траектории на плоскость $y_{kj} = \tilde{y}_{kj} + \delta_{kj}^+$, после чего динамика системы S задается уравнениями (1). Это означает, что отключения подсистемы S_{kj} не произошло („ложная тревога“).

Подключение S_{kj} . Пусть динамика S задается системой (5), и в некоторый момент времени t_{kj}^+ имеем $y_{kj}(t_{kj}^+) = \tilde{y}_{kj}$. При этом полагаем

$$g_{k1,\dots,k(j-1),k(j+1),\dots,km}^{kj}(\mathbf{X}_{k1}(t_{kj}^+), \dots, \mathbf{X}_{k(j-1)}(t_{kj}^+), \mathbf{X}_{k(j+1)}(t_{kj}^+), \dots, \mathbf{X}_{km}(t_{kj}^+)) > 0.$$

Далее, при $t \geq t_{kj}^+$ динамика S задается системой (8), для которой, помимо условия (9) и свойства положительного скачка для $g_{k1,\dots,km}^{+kj}$, до момента попадания траектории на плоскость $y_{kj} = \tilde{y}_{kj} + \delta_{kj}^+$ выполняется условие

$$|f_{k1,\dots,km}^{+kj}(\mathbf{X}_{k1}, \dots, \mathbf{X}_{kj}, \dots, \mathbf{X}_{km})| > \alpha_{kj}^+ > 0,$$

где α_{kj}^+ — заданная постоянная.

В результате динамика S задается системой (1). Происходит подключение подсистемы S_{kj} .

О п р е д е л е н и е. Будем называть построенную выше математическую модель системой с переменной размерностью (СПР) с разрывным или непрерывным изменением структуры.

Траектория СПР состоит из участков, соответствующих временным интервалам, на которых структура системы не изменяется. При этом каждый участок траектории порождает последовательность структур $\gamma^{(k)}$, т.е. структурную траекторию. Задача стабилизации заданной структуры в случае линейной системы решается в работе [8].

Пример. Рассмотрим систему m связанных между собой твердых тел P_k , уравнения движения которых имеют вид: $f_k(\omega_k, \dot{\omega}_k, v_k, \dot{v}_k, u_k) = 0$, где ω_k, v_k — абсолютные угловая скорость k -го тела и скорость относительно неподвижной точки O_k ; u_k — управляющий момент сил, приложенных к k -му телу. Пусть в каждом теле выделен орт \mathbf{r}_k , а в пространстве задана совокупность ортов \mathbf{d}_k . Задача состоит в стабилизации системы тел, т.е. в построении управлений u_k , при которых $\mathbf{r}_k \rightarrow \mathbf{d}_k$ при $t \rightarrow \infty$. Введем дополнительное не прямое управление w , такое что $\dot{w} = M - (|u_1| + \dots + |u_m|)$, где $M = M(t)$ — пороговая кусочно-постоянная функция, $|u_k|$ — модуль вектора u_k . Пусть задана бесконечная совокупность постоянных $w_i : w_i < w_{i+1}, i = 1, 2, \dots$. Будем полагать, что при $w \in (w_k, w_{k+1})$ в состав системы входят тела P_1, \dots, P_k . При достижении переменной значения w_k происходит отключение тела P_k , а при достижении значения w_{k+1} — подключение тела P_{k+1} . Переменная w характеризует запас энергии, имеющейся в распоряжении управляющего органа системы и затрачиваемой на стабилизацию. Если этот запас достаточно велик, то подключается дополнительный объект, в противном случае отключается один из объектов. Таким образом, построена саморазвивающаяся механическая система с двухуровневым управлением: посредством управления u_k решается задача стабилизации, а посредством параметра w изменяется структура системы в зависимости от наличия энергии, значение которой может регулироваться изменением функции M , зависящей, в свою очередь, от параметров, характеризующих движение системы.

Предложенный подход, который можно назвать методом динамической декомпозиции, позволяет аналитически исследовать сложные системы с переменной структурой и размерностью, используя на различных стадиях их функционирования более простые, по сравнению с исходной, модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов А. Н. Динамическая декомпозиция и устойчивость структур // Математический анализ и его приложения: Сб. / Под ред. В. В. Мазалова. Чита: Изд-во Читинск. пед. ин-та, 1996. Вып. 2. С. 20—24.
2. Шильяк Д. Децентрализованное управление сложными системами. М.: Мир, 1994. 576 с.
3. Груйич Л. Т., Мартынюк А. А., Риббенс-Павелла М. Устойчивость крупномасштабных систем при структурных и сингулярных возмущениях. Киев: Наукова думка, 1984. 473 с.
4. Матросов В. М., Маликов А. И. Вектор-функции Ляпунова в анализе динамических систем со структурными изменениями // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 1998. Вып. 2. С. 47—54.
5. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управление структурной динамикой сложных динамических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
6. Москвин Б. В., Михайлов Е. П., Павлов А. Н., Соколов Б. В. Комбинированные модели управления структурной динамикой информационных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 7—12.
7. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.
8. Кириллов А. Н. Управление многостадийными технологическими процессами // Вестн. СПбГУ. Сер. 10. 2006. Вып. 4. С. 127—131.

Сведения об авторе

Александр Николаевич Кириллов — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров, кафедра высшей математики; E-mail: krlivaleksandr@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
высшей математики

Поступила в редакцию
18.09.08 г.

Е. А. БАРБАШОВ, А. В. ДЕМИН, В. С. КУЛАГИН, А. Б. НАЧКЕБИЯ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются основные этапы имитационного моделирования при исследовании временных дискретных характеристик систем, определен метод построения имитационной модели, основанный на формализованном описании. Приведен математический аппарат построения имитационной модели на основе кусочно-линейной характеристики.

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретные системы, граф ситуаций.

В настоящее время при разработке сложных технических систем (ТС) широкое применение находят методы и средства имитационного моделирования. Сущность методологии имитационного моделирования ТС состоит в замене исходной системы ее „эквивалентом“ — имитационной математической моделью. Особый интерес представляет исследование временных характеристик дискретных ТС. К таким системам относится, например, оборудование летательных аппаратов (ЛА). Построение имитационной модели для определения временных характеристик дискретной ТС и является предметом исследования в настоящей статье.

Известно [1, 2], что при дискретно-событийном имитационном моделировании состояние ТС меняется в моменты наступления ситуаций. В рассматриваемом здесь случае — это исследование временных характеристик оборудования ЛА на предмет определения его своевременной и правильной реакции на возможные ситуации.

Тем самым имитационное моделирование дискретной ТС с очередью есть не что иное, как моделирование системы путем изменений ее состояния, происходящих в дискретные моменты времени. При этом состояние ТС как модели ситуаций определяется значениями переменных и атрибутами ее компонентов.

Сама постановка задачи об имитационном моделировании ТС порождает создание плана действий, который условно можно разбить на три этапа: модель — алгоритм — программа (триада моделирования), при этом [3]

— на первом этапе создается „эквивалент“ системы, отражающий в математической форме ее важнейшие свойства (законы и связи, присущие компонентам ТС), что позволяет получать предварительную информацию об ее атрибутах и параметрах;

— на втором этапе разрабатывается алгоритм реализации процесса моделирования ТС, при этом определяется последовательность вычислительных и логических операций, которые нужно произвести, чтобы найти искомые величины с заданной точностью;

— на третьем этапе создается программное обеспечение, „переводящее“ модель и алгоритм на доступный компьютеру язык, т.е. можно считать, что программное обеспечение является электронным „эквивалентом“ исследуемой ТС.

В качестве математической основы построения имитационной модели дискретной ТС с очередью целесообразно использовать граф временной реакции компонентов ТС на задаваемые входные ситуации.

Множество возможных состояний ТС представим как $\{c_i\} \& \{r_k\} \geq \{y_i\}$, где $\{c_i\} = C$ — множество возможных ситуаций; $\{r_k\} = R$ — множество возможных реакций компонентов ТС на эти ситуации; $\&$ — операция сочетания c_i и r_k ; $\{y_i\} = Y$ — множество результатов реакций компонентов ТС на ситуации. При этом множество C определим как $C = W \& Q$, где W — множество

задаваемых ситуаций на входе ТС, Q — множество сопутствующих обстоятельств (может быть интерпретировано как помехи), которое является множеством функций от заданных условий (ограничений) на множестве параметров состояний.

Множество $\{d_i\} \in D = \mathfrak{R} \& \Omega$ определяет множество атрибутов ТС, где \mathfrak{R} — оператор временной реакции компонентов ТС, а Ω — оператор формирования множества невременных параметров выходных сигналов компонентов ТС.

Критерий оценки полноты имитационной модели ТС может быть определен как нахождение такого множества возможных состояний системы — $\{C \& R\} \geq Y$, для которого достигается $\max\{y_i\}$ при $y_i < b_i$, где $\{b_i\} \in B$, $i=1, 2, \dots, n$, — заданное множество ограничений.

Для верификации функционирования компонентов ТС выделим $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ — эквивалентное множество возможных состояний компонентов ТС.

Определим $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$ как временную реакцию компонентов ТС при изменении состояния на множестве Y . При этом функционирование компонента ТС алгоритмически адекватно его функциональным свойствам. Тем самым алгоритм адекватности изменения дискретной ТС может быть представлен следующим образом:

$R_{1i} \in R_1$ — определяет временную реакцию i -го компонента ТС на изменение состояния на множестве Y и является множеством $\{S_{1i} \& S_{1i+1}\}$;

$R_{2i} \in R_2$ — определяет временную реакцию i -го компонента ТС при переходе из одного состояния в другое и является множеством $\{S_{2i} \& S_{2i+1}\}$;

$R_{3i} \in R_3$ — определяет временную реакцию i -го компонента ТС при переходе из возможного в данный момент времени состояния в другое и является множеством $\{S_{3i} \& S_{3i+1}\}$;

$R_{4i} \in R_4$ — определяет временную реакцию i -го компонента ТС при переходе с границы прежнего состояния на границу нового и является множеством $\{S_{4i} \& S_{4i+1}\}$;

$R_{5i} \in R_5$ — определяет временную реакцию i -го компонента ТС при переходе с новой границы состояния во множество других состояний и является множеством $\{S_{5i} \& S_{5i+1}\}$;

$R_{6i} \in R_6$ — определяет временную реакцию i -го компонента ТС при переходе внутри его граничного состояния и является множеством $\{S_{6i} \& S_{6i+1}\}$.

Тем самым, не умаляя общности рассуждений, правомерно процессы, происходящие в дискретной ТС, отнести к процессам вида марковские цепи. Тогда в соответствии с графом переходов в марковской цепи уравнение, описывающее временную реакцию компонентов ТС, может быть представлено, например для оборудования управления полетом ЛА, следующим образом:

$$R^T(m) = R^T(0) \prod_{j=1}^{m-1} \pi(j); \quad R^T(0) = [1; 0; 0; 0; 0],$$

где $\pi(i)$ — матрица параметров i -го компонента ТС.

На рис. 1 представлена граф-схема временной реакции компонентов ТС на задаваемые входные ситуации для имитационного моделирования комплекса оборудования управления полетом ЛА.

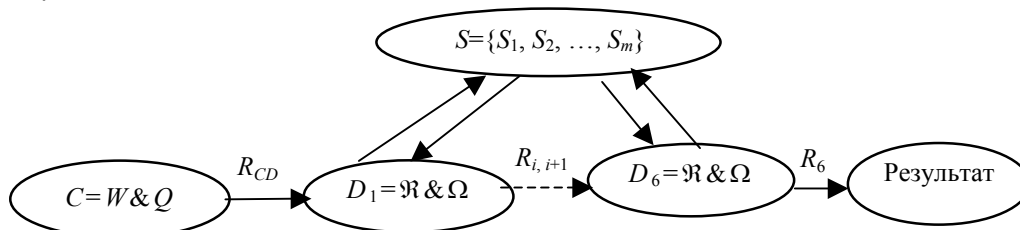


Рис. 1

Поскольку компоненты ТС, как правило, функционально и параметрически различны, то для разработки программного обеспечения имитационного моделирования пара-

метры каждого из компонентов необходимо пронормировать относительно их максимального значения.

На рис. 2 представлен результат имитационного и физического моделирования комплекса оборудования управления полетом ЛА, состоящего из четырех компонентов, в виде графиков временной реакции компонентов ТС на входную ситуацию. Прямые линии соответствуют имитационному моделированию системы, представленной кусочно-линейными характеристиками, а кривые — ее физическому моделированию. По оси абсцисс время t выражено в относительных единицах: t_i/t_{Σ} , где t_i — время реакции i -го компонента, а t_{Σ} — суммарное время реакции ТС; по оси ординат выражена амплитуда реакции R в относительных единицах: R_i/R_{Σ} , где R_i — значение амплитуды реакции i -го компонента, а R_{Σ} — значение суммарной амплитуды реакции ТС. Как видно из графиков, результат имитационного моделирования фактически является оценкой сверху по отношению к реальному значению. Тем самым имитационное моделирование подобных систем позволяет предположить, что на практике работоспособность системы будет не хуже, если реальные параметры компонентов на момент моделирования известны.

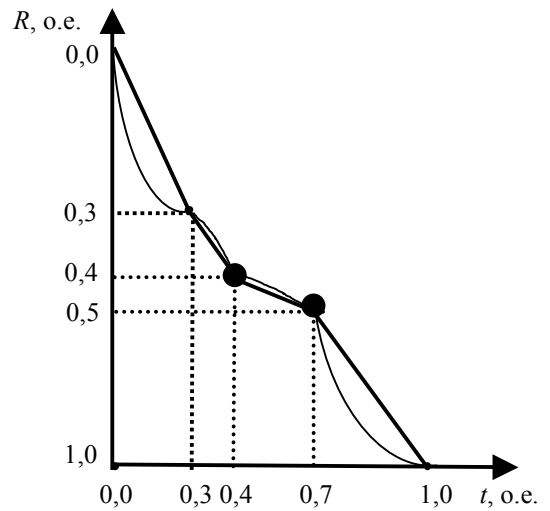


Рис. 2

Предложенный подход позволил разработать программное обеспечение для тестирования оборудования управления полетом ЛА как на предполетном этапе, так и для тренировки летного состава при нештатных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем. Математические основы. М.: Мир, 1978. 312 с.
2. Прицкер А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛАМ II: Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 646 с.
3. Демин А. В., Копорский Н. С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 139 с.

Сведения об авторах

- Евгений Алексеевич Барбашов** — ОАО „КОТЛИН-Новатор“, Санкт-Петербург, главный конструктор
- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: dav_60@mail.ru
- Вячеслав Сергеевич Кулагин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники
- Александр Бежанович Начкебия** — ЗАО „Теплофизприбор“, Санкт-Петербург, директор

Рекомендована кафедрой информатики и прикладной математики СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию 01.10.08 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50

С. А. КАБАНОВ, Е. С. ПЕТУХОВА

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

Рассматривается схема ветроэнергетической установки с колебательным рабочим движением. Представлена математическая модель динамики поворотных аэродинамических поверхностей (планов). Для обеспечения минимума выбранного критерия Красовского разработан алгоритм оптимального управления поворотом рабочих поверхностей с использованием модели прогнозирования движения.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, оптимальное управление, модель прогнозирования движения.

В настоящее время такие источники энергии, как солнечная, ветровая, океаническая занимают в мировом производстве энергии лишь малую долю (менее 1 %), хотя являются возобновляемыми и относятся к экологически чистым. Ухудшение экологической обстановки обуславливает необходимость разработки устройств, позволяющих увеличить процент использования этих источников энергии.

До недавнего времени исследования в области ветроэнергетики сводились к изучению ветроэнергетических установок (ВЭУ) с вращательным рабочим режимом. Импеллерами (преобразователями энергии ветрового потока) в таких установках служат ветротурбины с горизонтальными или вертикальными осями [1]. ВЭУ с вращательным рабочим режимом имеют достаточно ограниченное применение. Это обусловлено большой массой, приходящейся на единицу полезной мощности; невысоким коэффициентом использования мощности ветрового потока, проходящего через рабочую площадь турбины; ограниченными рабочим диапазоном скоростей ветра и способностью адаптации к изменению ветрового режима; значительной стоимостью и др. [2]. В целях устранения указанных недостатков А. А. Красовским был предложен новый класс ВЭУ — ветроэнергетические установки с колебательным рабочим режимом (ВЭУК) [1, 2]. В них энергия ветрового потока преобразуется в механическую колебательную энергию посредством импеллеров, совершающих автоколебания. Возбуждение автоколебаний производится как за счет аэродинамических, упругих и инерционных сил, так и с помощью автоматического управления поворотом аэродинамических поверхностей — планов импеллера [1].

В настоящей статье рассматривается задача оптимального управления наземной ветроэнергетической установкой с автоколебательным рабочим режимом.

Установка, схема которой представлена на рис. 1, *a* [3, 4], имеет внешнюю раму 1, не участвующую в колебательном вертикальном движении, и внутреннюю раму 2, подвешенную

во внешней на пружинах 3. Внутренняя рама (секция импеллера) содержит поворотные аэродинамические поверхности 4 (приводы поворота поверхностей на рисунке не показаны). В рабочем режиме рама 2 совершает возвратно-поступательные колебания, а рабочие поверхности 4 — синхронные колебания вокруг своей фиксированной оси при смене направления поступательного движения секции. Преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электрическую может осуществляться различными способами.

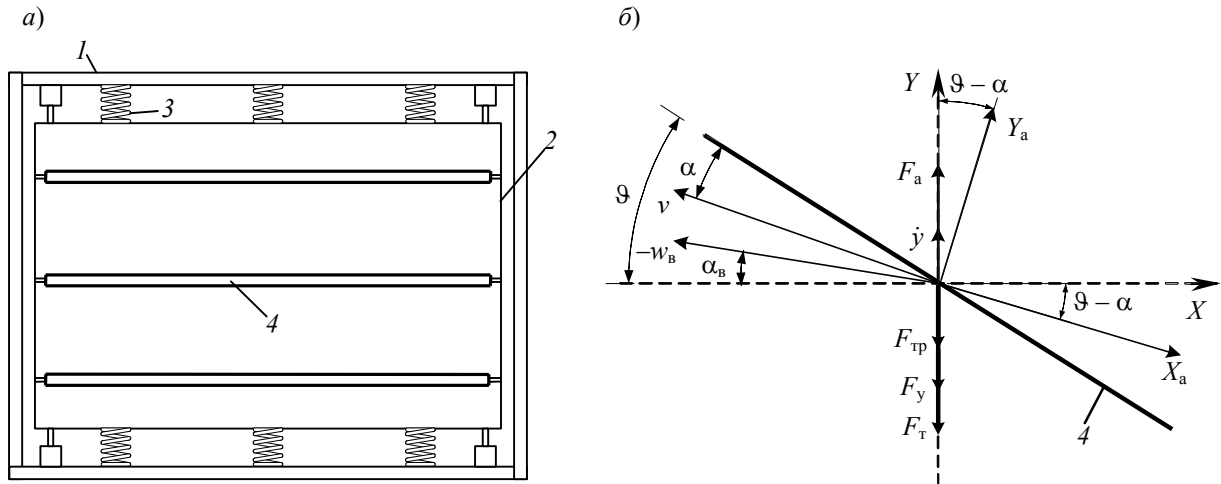


Рис. 1

Математическая модель ВЭУК [1, 3], приведенная на рис. 1, б, может быть представлена системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= \frac{F_a(x_2, x_3) - rx_2 - c_{\text{пр}}x_1 - mg}{m}; \\ \dot{x}_3 &= u. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ — вектор состояния системы со следующими компонентами: $x_1 = y$ — величина перемещения секции импеллера вдоль вертикальной оси; x_2 — скорость перемещения секции импеллера (\dot{y} на рис. 1, б); $x_3 = \alpha$ — угол атаки рабочей поверхности; F_a — сумма проекций аэродинамических сил (X_a, Y_a) на вертикальную ось; $rx_2 = F_{\text{тр}}$, где $F_{\text{тр}}$ — сила трения, r — коэффициент сопротивления; $c_{\text{пр}}x_1 = F_y$, где F_y — сила упругости пружин, $c_{\text{пр}}$ — суммарная жесткость; $mg = F_T$, где F_T — сила тяжести, m — масса конструкции, g — ускорение свободного падения.

Величина F_a определяется следующим образом:

$$F_a = 0,5\rho S_{\text{п}\Sigma} W v [C_Y(x_3) \cos \alpha_b - C_X(x_3) (\sin \alpha_b + x_2/W)],$$

где ρ — плотность воздуха; $S_{\text{п}\Sigma}$ — суммарная площадь рабочих поверхностей секции; W — модуль вектора скорости ветра w_b ; $v = \sqrt{x_2^2 + W^2 - 2x_2W \sin \alpha_b}$ — скорость движения рабочей поверхности относительно невозмущенного потока; α_b — угол, образуемый вектором скорости ветра w_b и нормалью к плоскости секции; $C_Y(x_3), C_X(x_3)$ — аэродинамические характеристики, для аппроксимации которых используются следующие аналитические выражения:

$$C_Y(x_3) = A_Y \sin 2x_3; \quad C_X(x_3) = A_X(1 - \cos x_3) + C_{X0},$$

здесь $A_Y = 3$, $A_X = 0,5A_Y$ — постоянные коэффициенты; $C_{X0} = 0,1$.

Проекции (см. рис. 1, б)

$$Y_a = 0,5\rho v^2 C_Y(x_3) S_{\Pi}, \quad X_a = 0,5\rho v^2 C_X(x_3) S_{\Pi}$$

— подъемная сила и сила лобового сопротивления рабочей поверхности соответственно.

Начальные условия считаются заданными:

$$t_0 = 0, \quad x_1(0) = 0, \quad x_2(0) = 0, \quad x_3(0) = 0.$$

Сигналом управления является скорость изменения угла α : $\dot{x}_3 = \dot{\alpha} = u$.

Угол поворота ϑ рабочей поверхности (см. рис. 1, б) связан с углом α следующим соотношением:

$$\vartheta = \alpha + \arctg\left(\frac{x_2/W + \sin \alpha_{\text{в}}}{\cos \alpha_{\text{в}}}\right).$$

Ограничений на управление не накладывается.

Требуется найти оптимальное управление $u_{\text{опт}}$, обеспечивающее минимум функционала Красовского [5] вида

$$I = I_T + 0,5 \int_t^{t+\Delta t} \frac{u^2 + u_{\text{опт}}^2}{k^2} d\tau, \quad (2)$$

$$I_T = \pm [C_Y(x_3) \cos \alpha_{\text{в}} - C_X(x_3)(\sin \alpha_{\text{в}} + x_2/W)].$$

Здесь I_T — терминальная часть функционала, отражающая полезную составляющую аэродинамической силы; t — момент начала оптимизации движения (принимает различные значения); Δt — интервал оптимизации; k — постоянный коэффициент (его значение выбирается по результатам моделирования управляемого движения исходя из требований к переходному процессу).

В выражении (2) знак минус соответствует повороту рабочей поверхности для получения положительной аэродинамической силы, знак плюс — повороту рабочей поверхности для получения отрицательной аэродинамической силы. Смена знака происходит при изменении направления поступательного движения секции (при смене знака переменной состояния x_2).

Для минимизации функционала Красовского используем следующую модель прогнозирования движения при $u(t) = 0$ [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= \frac{F_a(x_2, x_3) - rx_2 - c_{\text{пр}}x_1 - mg}{m}; \\ \dot{x}_3 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Гамильтониан системы имеет вид

$$H = H_M + p_3 u + 0,5 \frac{u^2 + u_{\text{опт}}^2}{k^2}.$$

Обозначим $f(x_1, x_2, x_3) = \frac{F_a(x_2, x_3) - rx_2 - c_{\text{пр}}x_1 - mg}{m}$, тогда

$$H_M = p_1 x_2 + p_2 f(x_1, x_2, x_3).$$

Здесь $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)^T$ — вектор сопряженных переменных (множителей Лагранжа).

Оптимальное управление определяется из условия $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ как $u_{\text{опт}} = -k^2 p_3$. Система уравнений для сопряженных переменных имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_1 &= -\frac{\partial H_M}{\partial x_1} = -p_2 \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1}; \\ \dot{p}_2 &= -\frac{\partial H_M}{\partial x_2} = -p_1 - p_2 \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2}; \\ \dot{p}_3 &= -\frac{\partial H_M}{\partial x_3} = -p_2 \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \end{aligned} \right\}$$

при граничных условиях

$$\mathbf{p}^T(t + \Delta t) = \left. \frac{\partial I_T}{\partial \mathbf{x}} \right|_{t + \Delta t}.$$

Отсюда для отрицательных аэродинамических сил получим

$$\left. \begin{aligned} p_1(t + \Delta t) &= \left. \frac{\partial I_T}{\partial x_1} \right|_{t + \Delta t} = 0; \\ p_2(t + \Delta t) &= \left. \frac{\partial I_T}{\partial x_2} \right|_{t + \Delta t} = \frac{-C_X(x_3)}{W}; \\ p_3(t + \Delta t) &= \left. \frac{\partial I_T}{\partial x_3} \right|_{t + \Delta t} = \left[\frac{\partial C_Y(x_3)}{\partial x_3} \cos \alpha_B - \frac{\partial C_X(x_3)}{\partial x_3} \left(\sin \alpha_B + \frac{x_2}{W} \right) \right], \end{aligned} \right\}$$

для положительных аэродинамических сил —

$$\left. \begin{aligned} p_1(t + \Delta t) &= \left. \frac{\partial I_T}{\partial x_1} \right|_{t + \Delta t} = 0; \\ p_2(t + \Delta t) &= \left. \frac{\partial I_T}{\partial x_2} \right|_{t + \Delta t} = \frac{C_X(x_3)}{W}, \\ p_3(t + \Delta t) &= \left. \frac{\partial I_T}{\partial x_3} \right|_{t + \Delta t} = \left[-\frac{\partial C_Y(x_3)}{\partial x_3} \cos \alpha_B + \frac{\partial C_X(x_3)}{\partial x_3} \left(\sin \alpha_B + \frac{x_2}{W} \right) \right]. \end{aligned} \right\}$$

Поскольку задача является нетерминальной (момент окончания процесса заранее не назначается), используется скользящий интервал оптимизации, величина которого определяется по результатам моделирования.

Математическое моделирование управляемого движения ВЭУК производилось при следующих значениях параметров системы и внешней среды: $m = 5$ кг, $\alpha_B = 0$, $c_{\text{пр}} = 100$ Н/м, $W = 5$ м/с, $r = 38$ Н·с/м, $S_{\text{пс}} = 1$ м², $\rho = 1,29$ кг/м³, $k = 3,5$, $\Delta t = 0,1$ с, шаг интегрирования 0,001 с. Результаты моделирования в виде зависимостей величины перемещения x_1 секции импеллера, угла поворота ϑ этой секции и угла атаки α от времени представлены на рис. 2—4.

Итак, рассмотрено решение нетерминальной задачи оптимального управления ветроэнергетической установкой с автоколебательным рабочим режимом на основе алгоритма,

использующего модель прогнозирования движения. Как показали результаты моделирования, применение этого алгоритма позволяет решить задачу оптимального управления, обеспечивая при этом требуемое качество переходных процессов.

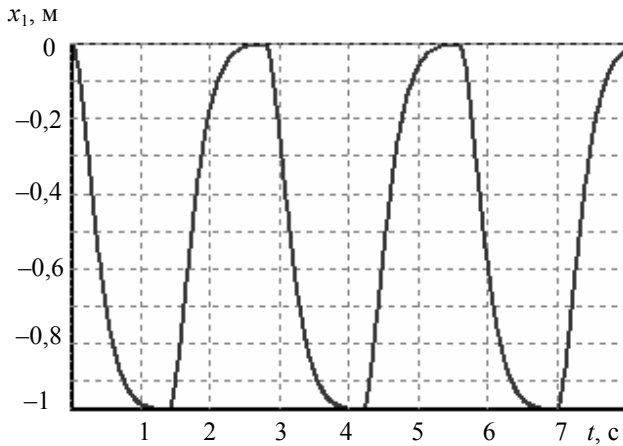


Рис. 2

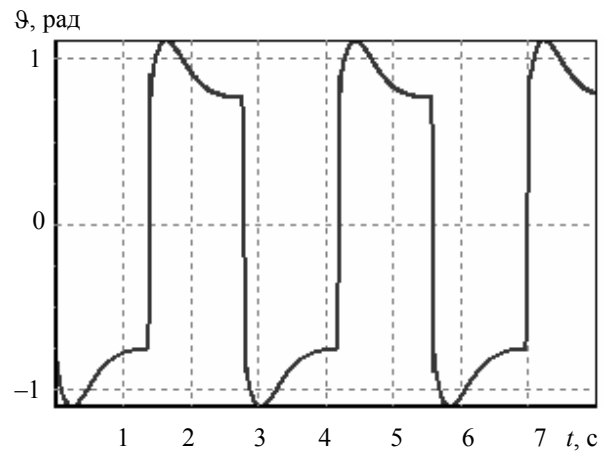


Рис. 3

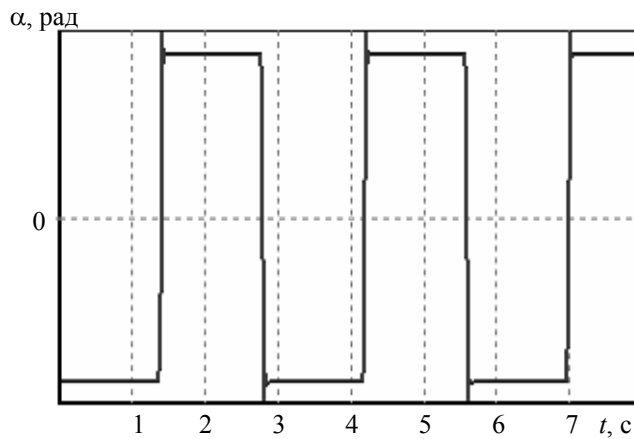


Рис. 4

При решении задачи были определены возможные направления дальнейших исследований. Моделирование в среде „Fluent“ процесса обтекания профиля поверхности ВЭУК невязким газом показывает, что предельное значение скорости изменения угла атаки ограничено. Поэтому при синтезе установки следует ввести ограничение на управление. Также в системе (1) следует учесть инерционность динамики рабочей поверхности при ее повороте на оптимальный угол. Кроме того, при разработке конструкции ВЭУК должны быть предусмотрены возможности экстренного торможения, снабжения системой антиобледенения и системой контроля уровня вибраций. Решение этих вопросов позволит создать экономичные и экологически чистые системы энергообеспечения.

Исследования, описанные в настоящей статье, выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований, № 09-08-00829.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А. А. Синтез автоколебательных систем с приложением к ветроэнергетической установке нового класса // Изв. РАН. Сер. Техн. кибернетика. 1994. № 6. С. 5—15.
2. Красовский А. А. Синтез цилиндроэллиптических аттракторов с приложением к ветроэнергетической установке нового класса // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 1996. № 2. С. 21—30.

3. Красовский А. А. Модульные ветроэнергетические установки с управляемым колебательным рабочим движением — путь решения энергетических проблем // Там же. 2001. № 6. С. 145—151.
4. Красовский А. А. Синтез полиномиальных автоколебательных систем пятой—седьмой степени // Автоматика и телемеханика. 2002. № 10. С. 44—57.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
6. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997.

Сведения об авторах**Сергей Александрович Кабанов**

- д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем обработки информации и управления, Санкт-Петербург;
E-mail: kabanov@bstu.spb.su

Елена Сергеевна Петухова

- инженер; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем обработки информации и управления, Санкт-Петербург; E-mail: helpet@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
систем обработки информации
и управления

Поступила в редакцию
07.12.07 г.

А. Д. ТАЗЕТДИНОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХ ДИАЛОГОВ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ РЕПЕТИТОРСКОГО ТИПА

Обсуждаются вопросы использования конечных автоматов с памятью для построения многошаговых обучающих диалогов в системах репетиторского типа, что позволяет существенно упростить программные алгоритмы, имитировать обучающий диалог на естественном языке, не накладывая явных ограничений на терминологию и фразеологию ответа обучаемого, и реализовать в обучающей системе гибкое индивидуализированное обучение. Вывод соответствующих реплик или подсказок в каждом из состояний автомата, в зависимости от текущего значения счетчика посещений этого состояния, способствует существенному повышению интеллектуальности диалога.

Ключевые слова: репетиторские обучающие системы, диалоговые системы, автоматизированные обучающие системы.

Потребностью повышения качества образования обусловлено создание различных автоматизированных обучающих систем (АОС), в которых применяются прогрессивные методы обучения с использованием новейших информационных технологий. Среди этих систем особо можно выделить компьютерные автоматизированные обучающие системы репетиторского типа. Отличие репетиторских систем от других АОС определяется, прежде всего, наличием диалоговой формы взаимодействия обучающегося с системой в реальном масштабе времени, где обратная связь осуществляется не только при контроле знаний, но и в процессе их усвоения. Тем не менее существует ряд проблем как технического, так и педагогического характера, решение которых могло бы способствовать активному развитию и использованию репетиторских АОС в учебном процессе. К техническим проблемам следует отнести проблемы анализа текста ответов обучающихся и технологии создания структур вопрос — ответ в диалоговом модуле. Как полагают большинство исследователей и разработчиков адаптивных и интеллектуальных АОС, говорить о полноценном диалоге между учащимся и компьютером можно будет только после решения сложной проблемы кибернетики — понимания компьютером естественного языка. Во всех остальных случаях речь идет об ограничении либо семантической составляющей языка, либо предметной области для реализации диалогового режима обучения [1]. В этих условиях актуальное значение приобретает создание программного обеспечения, позволяющего в рамках репетиторской АОС имитировать обучающий диалог на естественном языке, не накладывая явных ограничений на терминологию и фразеологию ответа обучаемого.

В работе [2] на основе анализа более чем 100 часов учебных взаимодействий обучающихся и преподавателей выделены такие особенности учебных диалогов, как их многошаговая структура и инициированные преподавателем серии диалогов. Кроме позитивного влияния этих факторов на результаты обучения, их легче воплотить в обучающей системе, чем сложные методы и

стратегии, предлагаемые другими исследователями и создателями интеллектуальных обучающих систем. Обычно диалог при индивидуальном обучении растянут, т.е. состоит из нескольких реплик, с помощью которых преподаватель и учащийся совместно ищут ответ на вопрос или решают проблему. Процесс объяснений, уточнений и мысленных моделей представления материала крайне необходим для обучения и обычно более эффективен, чем простое предоставление информации учащемуся.

В настоящей статье по результатам проведенного анализа технологий диалогового обучения в АОС излагаются соображения по использованию в репетиторских АОС автоматов с памятью для построения структур вопрос — ответ в ходе обучающего диалога и реализации сценариев диалогов по этому принципу. Наличие памяти в каждом из состояний автомата (шагов или сцен диалога) позволяет осуществлять дифференцированный анализ ответов обучаемого (в зависимости от текущего счетчика посещений этого состояния) и вывод соответствующих реплик или подсказок, тем самым повышая интеллектуальность диалога.

Существуют два уровня формирования логики диалога. Первый (или внешний) уровень — это собственно сам сценарий и его разделы, соответствующие состояниям автомата (рис. 1), условия переходов из одного состояния в другое, а также комментарии и подсказки системы. Количество разделов не ограничено и определяется только логикой описываемого диалога. В каждом разделе могут содержаться дополнительный вопрос, а также дополнительные блоки, осуществляющие многошаговый анализ ответа обучаемого, что позволяет создавать диалоги произвольной длины и сложности. Переход из одного раздела в другой выполняется на основании совпадения ответа обучающегося с шаблоном возможного варианта ответа, заданного в блоке, содержащем условия и действия сценария для данного раздела, или в блоке, содержащем действия по умолчанию. Структура сценария также может быть задана в виде грамматики, интерпретируемой автоматным преобразователем. В качестве стандарта в таких случаях принято использовать язык XML.

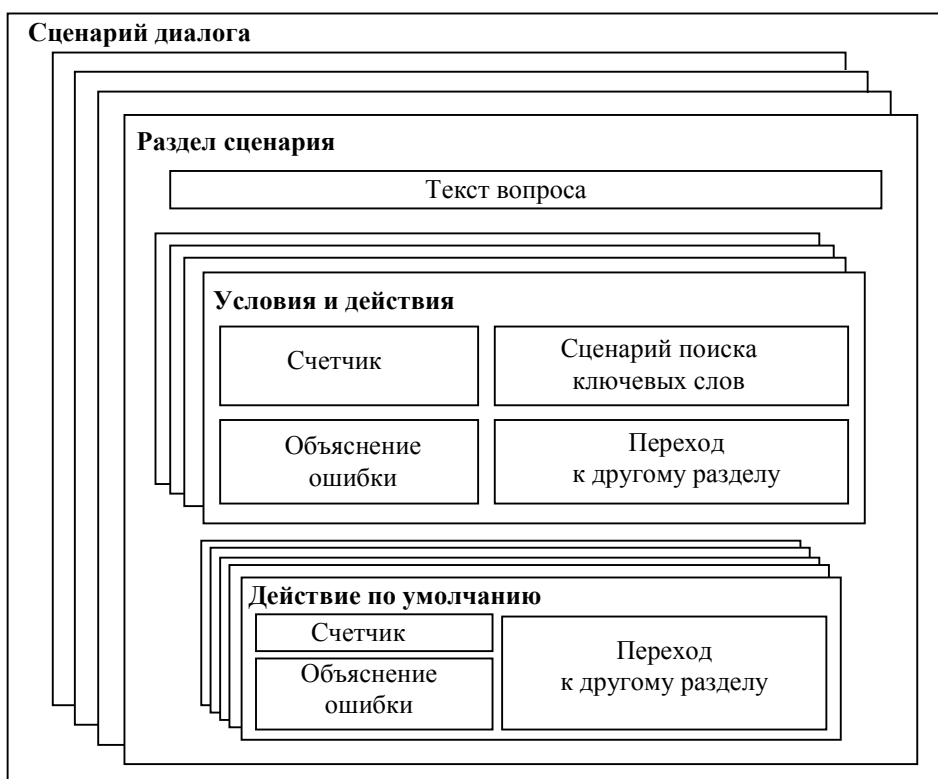


Рис. 1

Второй (или внутренний) уровень формирования логики диалога — это сценарий (алгоритм или выражение) поиска ключевых слов, определяющий, какие слова и в какой

последовательности должны быть найдены: должны ли они находиться в какой-либо связи между собой, должны ли они вычеркиваться из строки поиска и/или восстанавливаться после нахождения, и какая степень точности (распознавания) должна быть соблюдена. В качестве механизма описания алгоритма поиска ключевых слов предлагается метод, разработанный А. И. Стригуном [3, 4] для синтаксического анализа контекстно-зависимых высказываний на основе разбора функций логических дескрипторов. Механизм префиксной записи операторов идеально подходит для стековой или рекурсивной обработки выражения, а само выражение является алгоритмом выполнения проверки текста ответа учащегося. Преимуществом языка, лежащего в основе данного метода, являются простота, гибкость и возможность составления собственных алгоритмов для каждого требующего проверки выражения. В расширенной форме представления грамматик Бэкуса — Наура этот язык описывается следующим образом:

```

флод ::= (оператор { флод } конец_оператора | оператор {
дескриптор } конец_оператора)
спец_символ ::= '``' расширен_поиск
расширен_поиск ::= (?,* )
дескриптор ::= { дескриптор } | (спец_символ, расширен_поиск,
конец_оператора, буква, цифра, '_')
оператор ::= ('&', '@', '^', '|', '\', '/', '[', ']', '{',
'}', '~', '~+', '~-')
конец_оператора ::= '.'

```

Обработку сценариев обучающих диалогов предлагается выполнять с помощью интерпретатора, построенного также по принципу автомата с памятью. Интерпретатор сценариев выполняет такие функции, как предъявление вопросов и анализ ответов, кроме того, он реализует интерактивные механизмы взаимодействия с пользователем в виде подробных описаний ошибок и переходов к дополнительным вопросам в случае неверных ответов. Логика работы интерпретатора описывается алгоритмом, преобразуемым в автомат Мура (рис. 2, здесь a_i — состояние автомата) с помощью метода, предложенного в работах [5—8]. Набор входных переменных и действий автомата представлен в таблице.

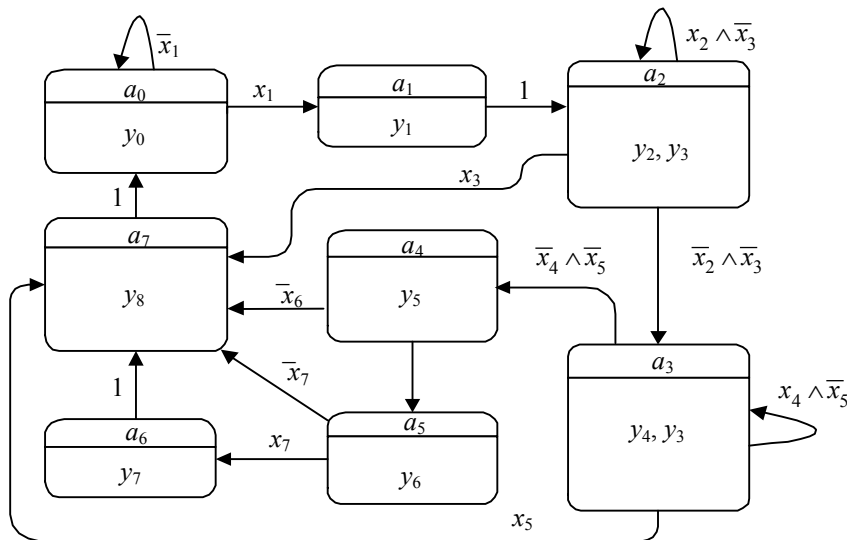


Рис. 2

Изложенный подход к структурной организации сценариев позволяет применять универсальный алгоритм для обработки сценариев произвольных размеров и задавать контент сценария декларативно, посредством экранных форм пользовательского интерфейса.

Входная переменная	Действие
x_1 — ожидание сценария диалога или выбор раздела диалога	y_0 — ожидание сценария, номера раздела или ответа обучающегося
x_2 — проверка ответа обучающегося по всем доступным шаблонам правильного ответа раздела сценария	y_1 — установление кода ошибки: $err = 0$; выбор требуемого раздела, увеличение счетчика раздела
x_3 — совпадение ответа с шаблоном правильного ответа	y_2 — получение следующего шаблона правильного ответа
x_4 — проверка ответа обучающегося по всем доступным шаблонам неправильного ответа раздела сценария	y_3 — сравнение шаблона с ответом
x_5 — совпадение ответа с шаблоном неправильного ответа	y_4 — получение следующего шаблона неправильного ответа
x_6 — ошибка	y_5 — получение параметров по умолчанию
x_7 — ошибка	y_6 — выполнение действий по умолчанию
—	y_7 — установление кода ошибки: $err = 1$
—	y_8 — возврат кода ошибки или номера следующего раздела сценария

Применение рассмотренного подхода при построении обучающих диалогов дает возможность существенно упростить программные алгоритмы, реализовать в обучающей системе относительную предметную независимость и использовать естественный язык для ввода ответов учащихся. Вывод соответствующих реплик или подсказок в каждом из состояний автомата, в зависимости от текущего значения счетчика посещений этого состояния, способствует существенному повышению интеллектуальности диалога. Таким образом, использование автоматов с памятью позволяет реализовать в репетиторских АОС гибкое индивидуализированное обучение. Предложенные теоретические положения могут найти практическое применение при построении самостоятельной адаптивной обучающей системы и в качестве структурной основы для создания отдельных модулей к различным обучающим системам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тазетдинов А. Д. Интерактивные процессы в обучающих системах: методы управления. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.
2. Graesser A. C., Person N. K., Magliano J. P. Collaborative dialog patterns in naturalistic one-on-one tutoring // *Appl. Cognitive Psychology*. 1995. N 9. P. 359—387.
3. Федоров Б. И., Джалиашвили З. О. Логика компьютерного диалога. М.: Онега, 1994.
4. А.с. 4229 ОФАП. Система тестирования с использованием свободного ответа / А. Д. Тазетдинов, А. И. Стригун. № ГР 50200500081 // Сб. Алгоритмы и программы. М.: ВНИИЦ, 2005.
5. Баранов С. И. Синтез микропрограммных автоматов (граф-схемы и автоматы). Л.: Энергия, 1979.
6. Шалыто А. А., Туккель Н. И. Преобразование итеративных алгоритмов в автоматные // *Программирование*. 2002. № 5. С. 12—26.
7. Шопырин Д. Г., Шалыто А. А. Объектно-ориентированный подход к автоматному программированию // *Информационно-управляющие системы*. 2003. № 5. С. 29—39.
8. Степанов О. Г., Шалыто А. А., Шопырин Д. Г. Предметно-ориентированный язык автоматного программирования на базе динамического языка RUBY // Там же. 2007. № 4. С. 22—27.

Сведения об авторе

Андрей Дамирович Тазетдинов — канд. техн. наук; Международный банковский институт, Санкт-Петербург; директор центра информационных технологий;
E-mail: 191_nkr@bk.ru

Рекомендована кафедрой
технологии программирования
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
19.05.08 г.

УДК 65.011.56

Т. Д. ГОЛИЦЫНА

ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ ОБ ИЗДЕЛИИ И СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ: ОТ ЧАСТНЫХ РЕШЕНИЙ К ГЛОБАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ

Рассматриваются вопросы интеграции PDM- и CAD-систем в машиностроении. Предложен унифицированный подход, альтернативный частным решениям, и приведена архитектура программного комплекса, реализующего данный подход.

Ключевые слова: CAIP, PDM-система, STEP, CALS.

В настоящее время большинство машиностроительных предприятий стремятся внедрить стратегию управления производством, которая позволит им сохранять конкурентоспособность в условиях постоянного роста наукоемкости изделий и быстроменяющейся экономической ситуации. Признанная сегодня во всем мире стратегия CALS (англ.: Continuous Acquisition and Life-Cycle Support — непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукта) — это стратегия, направленная на повышение эффективности, производительности и рентабельности процессов хозяйственной деятельности корпорации благодаря внедрению современных методов информационного взаимодействия участников производственного процесса.

Основной этап построения стратегии CALS — создание единого информационного пространства, ядром которого являются взаимодействующие система управления данными об изделии PDM (англ.: Product Data Management) и система автоматизированного проектирования CAD (англ.: Computer-Aided Design).

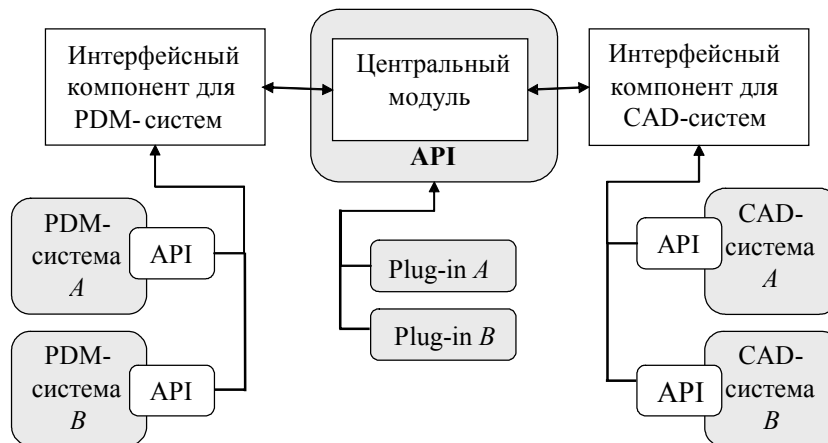
Традиционный подход к построению систем, автоматизирующих взаимодействие PDM- и CAD-систем в машиностроении, представляет собой разработку частного решения для конкретного предприятия, т.е. интеграцию конкретной PDM-системы и конкретной CAD-системы. При этом проблемы, возникающие при интеграции, решаются в каждом случае различными, зачастую новыми, способами. Поскольку такие системы являются, как правило, коммерческими, их конкретная программная реализация обычно скрыта, поэтому провести анализ принимаемых решений не представляется возможным. Кроме того, данному способу взаимодействия присущи такие недостатки, как ограниченность применения разработанного программного обеспечения (поскольку решение специфично для каждой задачи), сложность замены одной из систем в случае необходимости, невозможность использования нескольких систем одновременно, зависимость работоспособности системы в целом от изменения в интерфейсе какой-либо из систем.

Для решения подобных проблем разработан международный стандарт ISO 10303 STEP (англ.: Standard for the Exchange of Product Model Data — стандарт обмена данными о модели изделия; русскоязычная версия — ГОСТ Р ИСО 10303 [1]), призванный определить единый

способ обмена информацией между всеми системами, содержащими данные об изделии [2]. Это позволит автоматизировать, в том числе, и взаимодействие любых PDM- и CAD-систем без дополнительных интегрирующих программ. Стандарт определяет форму представления данных в виде текстового обменного файла, имеющего строго регламентированную структуру и используемого для передачи данных между различными автоматизированными системами проектирования.

Однако в настоящее время существуют сложности в применении стандарта. Во-первых, несмотря на то что стандарт был введен около 10 лет назад, он еще не всеми CAD- и PDM-системами поддерживается. Во-вторых, реализации стандарта для разных систем различаются, и, как следствие, корректно из системы в систему переносится только информация о составе изделия. Так, например, при проведении экспериментов с PDM-системой Step Suite и CAD-системами SolidWorks и PRO/E данные о размерах и параметрах деталей не передавались, а попытка переноса данных приводила к полной потере информации о детали. Таким образом, ограниченные возможности реализации взаимодействия PDM- и CAD-систем не позволяют оперировать всеми атрибутами изделия.

В настоящей статье предлагается решение этой проблемы в рамках разработки альтернативного унифицированного подхода к интеграции PDM- и CAD-систем [3]. Предлагаемый подход позволяет сделать взаимодействие PDM- и CAD-систем единообразным и легко расширяемым. Общая схема архитектуры программного комплекса, реализующего данный подход, приведена на рисунке.



Программный комплекс представляет собой систему взаимодействия нескольких (A, B, \dots) CAD- и PDM-систем через интерфейсные компоненты и центральный модуль.

Центральный модуль является ответственным за взаимодействие систем и предоставляет единый программный интерфейс API (англ.: Application Programming Interface — интерфейс прикладного программирования) для CAD-систем, PDM-систем, систем для расчета параметров изделий, а также различных модулей расширения.

Поскольку стандарт STEP создавался именно для унификации взаимодействия между системами автоматизации и поддержки производства, было принято решение положить его в основу унифицированного подхода. Стандарт содержит спецификацию стандартизованного интерфейса доступа к данным (SDAI — англ.: Standard Data Access Interface — стандартный интерфейс доступа к данным). Эта спецификация представляет собой набор функций для языков C и C++, обеспечивающих доступ к объектам в базе данных или текстовом файле. Этот интерфейс и определяет интерфейс центрального модуля.

Интерфейсные компоненты. Для работы с API центрального модуля CAD- и PDM-системам достаточно поддерживать стандарт STEP. В случаях когда система полностью или частично не поддерживает стандарт, ее можно подключить через интерфейсный компонент, используя API системы.

Интерфейсные компоненты должны реализовывать следующие функции:

- организацию взаимодействия с одной или несколькими PDM- или CAD-системами;
- локализацию информации об особенностях конкретной системы;
- поддержку API центрального модуля.

Интерфейсные компоненты могут разрабатываться или расширяться по мере необходимости подключения новых систем к программному комплексу на основе API CAD- или PDM-системы и API центрального модуля.

Модули расширения. Модулем расширения (англ.: plug-in) может быть любая вспомогательная программа, которая должна иметь доступ к данным, хранящимся в PDM- или CAD-системе. Для работы с этими данными такая программа должна поддерживать единый интерфейс центрального модуля, что позволит получить для обработки необходимые данные и загрузить обратно результаты работы программы. Модули расширения могут добавляться в комплекс по мере необходимости.

На основе изложенных принципов автором настоящей статьи осуществляется разработка программного комплекса StepCAD в среде Microsoft Visual C++ 6.0. К настоящему моменту разработан интерфейсный компонент для PDM Step Suite [4]. В качестве основы интерфейсного компонента для CAD-систем в состав комплекса включена библиотека GSCADLink [5], поддерживающая работу с CAD-системами SolidWorks, PRO/E, SolidEdge, Unigraphics, Inventor, Компас 3D, AutoCAD, PCAD и CATIA. Ведется работа по преобразованию интерфейса GSCADLink в интерфейс центрального модуля.

Тестирование и отладка программного комплекса проводились на примере взаимодействия PDM Step Suite, CAD SolidWorks и PRO/E.

Итоги опытной эксплуатации прототипа программного комплекса с предложенной архитектурой позволяют говорить о следующих достоинствах рассматриваемого метода:

- высокой степени универсальности предлагаемого подхода, возможности его применения для решения многих задач;
- простоте расширения программного комплекса путем дополнения его другими PDM- и CAD-системами, а также модулями расширения; при этом изменения, вносимые в центральный модуль для поддержки новых систем, минимальны;
- унификации взаимодействия с PDM- и CAD-системами;
- относительной независимости центрального модуля от изменений, вносимых в API PDM-систем или CAD-систем; как результат, представленная архитектура является экономически выгодной: добавление новых систем производится по уже имеющемуся „образцу“, а внедрение и поддержка программного комплекса — по аналогичным сценариям.

Кроме того, предложенное решение позволяет существенно расширить возможности стандарта по взаимодействию PDM- и CAD-систем: например, позволяет определять ключевые характеристики изделий (массу, размеры, авторство) независимо от исходной системы и корректно их обрабатывать. Так, был проведен тест для изделия, импортированного в PDM-систему, размеры которого затем изменялись, и проводился экспорт в CAD-систему. Размеры модели в CAD-системе соответственно изменялись. Имя автора изделия также корректно интерпретировалось при всех преобразованиях.

Поскольку предложенная архитектура позволяет не только экспортировать информацию об изделии, но и сопровождать ее всем необходимым, был предложен, реализован и опробован подход, при котором исходный файл модели в формате CAD-системы хранится в качестве документа в PDM-системе. При таком подходе изменения файла контролируются PDM-системой, а сам файл неразрывно связан с описанием изделия в этой системе. Такой способ организации информации весьма удобен при работе и частом обращении к обеим системам.

Кроме того, архитектура комплекса позволяет оптимизировать работу PDM-системы. Так, например, файл в формате CAD-системы было решено хранить только единожды, используя лишь ссылки на него. Это стало возможным благодаря тому, что центральный модуль имеет доступ к гораздо большему объему информации об изделии, чем обменный файл.

Наряду с преимуществами предлагаемого подхода, были выявлены и следующие проблемы:

— сложность обработки требований: поскольку внедрение программного комплекса предполагается на нескольких предприятиях, то сбор и обработка требований, предъявляемых разными заказчиками, представляет собой достаточно сложную задачу по сведению этих требований в единую систему;

— сложность интерпретации данных, полученных в результате выгрузки или синхронизации информации: поскольку предлагаемая схема интеграции предполагает использование различных PDM- и CAD-систем, то необходимо обеспечить корректную передачу данных из одной системы в другую, что достигается сложной системой конфигурации.

Несмотря на имеющиеся проблемы, реализация предложенного унифицированного подхода на основе разработанного программного комплекса позволяет обеспечить повышение эффективности управления производственным процессом в машиностроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 10303. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. М.: Госстандарт России. 2000.
2. *Mason H.* ISO 10303 – STEP. A key standard for the global market // ISO Bulletin. Apr., 2002. P. 9—13.
3. *Голицына Т. Д.* Проблемы интеграции PDM- и CAD-систем. Унифицированный подход // Исследования в области информационных технологий. Труды молодых ученых: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. Вып. 39. С. 164—168.
4. PDM Step Suite. Техническое описание [Электронный ресурс]: <http://pss.cals.ru/DOC/PSS_TD_2_1.pdf>.
5. GSCADLink. Описание [Электронный ресурс]: <<http://glosys.ru/products/cad/GSCADLink.htm>>.

Сведения об авторе

Татьяна Дмитриевна Голицына — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: tdg@inbox.ru

Рекомендована кафедрой
информатики
и прикладной математики

Поступила в редакцию
27.05.08 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.376

В. Л. Козлов

СПЕКТРОАНАЛИЗАТОР ДОПЛЕРОВСКИХ СИГНАЛОВ

Рассматриваются вопросы построения системы спектрального анализа доплеровских локационных сигналов оптического диапазона, обеспечивающей минимальное время анализа и высокую чувствительность. При обработке сигналов с малым отношением сигнал/шум для повышения помехоустойчивости спектроанализатора применяется блок ограничения ложных срабатываний, позволяющий существенно снизить вероятность ложной тревоги при сохранении вероятности правильного обнаружения.

Ключевые слова: спектроанализатор, девиация частоты, делитель частоты, автоподстройка.

В настоящее время область применения лазерных доплеровских измерителей существенно расширилась. Специфика таких измерителей обусловлена использованием в них лазерных источников излучения, обладающих высокой спектральной яркостью, монохроматичностью, пространственной и временной когерентностью. Благодаря этому в лазерных системах можно формировать узкие диаграммы направленности и осуществлять спектральную и пространственную селекцию. Существенные доплеровские сдвиги частоты отраженного оптического излучения позволяют эффективно разделять объекты по скорости их движения, что весьма ценно при обнаружении сигналов на фоне интенсивных помех и измерении параметров движения медленно перемещающихся объектов.

При построении системы спектрального анализа доплеровских локационных сигналов оптического диапазона с неизвестной несущей частотой и случайным временем появления сигнала целесообразно применение методов согласованной фильтрации, позволяющих минимизировать время проведения анализа и обеспечивающих при этом максимально достижимую чувствительность.

При решении ряда прикладных задач время обнаружения доплеровского сигнала и измерения его параметров должно составлять примерно 200—300 мкс. Для этой цели возможно использование параллельного метода согласованной фильтрации, основанного на преобразовании входного сигнала с помощью смесителя и управляемого генератора в линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал с последующей обработкой его набором согласованных фильтров [1]. Однако обеспечение высокого разрешения по частоте при технической реализации этого метода затруднено вследствие необходимости применения большого числа параллельных каналов. Более эффективным является не параллельный, а последовательный метод [2], при использовании которого девиация частоты генератора превышает полосу частот согласованного фильтра и соответственно увеличивается время анализа доплеровского сигнала, но при этом обработка выходного сигнала смесителя осуществляется одним согласо-

ваным фильтром, что упрощает схемотехническое решение спектроанализатора при сохранении пороговой чувствительности и разрешения по частоте. Техническая реализация этого метода спектрального анализа описана в работе [3]. При использовании такого спектроанализатора для увеличения вероятности правильного обнаружения доплеровского сигнала необходимо снизить порог принятия решения о наличии сигнала на выходе согласованного фильтра. Однако это, в свою очередь, приводит к возрастанию частоты появления ложных тревог. Поэтому в спектроанализаторе необходимо использовать блок ограничения ложных срабатываний, что позволит снизить вероятность ложной тревоги. Кроме того, для обеспечения предельной чувствительности требуется стабилизация параметров генератора ЛЧМ-сигнала.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы, реализующей последовательный метод спектрального анализа с использованием блока ограничения ложных срабатываний и генератора ЛЧМ-сигнала с автоподстройкой по методу цифрового преобразования. На рис. 1 приняты следующие обозначения: ИНД — индикатор; Д — детектор; У — усилитель; СФ — согласованный фильтр; УМ — усилитель мощности; С — смеситель; АРУ — блок автоматической регулировки усиления; К — компаратор; КМ — коммутатор; УХК — устройство хранения кодов; ГЛЧМС — генератор ЛЧМ-сигнала; БОЛС — блок ограничения ложных срабатываний; А — анализатор; ОЗУ — оперативное запоминающее устройство; Сч — счетчик; УОЗУ — управление ОЗУ.

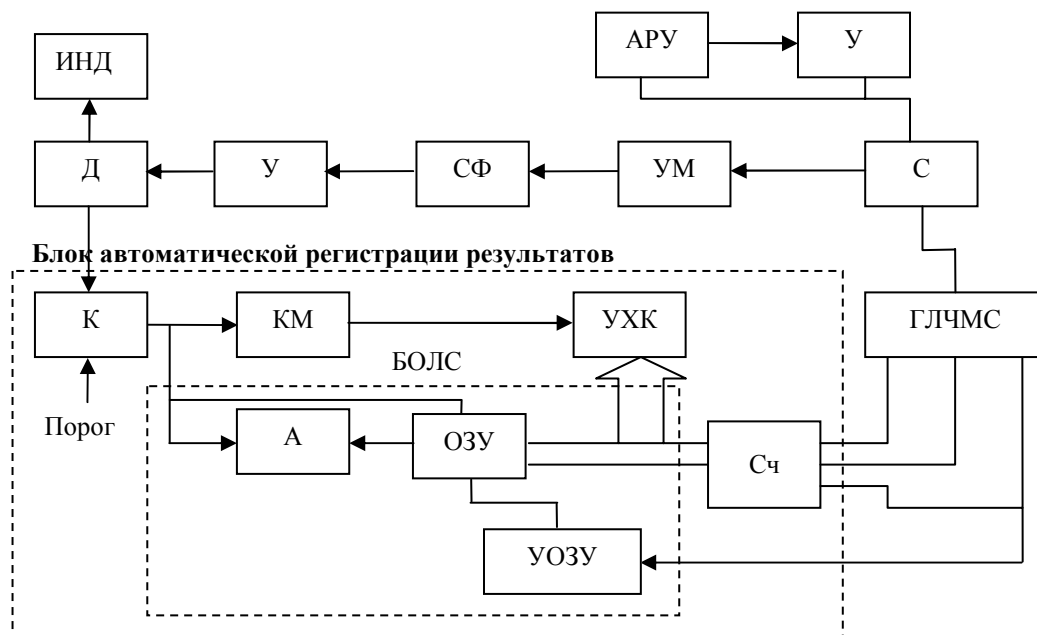


Рис. 1

Последовательный метод спектрального анализа основан на определении временного положения отклика сигнала на выходе согласованного фильтра, которое зависит от частоты входного сигнала. Покажем, как связано время появления сигнала на выходе согласованного фильтра с входной частотой. Пусть входной сигнал имеет комплексную амплитуду $U_0(t)e^{-j2\pi ft}$ на интервале $-T/2 < t < T/2$, где f — измеряемая частота. В смесителе происходит перемножение входной частоты и ЛЧМ-сигнала $U_{\text{ЛЧМ}} = U_0 e^{j\beta t^2}$, колебания которого линейно модулированы по частоте. Спектральная плотность результирующего сигнала определяется выражением

$$g(f) = \int_{-T/2}^{T/2} U(t)e^{j(\beta t^2 - 2\pi f t)} dt. \quad (1)$$

Введем масштабный временной коэффициент θ , связывающий частоту f входного сигнала и скорость перестройки частоты β гетеродина:

$$\theta = \pi f / \beta. \quad (2)$$

Используя (2), преобразуем выражение (1) к виду

$$g(\theta) = e^{-j\beta\theta^2} \int_{-T/2}^{T/2} U(t)e^{j\beta(t-\theta)^2} dt. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что зависимость спектральной плотности сигнала на выходе смесителя от входной частоты сводится к зависимости комплексной амплитуды колебаний от временного параметра θ . Известно [2], что амплитуда сигнала на выходе оптимального фильтра, согласованного с ЛЧМ-сигналом, равна

$$w(t) = 0,5e^{-j2\pi f_0 t_0} \int_{-T/2}^{T/2} g(s)g^*(s - \Delta t)ds,$$

где f_0 — средняя частота согласованного фильтра; t_0 — временное положение максимального значения отклика на выходе согласованного фильтра относительно начала ЛЧМ-импульса; $\Delta t = t - t_0$; g^* — частотная характеристика согласованного фильтра, комплексно-сопряженная со спектральной плотностью ЛЧМ-сигнала.

Используя уравнение (3), получаем

$$w(t) = \left[0,5U^2\tau_{\text{и}}e^{-j(2\pi f_0 t_0 + \beta\theta)^2} \right] \frac{\sin[\pi\Delta f(\Delta t - \theta)]}{\pi\Delta f(\Delta t - \theta)}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{и}}$, Δf — длительность импульса и девиация частоты согласованного фильтра; первый и второй множители в этой формуле характеризуют соответственно амплитудно-частотный и фазочастотный спектры на выходе согласованного фильтра; формула (4) справедлива при $\tau_{\text{и}}\Delta f \gg 1$.

Из уравнения (4) следует, что в зависимости от величины временного параметра θ , значение которого в выражении (2) определяется входной частотой, будет изменяться временное положение отклика на выходе согласованного фильтра. Измеряя величину θ , находим частоту входного сигнала

$$f = \beta\theta/\pi.$$

Диапазон перестройки частоты генератора ЛЧМ-сигнала выбирается таким, чтобы любой сигнал с частотой, находящейся в полосе анализа, после преобразования полностью попадал в полосу согласованного фильтра. Разрешение по частоте спектроанализатора определяется обратным значением длительности $\tau_{\text{и}}$ импульса согласованного фильтра ($1/\tau_{\text{и}}$), а полоса анализа — разностью полосы частот перестройки генератора и полосы частот согласованного фильтра. Радиоимпульс (4) с выхода согласованного фильтра усиливается, детектируется и поступает на монитор, где можно визуально наблюдать спектр входного сигнала. Для достижения большого динамического диапазона входных сигналов использовался малошумящий усилитель с быстродействующей системой АРУ [4], позволяющий установить динамический диапазон регулировки усиления до 110 дБ и обеспечивающий подавление собственных шумов усилителя.

Автоподстройка частоты по методу цифрового преобразования применяется, когда за один период измерения, равный $f_{\text{оп}}^{-1}$, приращение фазы ЛЧМ-сигнала по сравнению с предыдущим измерением составляет 2π . При этом частота опорного сигнала выбирается исходя из условия $f_{\text{оп}} = (W/T')^{1/2}$, где W — девиация частоты, T' — длительность ЛЧМ-сигнала. Управление коэффициентом деления делителя D_3 осуществляется таким образом, чтобы с каждым периодом измерения значение коэффициента изменялось на единицу. Тогда при отсутствии отклонения частоты от линейного закона модуляции последовательность импульсов на выходе D_3 будет строго равномерной с частотой $f_{\text{оп}}$, а сигнал на выходе ИФД не будет изменяться во времени. При наличии отклонений от линейности на выходе ИФД формируется сигнал рассогласования, устраняющий возникшие отклонения фазы генерируемого ЛЧМ-сигнала. Для синхронизации работ всех узлов генератора ЛЧМ-сигнала частота кварцевого генератора и коэффициенты деления K_1 , K_2 делителей D_1 , D_2 соответственно выбираются таким образом, чтобы выполнялись условия $f_{\text{кГ}} / K_2 = f_{\text{оп}}$ и $K_1 = mK_2$, где m — целое число.

Для повышения точности воспроизведения закона модуляции можно использовать методику, изложенную в работе [6].

Преимуществом разработанного генератора с линейной частотной модуляцией является более высокая точность воспроизведения линейного закона модуляции. Генератор позволяет в широких пределах варьировать параметры формируемого ЛЧМ-сигнала путем соответствующего выбора опорной частоты и коэффициентов деления делителей в цепи автоподстройки.

Основные характеристики описанного спектроанализатора определяются, главным образом, параметрами согласованного фильтра. При использовании согласованного фильтра с полосой частот 10 МГц и длительностью импульса 50 мкс спектроанализатор обладает пороговой чувствительностью, приведенной ко входу, 0,3 мкВ, разрешением по частоте 10 кГц при периоде анализа 150 мкс (при полосе анализа сигналов 20 МГц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1974. С. 78.
2. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1994. С. 63.
3. Козлов В. Л., Фираго В. А., Шилов А. Ф. Быстрый последовательный спектроанализатор доплеровских сигналов // Лазерная и оптико-электронная техника: Сб. Минск: Университетское, 1989. С. 202—207.
4. Фираго В. А., Козлов В. Л., Шилов А. Ф. Широкополосный усилитель с быстродействующей автоматической регулировкой усиления // ПТЭ. 1986. № 2. С. 116—117.
5. Фираго В. А., Козлов В. Л., Коростик К. Н., Карик Е. Д. Генератор линейно-частотно-модулированных сигналов с автоподстройкой параметров // Там же. 1990. № 3. С. 91—94.
6. А.с. 1631698 СССР. Генератор с линейной частотной модуляцией / В. Л. Козлов, В. А. Фираго, А. Ф. Шилов // Б.И. 1991. № 8.

Сведения об авторе

Владимир Леонидович Козлов

— аспирант, Белорусский государственный университет, кафедра квантовой радиофизики и оптоэлектроники, Минск;
E-mail: KozlovVL@bsu.by

Рекомендована кафедрой
квантовой радиофизики
и оптоэлектроники

Поступила в редакцию
11.02.08 г.

Г. М. МИХЕЕВ, Р. Г. ЗОНОВ, А. Н. ОБРАЗЦОВ, В. М. СТЯПШИН

ВЛИЯНИЕ ПРОЗРАЧНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИГНАЛ В НАНОГРАФИТНЫХ ПЛЕНКАХ

Приведены результаты исследования влияния прозрачного покрытия нанографитной пленки на амплитуду оптоэлектрического сигнала, возникающего в пленке при ее облучении лазерными импульсами наносекундной длительности. Показано, что при нанесении покрытия существенно изменяется зависимость амплитуды сигнала от угла падения луча лазера на поверхность пленки, что может быть использовано для модернизации датчика пространственного положения объекта, изготовленного из нанографитной пленки.

Ключевые слова: нанографитные пленки, оптоэлектрический сигнал, термическое напыление.

Известно, что наноструктурированные материалы представляют интерес не только для фундаментальных исследований, но и для решения различных прикладных задач. С учетом возможности практического применения особого внимания заслуживает исследование наноуглеродных материалов, которые могут иметь форму нанотрубок, фуллеренов, луковиц, графенов и т.д. В частности, углеродные нанотрубки и нанографитные пленки можно использовать для изготовления низковольтных холодных катодов [1, 2]. На основе результатов исследований оптоэлектрических свойств этих материалов созданы уникальные оптоэлектронные устройства, состоящие из одиночных одностенных углеродных нанотрубок [3—5]. Такие устройства весьма чувствительны к изменению длины волны и поляризации электромагнитного излучения (временной отклик находится в миллисекундном диапазоне).

В работах [6—8] было установлено, что при облучении нанографитных пленок лазерным излучением наносекундной длительности в них возникает импульс электрического напряжения, повторяющий форму лазерного импульса. При этом амплитуда оптоэлектрического сигнала существенно зависит от поляризации излучения и пространственной ориентации нанографитной пленки относительно падающего луча света, кроме того, амплитуда линейно возрастает с увеличением мощности (а не плотности мощности) излучения лазера. Полученные результаты объясняются эффектом оптического выпрямления нелинейности второго порядка [6] и позволяют создать быстродействующий фотоприемник, работающий в широком спектральном диапазоне [9]. Такой фотоприемник можно использовать для создания датчика пространственного положения объекта [10]. При p -поляризованном излучении датчик может работать в диапазоне углов падения α луча на пленку от $\alpha_{\min} = -45^\circ$ до $\alpha_{\max} = 45^\circ$, что обусловлено характерной зависимостью амплитуды U оптоэлектрического сигнала от угла α . Для улучшения характеристик датчика пространственного положения объекта, изготовленного из нанографитной пленки, предлагается расширить диапазон рабочих углов $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$, в пределах которого происходит монотонное возрастание амплитуды оптоэлектрического сигнала, — именно эта проблема и является предметом исследования в настоящей статье.

На рис. 1, a приведена схема [6], отражающая эксперимент по наблюдению оптоэлектрического сигнала в нанографитных пленках. Нанографитная пленка 1, выращенная на подложке 2 из кремния, с помощью двух параллельных электродов 3 и 4 прикрепляется на диэлектрическом держателе 5. Электроды подсоединяются ко входу широкополосного осциллографа. При облучении поверхности пленки импульсом наносекундной длительности p -поляризованного излучения лазера между электродами возникает импульс электрического

напряжения, форма которого повторяет форму лазерного импульса. Экспериментальная зависимость U от α описывается следующей формулой:

$$U/U_0 \approx \sin 2\alpha, \quad (1)$$

где U_0 — максимальное значение амплитуды сигнала.

В интервале $|\alpha| \leq \alpha_{\max}$, где $\alpha_{\max} = 45^\circ$, по измеренному значению U можно определить угол падения. В диапазоне углов $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ наблюдается неоднозначность, так как одному и тому же значению U соответствуют два разных значения α . В связи с этим представляет интерес увеличение значения α_{\max} .

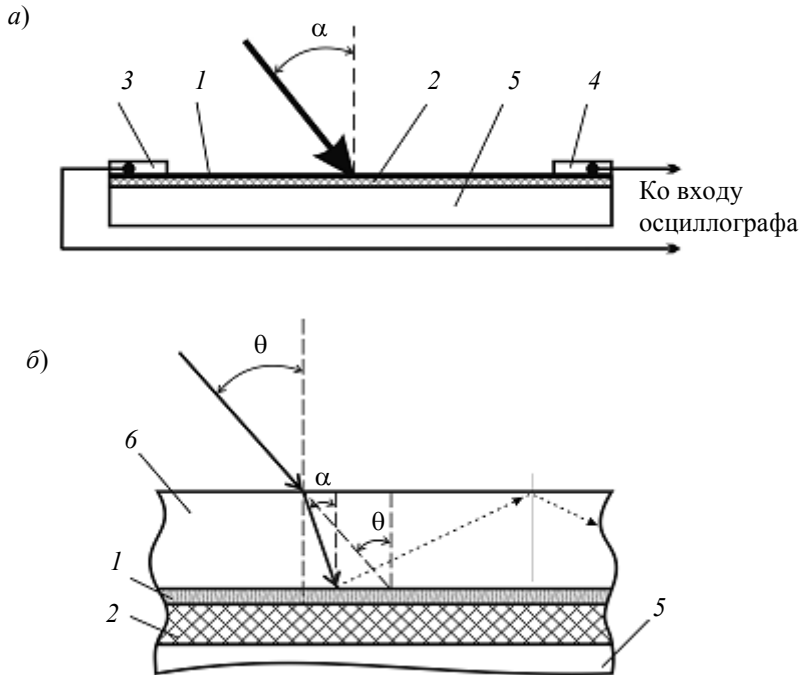


Рис. 1

Зависимость (1) определяется природой оптоэлектрического эффекта в нанографитных пленках. Однако она может быть несколько изменена, если ввести дополнительную зависимость угла падения α луча на нанографитную пленку от другого угла θ , характеризующего наклон плоскости фотоприемника относительно падающего пучка лазера. На практике это можно осуществить, если нанографитную пленку покрыть тонким слоем прозрачной жидкости.

Представим, что нанографитная пленка 1 покрыта слоем смачивающей прозрачной жидкости 6 (рис. 1, б). Тогда луч, падающий на поверхность жидкости под углом θ , после преломления на границе раздела сред воздух — жидкость падает на поверхность нанографитной пленки под углом α . Эти углы связаны соотношением

$$\sin \theta / \sin \alpha = n, \quad (2)$$

где n — показатель преломления прозрачной жидкости относительно воздуха.

Следовательно,

$$\alpha = \arcsin(\sin \theta / n), \quad (3)$$

и для всех углов θ будет выполняться неравенство $\alpha < \theta$. Необходимо иметь в виду, что на границе раздела сред прозрачная жидкость — нанографитная пленка будет происходить дополнительное преломление луча, однако, для простоты, этим преломлением будем пренебрегать. Тогда рассчитанная зависимость $\alpha(\theta)$ при $n = 1,38$ (этиловый спирт) будет иметь вид, представленный на рис. 2. В этом случае при изменении угла θ от -90 до 90° угол α изменится в пределах от $-46,4$ до $46,4^\circ$. С учетом этого рассчитанная зависимость (1) с аргументом α , определяемым выражением (3), будет иметь вид кривой 1 , показанной на рис. 3. В соответ-

ствии с этой кривой при $|\theta| > 70^\circ$ амплитуда сигнала U/U_0 практически не зависит от θ . Однако при построении кривой 1 не учитывалось изменение коэффициента отражения света от жидкости при изменении угла θ .

Для p -поляризованного излучения света коэффициент отражения от прозрачной поверхности задается выражением [11]

$$R_p = \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta - \alpha)}{\operatorname{tg}(\theta + \alpha)} \right]^2. \tag{4}$$

Отсюда следует, что мощность P_α лазерного излучения, падающего на нанографитную пленку под углом α , будет определяться как

$$P_\alpha = (1 - R_p)P_0, \tag{5}$$

где P_0 — мощность лазерного излучения, падающего на поверхность прозрачной жидкости.

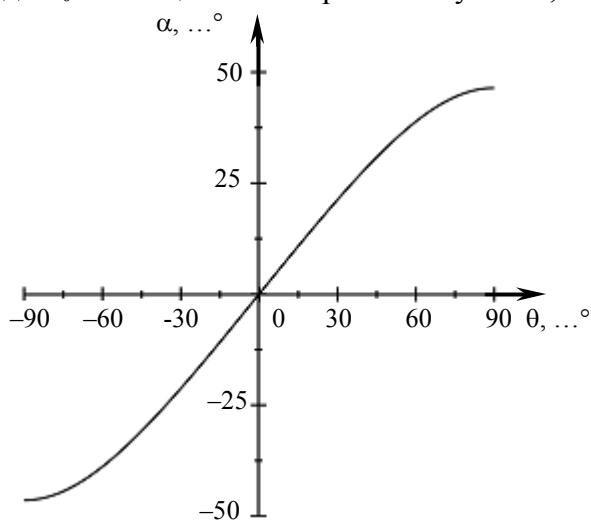


Рис. 2

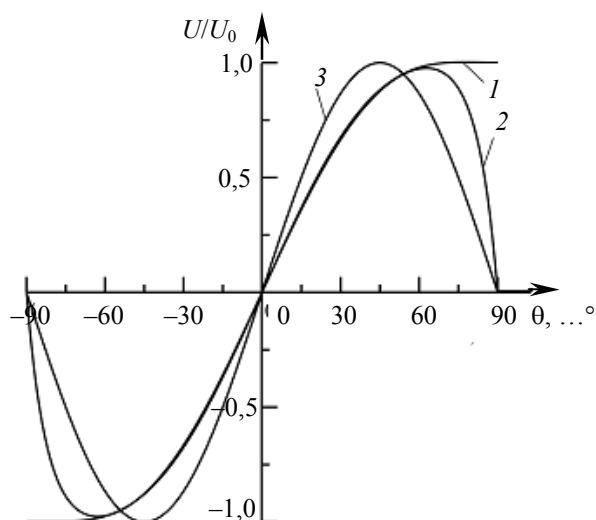


Рис. 3

Согласно экспериментам, описанным в работах [6, 7], амплитуда оптоэлектрического сигнала U прямо пропорциональна мощности P_α . Следовательно, с учетом соотношений (1) — (5) можно построить зависимость U/U_0 от θ (см. рис. 3, кривая 2), показывающую, что монотонное возрастание величины U/U_0 наблюдается при $|\theta| \leq 62,8^\circ$. Этот диапазон углов монотонного возрастания сигнала примерно на 36° больше, чем для кривой 3 (см. рис. 3), построенной по формуле (1). Необходимо отметить, что при построении кривой 2 не учитывалось переотражение света на границе раздела сред жидкость — нанографитная пленка.

Таким образом, можно предположить, что применение жидкости, смачивающей нанографитную пленку, позволит увеличить диапазон углов отклонения фотоприемника, при котором наблюдается монотонное возрастание оптоэлектрического сигнала.

При проведении экспериментов исследовалась амплитуда оптоэлектрического сигнала U в нанографитных пленках с покрытием из прозрачной жидкости и без покрытия в зависимости от угла падения θ в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

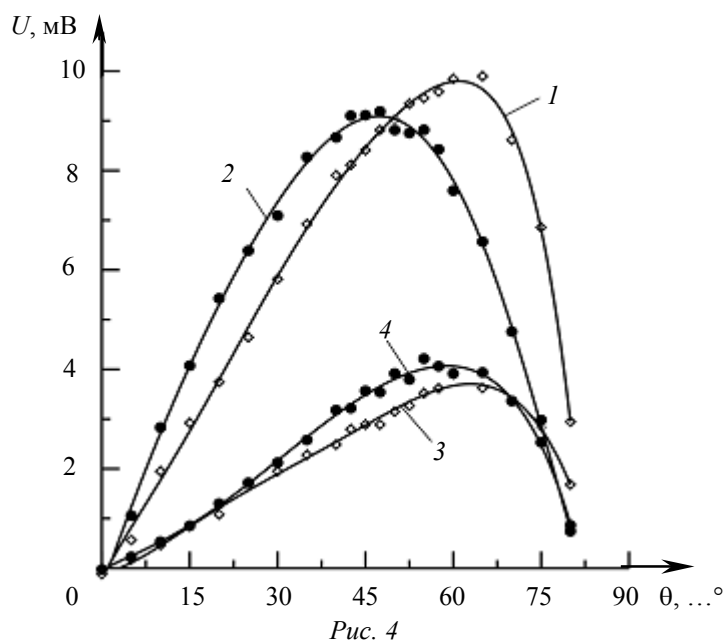
Нанографитные пленки были получены методом плазмохимического осаждения из смеси метана и водорода на установке, описанной в работе [12]. Основными структурными элементами пленок являются пластинчатые кристаллиты, состоящие из нескольких (от 5 до 50) параллельных хорошо упорядоченных атомных слоев графена [13]. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, электронной и рентгеновской дифракции, а также электронной микроскопии высокого разрешения атомная структура кристаллитов соответствует хорошо упорядоченному графиту. Толщина таких нанокристаллитов графита составляет от 2 до 20 нм. При этом кристаллиты имеют преимущественную ориентацию атомных слоев

в направлении нормали к поверхности подложки с максимальным отклонением не более $\pm 20^\circ$. Расстояние между отдельными кристаллитами составляет примерно 0,5—1 мкм. Таким образом, пленки имеют ярко выраженную пористую нанокристаллическую структуру. Средняя толщина этих наноуглеродных пленок 2—3 мкм.

Для облучения пленок использовалось p - и s -поляризованное излучение YAG:Nd^{3+} -лазера, работающего в одномодовом режиме. Длительность лазерных импульсов по полувысоте составляла 20 нс, диаметр пучка 2 мм. Для регистрации оптоэлектрического импульса применялись два параллельных полосковых золотых электрода, нанесенные на противоположные стороны пленки методом термического напыления в вакууме. Импульс электрического напряжения, возникающий между этими электродами при облучении поверхности пленки, регистрировался с помощью цифрового осциллографа „Tektronix TDS7704B“ с входным сопротивлением 50 Ом. Нанографитная пленка, прикрепленная к диэлектрическому держателю, фиксировалась с помощью специального приспособления, позволяющего осуществлять плавное изменение угла падения лазерного пучка на пленку. При этом обеспечивалось падение пучка лазера на одно и то же место пленки.

В качестве прозрачных жидкостей для покрытия поверхности нанографитной пленки использовались этиловый спирт и трансформаторное масло. Эксперименты проводились следующим образом. При фиксированных значениях энергии лазерного излучения (около 2 мДж) и угла падения измерялась амплитуда оптоэлектрического сигнала. Далее, с помощью шприца струя жидкости направлялась на верхнюю часть поверхности пленки, и после покрытия жидкостью всей поверхности (что можно наблюдать по характерному изменению цвета нанографитной пленки) производились измерения. За результат измерения принималось усредненное значение амплитуды сигнала, полученное при 30 и более вспышках лазера. При использовании спирта через некоторое время жидкость полностью испарялась с поверхности, и измерения повторялись уже без спирта.

Как показали эксперименты, после покрытия поверхности пленки прозрачной жидкостью амплитуда оптоэлектрического сигнала заметно изменяется, что подтверждается зависимостями, представленными на рис. 4.



Видно, что для p - и s -поляризаций излучения лазера нанесение тонкого слоя этилового спирта на поверхность пленки приводит к специфическому изменению зависимости U от θ . Необходимо отметить, что после самопроизвольного испарения спирта с поверхности нанографитной пленки значения оптоэлектрического сигнала восстанавливались. Максимальные

значения зависимостей, полученных с применением жидкости (см. рис. 4, кривые 1, 3), смещены в область больших значений θ по сравнению с максимумами соответствующих зависимостей, полученных без применения жидкости (кривые 2, 4).

Аналогичные результаты были получены при использовании в качестве смачивающей прозрачной жидкости трансформаторного масла.

Результаты экспериментов хорошо согласуются с результатами предварительного анализа.

Следует пояснить отличие максимума амплитуды оптоэлектрического сигнала при p -поляризации, наблюдаемой при $\theta \approx 65^\circ$ (при покрытии поверхности пленки этиловым спиртом — см. рис. 4, кривая 1), от максимальной амплитуды, полученной при $\theta \approx 45^\circ$ (при чистой поверхности нанографитной пленки — кривая 2). Объяснением этому может быть следующее. При падении луча лазера на шероховатую поверхность пленки в угловом спектре отраженного света присутствуют лучи, которые направляются на поверхность границы раздела сред жидкость — воздух под большими углами (см. рис. 1, б). На этой границе происходит полное внутренне отражение и лучи вновь поступают на нанографитную пленку, способствуя тем самым некоторому увеличению оптоэлектрического сигнала.

Таким образом, как показали эксперименты, прозрачное покрытие, нанесенное на поверхность нанографитной пленки, существенно влияет на амплитуду оптоэлектрического сигнала и приводит к изменению ее зависимости от угла падения луча лазера. Это может быть использовано для улучшения характеристик датчика пространственного положения объекта, изготовленного из нанографитной пленки.

Работа выполнена по государственному контракту № 02.513.11.3048 от 22.03.2007 г. (шифр „2007-3-1.3-07-01-095“).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Образцов А. Н., Павловский И. Ю., Волков А. П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 89—95.
2. Cui J. B., Robertson J., Milne W. I. Field emission site densities of nanostructured carbon films deposited by a cathodic arc // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. P. 5707—5711.
3. Freitag M., Martin Y., Misewich J. A. et al. Photoconductivity of single carbon nanotubes // Nano Lett. 2003. Vol. 3, N 8. P. 1067—1071.
4. Freitag M., Perebeinos V., Chen J. et al. Hot carrier electroluminescence from a single carbon nanotube // Nano Lett. 2004. Vol. 4. N 6. P. 1063—1066.
5. Freitag M., Chen J., Tersoff J. et al. Mobile ambipolar domain in carbon-nanotube infrared emitters // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93. N 076803.
6. Mikheev G. M., Zonov R. G., Obratsov A. N., Svirko Yu. P. Giant optical rectification effect in nanocarbon films // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84, N 24. P. 4854—4856.
7. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н., Сvirko Ю. П. Оптическое выпрямление в углеродных нанопленках // ЖЭТФ. 2004. Т. 126, № 5. С. 1083—1088.
8. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н. Генерация наносекундных электрических импульсов при лазерном облучении нанографитных пленок // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 9. С. 33—37.
9. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н. и др. Быстродействующий фотоприемник мощного лазерного излучения на основе нанографитной пленки // ПТЭ. 2005. № 3. С. 84—89.
10. Зонов Р. Г., Михеев Г. М., Образцов А. Н. Датчик пространственного положения из нанографитной пленки // Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике: Тр. Харьковской нанотехнологической ассамблеи. 2006. Т. 2. С. 352—356.
11. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.

12. Павловский И. Ю., Образцов А. Н. Автоматизированная установка для газофазного осаждения алмазных пленок в разряде постоянного тока // ПТЭ. 1998. № 1. С. 152—156.
13. Образцов А. Н., Павловский И. Ю., Волков А. П. Автоэлектронная эмиссия в графитоподобных пленках // ЖТФ. 2001. Т. 71. С. 89—95.

Сведения об авторах

- Геннадий Михайлович Михеев** — д-р физ.-мат. наук; Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; E-mail: mikheev@udman.ru
- Руслан Геннадьевич Зонов** — канд. физ.-мат. наук; Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; E-mail: ZNV@udman.ru
- Александр Николаевич Образцов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, кафедра кристаллографии; E-mail: obraz@polly.phys.msu.ru
- Василий Михайлович Стяпшин** — Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; лаборант

Рекомендована
Институтом прикладной механики
УрО РАН

Поступила в редакцию
17.10.07 г.

УДК 621.397.681.772.7.535

В. Д. Смирнов, И. Д. Егельский, А. Е. Бендюговский

**ФОТОРЕГИСТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ
ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ**

Рассматриваются структура и особенности фоторегистрирующего комплекса, предназначенного для обслуживания метеорологической аппаратуры третьего поколения. Проведен теоретический анализ условий достижения возможных величин предельного разрешения и энергетической эффективности фоторегистрирующих устройств.

Ключевые слова: фоторегистрирующие устройства, чувствительность, контраст, поле зрения, оптическая система.

Появление космических метеорологических средств наблюдения поставило перед отечественной промышленностью ряд проблемных задач по созданию фоторегистрирующей аппаратуры. В частности, к таким задачам можно отнести разработку

- высокоразрешающей аппаратуры наблюдения;
- средств передачи информации на большие расстояния;
- высокоразрешающей аппаратуры для воспроизведения полученной информации.

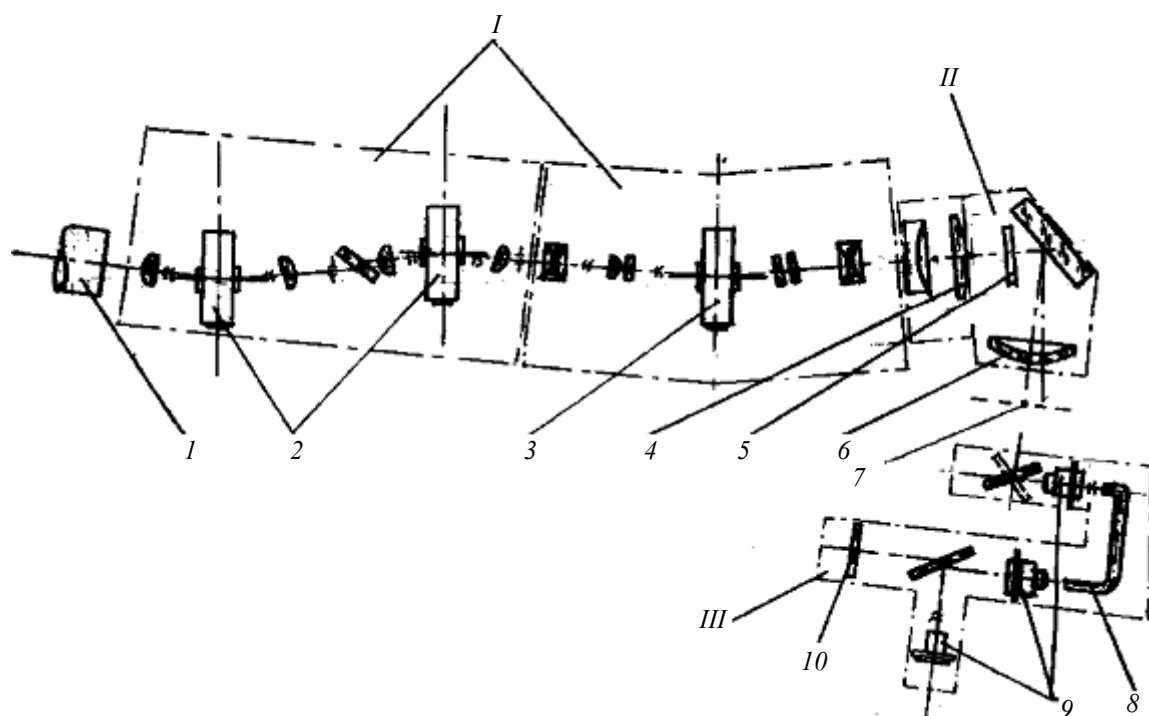
Последний из указанных видов технических средств (вариант такой аппаратуры был использован в бортовом фототелевизионном комплексе „Луна-3“ [1], разработанном в НИИ телевидения, Санкт-Петербург, и успешно осуществившем фотографирование обратной стороны Луны) в настоящее время выделился в отдельный класс прецизионных приборов. Теория и принципы работы этих приборов довольно сложны и в силу их специфики недостаточно освещены в технической литературе.

Первые комплексы устройств для воспроизведения получаемой информации (в частности, фоторегистрирующая аппаратура „Метеор“, разработанная в НИИ телевидения) включали в качестве обязательного элемента прецизионные электронно-лучевые трубки с „бегающим“

лучом [1—3]. Возрастающие требования к увеличению разрешающей способности системы, а также увеличению размеров поля зрения послужили основанием для создания более универсальной аппаратуры — аппаратуры третьего поколения. Разработка такой аппаратуры стала возможной только с появлением соответствующей лазерной техники (лазеров, лазерных диодов, лавинных фотодиодов), новых оптико-электронных блоков управления потоком излучения (акустооптических модуляторов, акустооптических дефлекторов и др.) и прецизионных высокоразрешающих оптических систем.

Одним из наиболее современных типов аппаратуры третьего поколения является оригинальный фоторегистрирующий комплекс высокого разрешения, предназначенный для воспроизведения информации космической метеорологической аппаратуры. Комплекс разработан в НИИ телевидения по единому проекту с Японией, США и Францией (аппаратура „Метеорит — Планета“: А. с. 1614122 СССР. Оптико-электронное устройство для воспроизведения информации; приоритет от 05.07.88 г.).

Основные отличия разработанной аппаратуры от аппаратуры первого и второго поколений определяются из структурной принципиальной схемы комплекса, представленной на рисунке, где использованы следующие обозначения: *I* — оптико-электронные блоки управления потоком лазерного излучения; *II* — оптическая система Петцваля с плоским полем и сканирующим зеркалом; *III* — контрольный блок фокусировки лазерного излучения; 1 — лазер; 2 — акустооптические модуляторы; 3 — акустооптический дефлектор; 4 — расширитель лазерного пучка; 5 — пространственный фильтр, согласованный со спектром воспроизводимого малоконтрастного объекта; 6 — объектив плоского поля Петцваля; 7 — кадровое окно; 8 — волоконный жгут; 9 — микрообъективы; 10 — матричный ПЗС.



В блоке *I* (заменяющем трубку „бегущий луч“) использован лазер с оптоэлектронными узлами управления потоком излучения (акустооптическими модулятором и дефлектором). В блоке *II* определяющими узлами являются прецизионная оптическая система дифракционного качества, основой которой служит оригинальный объектив плоского поля, рассчитанный на основе условия Петцваля, и прецизионный блок зеркального сканера, фокусирующий (модулированный видеосигналом) поток в любую точку кадрового окна фоторегистрирующего

комплекса. Блок III осуществляет контроль и автоматическую фокусировку оптической системы на чувствительную поверхность накопителя информации.

Разрешающая способность и энергетическая эффективность разработанного варианта аппаратуры зависит от блоков I и II.

В состав блока I, помимо лазера и оптоэлектронных блоков управления потоком излучения, необходимо включить также расширитель лазерного пучка и все промежуточные оптические элементы. Прецизионная оптическая система (система плоского поля Петцваля) воспринимает монохроматическое излучение первого (лазерного) блока и проецирует это излучение в виде безаберрационной точки на чувствительные поверхности накопителя информации и многоэлементного приемника излучения.

Первый блок должен обеспечивать на выходе монохроматическое излучение лазерного пучка с высокой степенью коллимированности, определяемой из условия:

$$\Delta\alpha = \operatorname{arctg}(d_{\text{эл}}/f'), \quad (1)$$

где $d_{\text{эл}}$ — диаметр чувствительного элемента матричного ПЗС (либо чувствительного элемента накопителя), мм; f' — фокусное расстояние оптической системы Петцваля, мм.

Условие, определяемое выражением (1), может быть реализовано только при выполнении следующих жестких требований:

— тщательной фильтрации лазерного излучения в плоскости его фокусирования (т.е. после прохождения излучения через первую линзу расширителя лазерного пучка);

— обеспечении большого увеличения на достаточно сложном оптическом блоке — расширителе лазерного пучка;

— тщательной сборке и юстировке каждого узла и оптического элемента первого блока.

При выполнении этих условий предельное (безаберрационное) разрешение (N) всей системы в целом может достигнуть величины, определяемой только дифракционными явлениями на входном зрачке системы Петцваля:

$$N = 1/d_{\text{кр}} = \{2,44 \lambda(f'/D)\}^{-1},$$

где $d_{\text{кр}} = 2,44 \lambda(f'/D)$ — диаметр дифракционного кружка рассеяния оптической системы, мм; D — диаметр входного зрачка системы Петцваля, мм.

Энергетическая эффективность аппаратуры находится также в прямой зависимости от эффективности работы блоков I и II. В частности, поскольку основной блок (оптическая система Петцваля) работает в телескопическом ходе лучей, к нему применима теория энергетической эффективности телевизионной аппаратуры, работающей по „бесконечно удаленному“ малоразмерному объекту [4]. Известно [4, 5], что для телескопических систем энергетическая эффективность оптической системы определяется ее коэффициентом усиления

$$K_y = \tau(D^2/d_{\text{кр}}^2), \quad (2)$$

где τ — общий коэффициент пропускания оптической системы.

Анализ выражения (2) позволяет сделать предположение о возможности увеличения энергетической эффективности аппаратуры за счет уменьшения кружка рассеяния или увеличения входного зрачка системы. Действительно, учитывая, что для оптических систем дифракционного качества $d_{\text{кр}} = 2,44 \lambda(f'/D)$, необходимо равенство (2) преобразовать к виду

$$K_y = \tau[D^4/(2,44 \lambda f')^2]. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что коэффициент усиления оптических систем дифракционного качества зависит от диаметра входного зрачка оптической системы Петцваля. Естественно, что увеличение входного зрачка системы возможно только при реализации большого оптического увеличения во входной оптической системе расширителя лазерного пучка в первом

блоке комплекса. При увеличении (в большую сторону) расширителя лазерного пучка резко возрастают aberrации последнего и в результате нарушается исходное условие (1).

Следовательно, энергетическая эффективность разработанной аппаратуры (как и ее разрешение) зависит от диаметра входного зрачка системы Петцваля при обязательном условии выполнения необходимых реальных увеличений на узле расширителя лазерного пучка, входящем в первый блок комплекса аппаратуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цыцулин А. К.* Телевидение и космос. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2003.
2. *Бабенко В. С.* Оптика телевизионных устройств. М.: Энергия, 1964.
3. *Брацлавец П. Ф.* и др. Космическое телевидение. М.: Связь, 1973.
4. *Смирнов В. Д.* Оптические и оптико-электронные системы космического технического зрения для беспилотных летательных аппаратов. СПб.: Изд-во Петербург. ин-та печати, 2006.
5. *Смирнов В. Д.* Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника в полиграфии. СПб.: Изд-во Петербург. ин-та печати, 2000.

Сведения об авторах

- Всеволод Дмитриевич Смирнов* — д-р техн. наук, профессор; НИИ телевидения, Санкт-Петербург;
E-mail: niit@infos.ru
- Иван Денисович Егельский* — НИИ телевидения, Санкт-Петербург; инженер
- Александр Евгеньевич Бендюговский* — канд. техн. наук; НИИ телевидения, Санкт-Петербург

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
12.03.08 г.

НГУЕН КУАНГ ХИЕП, Т. И. ЯКУШЕНКОВА

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предлагается принцип нахождения всех возможных вариантов конструкций двухзеркальных фокусирующих композиций, приводятся обобщенная методика и результаты расчета их конструктивных параметров, рассматривается графический способ одновременного представления результатов расчета многих вариантов и их характеристик.

Ключевые слова: двухзеркальная композиция, коэффициент экранирования.

Введение. При разработке оптических систем различного назначения широко используются двухзеркальные композиции как в качестве самостоятельных систем, так и в составе сложных. В современной литературе [1—3] описываются конструкции и методы расчета известных двухзеркальных объективов Кассегрена, Ричи — Кретьена, Грегори, Шварцшильда и др., а также телескопические системы различного назначения. Однако их использование в новых разработках затруднено вследствие отсутствия данных обо всех возможных конструкциях и описания обобщенного метода их расчета.

Использование двухзеркальных композиций при разработке новых оптических систем — таких как системы адаптивной оптики (центрированные, внеосевые, децентрированные), системы с увеличенным пределом визирования различно удаленных объектов, системы трансформирования лазерного пучка, широкоугольные и панорамные зеркальные и зеркально-линзовые системы — требует анализа большого количества данных. На этом этапе исходный вариант конструкции двухзеркальной композиции достаточно представить со сферическими поверхностями; основные свойства такой конструкции определяются радиусами кривизны зеркал и расстоянием между ними (r_1, r_2, d).

В настоящей статье предлагается принцип нахождения таких фокусирующих двухзеркальных композиций, позволяющий найти все возможные варианты конструкций, приводятся методика и результат их расчета, а также графический способ представления результатов расчета одновременно для многих вариантов.

Принцип построения двухзеркальных композиций. На основе известных в геометрической оптике условий формирования действительного или мнимого изображения по взаимному расположению фокусов в двухкомпонентной системе для описания всех возможных конструкций двухзеркальных композиций предлагается принцип их построения по ходу первого параксиального луча.

Во всех рассматриваемых вариантах положение и фокусное расстояние f'_1 (или радиус кривизны r_1) первого зеркала предлагается считать постоянным. В этом случае положение второго зеркала определяется коэффициентом экранирования, равным отношению высот падения первого параксиального луча на зеркала ($k=h_2/h_1$).

Принцип нахождения всех возможных вариантов двухзеркальных композиций можно продемонстрировать для варианта с удаленным объектом ($s_1=-\infty, \beta_0=0$) на примере, когда первое зеркало вогнутое, а второе зеркало располагается в зоне $0 < k < 1$ (рис. 1). В исходном варианте (вариант 0 на рисунке) второе зеркало плоское, его фокус F_2 находится в бесконечности. При изменении знака и величины радиуса кривизны r_2 второго зеркала, когда его фокус F_2 будет менять свое положение, будут изменяться и значение фокусного расстояния $f'_{\text{экв}}$ эквивалентной системы, и положение самого фокуса $F'_{\text{экв}}$.

Все многообразие двухзеркальных композиций для выбранных значений k и f'_1 можно найти при изменении r_2 , когда фокус F_2 перемещается от $-\infty$ до $+\infty$.

При приближении F_2 к F'_1 плоское зеркало преобразуется в выпуклое, его радиус r_2 уменьшается, эквивалентное фокусное расстояние системы увеличивается и фокус $F'_{\text{экв}}$ системы остается действительным и удаляется по ходу луча от F'_1 . Так формируются объективы типа объектива Кассегрена с радиусами кривизны одного знака (см. рис. 1, вариант 1). При совпадении F_2 с F'_1 система становится афокальной (см. рис. 1, вариант 2; в данной статье не рассматривается). При дальнейшем уменьшении r_2 , когда второе зеркало остается выпуклым, формируются конструкции с мнимым фокусом (вариант 3). В случае когда второе зеркало преобразуется в вогнутое, его передний фокус F_2 перемещается от плоского зеркала до $+\infty$. Так формируются объективы из двух вогнутых зеркал с фокусом эквивалентной системы $F'_{\text{экв}}$, расположенным между зеркалами (вариант 4).

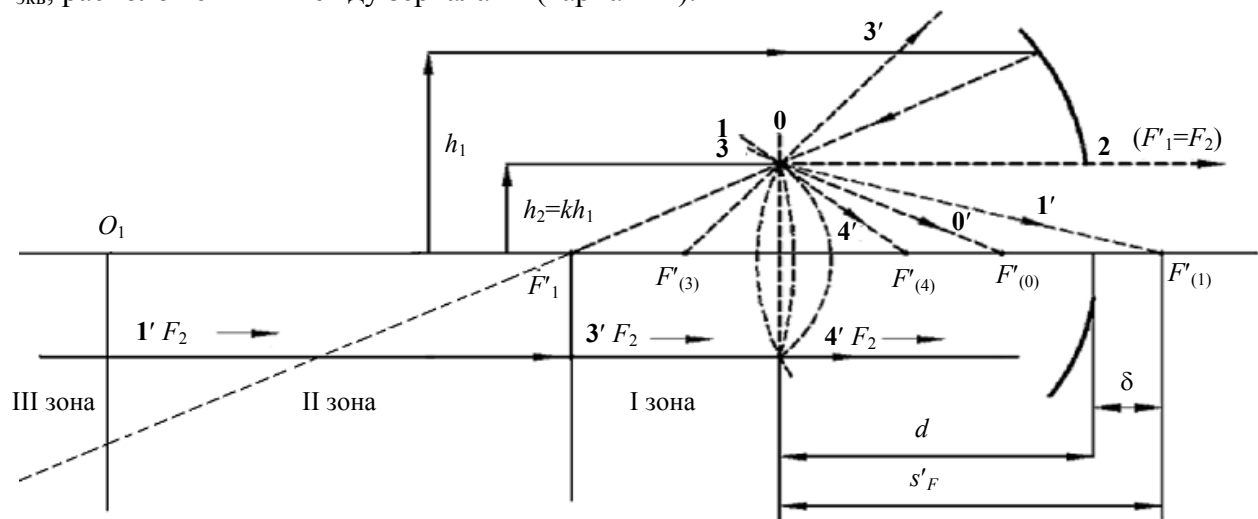


Рис. 1

Таким образом, для выбранных значений k и f'_1 (или радиуса кривизны r_1) первого зеркала были найдены три типа двухзеркальных фокусирующих конструкций: два объектива и компонент с мнимым фокусом. Различные варианты каждого типа могут отличаться значением фокусного расстояния эквивалентной системы и положением эквивалентного фокуса относительно вершины первого зеркала.

Применяя предложенный принцип построения двухзеркальных композиций для различных значений k в каждой характерной зоне (I — III) расположения второго зеркала при постоянном первом можно аналогичным образом найти все возможные варианты конструкций и выделить из них типовые для любого значения k .

Авторами настоящей статьи найдены типовые конструкции двухзеркальных композиций как с первым вогнутым зеркалом, так и с первым выпуклым при различных значениях k и β_0 . Эти типовые конструкции включены в каталог исходных вариантов двухзеркальных композиций.

В качестве примера на рис. 2 представлены 12 типовых конструкций фокусирующих систем (для варианта с удаленным объектом), найденных по предложенной методике в рамках практических ограничений для значения коэффициента экранирования k ($-5 \leq k \leq 5$) и приведенного значения кривизны первого зеркала $f'_{\text{экв}}/r_1$ ($-5 \leq f'_{\text{экв}}/r_1 \leq 5$). При этом не рассматривались следующие частные случаи:

$$f'_{\text{экв}}/r_1 = -0,5, \text{ второе зеркало — плоское;}$$

$$f'_{\text{экв}}/r_1 = 0,5, \text{ увеличение второго зеркала равно } -1.$$

$$k = -1 \text{ и } k = +1, \text{ второе зеркало полностью перекрывает первое зеркало.}$$

Из анализа рис. 2 видно, что среди полученных типовых конструкций имеются как известные (все типы объективов), так и редко встречающиеся, например композиции с мнимым фокусом при $k > 1$ или $-1 < k < 0$.

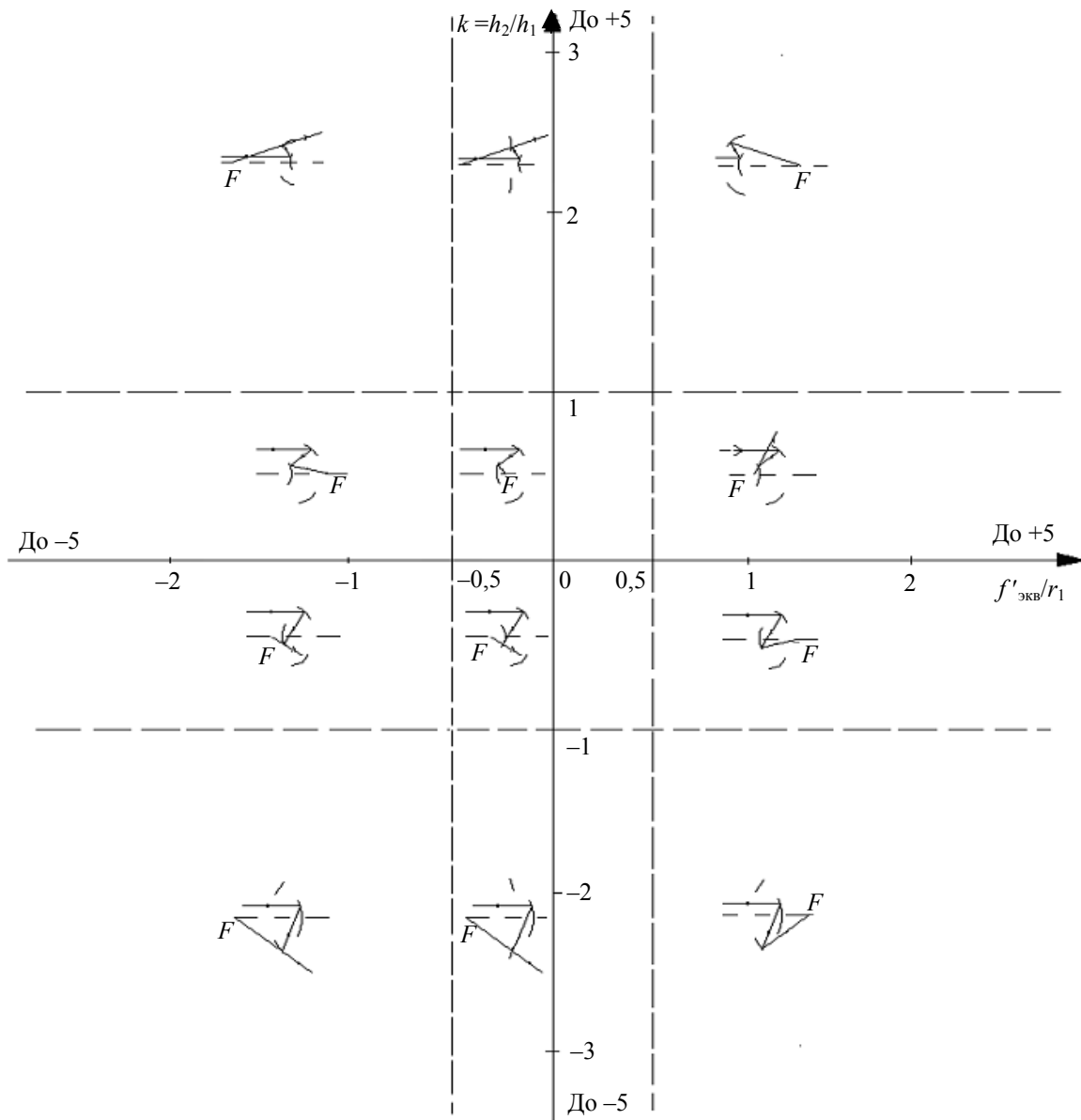


Рис. 2

Для выбора исходных вариантов и сравнения их различных характеристик конструктивные параметры должны быть приведены к единому масштабу, принятому, например, для значений координат параксиальных лучей [1, 2].

Обобщенный метод габаритного расчета двухзеркальных композиций. Задачами габаритного расчета являются не только определение параметров r_1 , r_2 , d всех возможных вариантов конструкций двухзеркальных композиций, но и выделение вариантов с заданными характеристиками.

Габаритный расчет основан на уравнениях параксиальных лучей в условиях принятой нормировки координат этих лучей ($\alpha'_k = +1,0$, $h_1 = +1,0$ и $\beta_1 = +1,0$) [1, 2]. Для расчета следует выбрать исходные данные, отражающие как конструктивные особенности двухзеркальных композиций, так и предложенный принцип их построения, а именно: $f'_{\text{экв}}$, k и δ .

В этом случае приведенные значения конструктивных параметров вычисляются по следующим формулам:

$$r_{1\text{пр}} = \frac{2}{\beta_0 + \alpha_2}; \quad r_{2\text{пр}} = \frac{2k}{\alpha_2 + 1}; \quad d_{\text{пр}} = \delta_{\text{пр}} - k; \quad (1)$$

$$k = \frac{h_2}{h_1}, \quad \alpha_2 = \frac{1-k}{d_{\text{пр}}}.$$

С использованием уравнений параксиальных лучей и уравнения (1) были рассчитаны основные конструктивные параметры двухзеркальных композиций в широком диапазоне изменения k и δ . Результаты этого расчета сведены в таблицы, где для каждого значения k указаны: радиусы кривизны зеркал и расстояние между ними (r_1, r_2, d); передний и задний фокальные отрезки (s_F, s'_F); положение плоскости изображения (s'); удаление плоскости изображения относительно вершины первого зеркала (δ); положение и размер выходного зрачка при заданном входном ($s'_p, D'_{\text{вых}}$); увеличение в зрачках (β_{0p}); увеличение второго зеркала (β_{02}); длина конструкции двухзеркальной композиции (L) и значения сумм Зейделя (S_I-S_V) для различных положений входного зрачка (s_p). Таким образом, в виде таблиц создан массив исходных данных двухзеркальных композиций для различных значений β_0 .

Для выбора исходных вариантов двухзеркальных композиций предлагается выделять из всего массива отдельные конструкции с отличительными признаками, например, наиболее часто встречающиеся при разработке оптических систем, а именно:

- двухзеркальные композиции с заданным положением плоскости изображения относительно вершины первого зеркала δ (см. таблицу, № 1);
- двухзеркальные композиции с заданным расстоянием между зеркалами d (см. таблицу, № 2);
- двухзеркальные композиции с равными радиусами кривизны зеркал $r_1=r_2$ (см. таблицу, № 3);
- двухзеркальные композиции с равными оптическими силами зеркал $r_1=-r_2$ (см. таблицу, № 4);
- концентрические двухзеркальные композиции при $r_1=r_2+d$ (см. таблицу, № 5);
- двухзеркальные композиции, для которых $\delta=0$ (см. таблицу, № 6);
- двухзеркальные композиции с исправленной сферической абберацией третьего порядка $S_I=0$ (см. таблицу, № 7);
- двухзеркальные композиции с исправленной комой третьего порядка $S_{II}=0$ при заданном положении входного зрачка (см. таблицу, № 8).

Для каждого случая при изменении значения коэффициента экранирования в определенном интервале (например, $k=(-5; +5)$) можно выделить все конструкции с одним отличительным признаком, к примеру, исходя из условия исправления сферической абберации $S_I=0$.

Для вычисления сумм Зейделя S_I и S_{II} в двухзеркальной композиции были получены следующие формулы:

$$S_I = -\frac{1}{4}[(2\rho_1 - \beta_0)^2 - \beta_0^2][(2\rho_1 - \beta_0) - \beta_0] + \frac{k}{4}[1 - (2\rho_1 - \beta_0)^2][1 - (2\rho_1 - \beta_0)], \quad (2)$$

$$S_{II} = \left(\frac{1-k}{2\rho_1 - \beta_0}\right) \frac{1}{4}[1 - (2\rho_1 - \beta_0)^2][1 - (2\rho_1 - \beta_0)] + 0,5(1 - \beta_0^2). \quad (3)$$

Для определения значений конструктивных параметров перечисленных конструкций были получены формулы, частные случаи которых приведены в таблице.

№ п/п	Заданные параметры	r_{1np}	r_{2np}	d_{np}
1	k, δ_{np}	$2(\delta_{np} - k) / [\beta_0(\delta_{np} - k) + 1 - k]$	$2k(\delta_{np} - k) / (1 + \delta_{np} - 2k)$	$\delta_{np} - k$
2	k, d	$2d_{np} / (1 - k + d_{np}\beta_0)$	$2kd_{np} / [(1 - k) + d_{np}]$	d_{np}
3	$k, r_1=r_2$	$2(k - 1) / (1 - \beta_0)$	$2(k - 1) / (1 - \beta_0)$	$-(1 - k)^2 / (1 - k\beta_0)$
4	$k, r_1=-r_2$	$-2(k + 1) / (1 - \beta_0)$	$2(k + 1) / (1 - \beta_0)$	$(k^2 - 1) / (1 + k\beta_0)$
5	$k, r_1=r_2+d$	$2 / (\alpha_2 + \beta_0)$	$2k / (\alpha_2 + 1)$	$(1 - k) / \alpha_2$
6	$k, \delta = 0$	$2k / (k - 1 + k\beta_0)$	$2k^2 / (2k - 1)$	$-k$
7	$k, S_I=0$	$1/\rho_1$, где ρ_1 — решение уравнения $S_I=0$ (2)	$2kr_{1np} / (2 + r_{1np} - r_{1np}\beta_0)$	$r_{1np}(1 - k) / (2 - r_{1np}\beta_0)$
8	$k, S_{II}=0$	$1/\rho_1$, где ρ_1 — решение уравнения $S_{II}=0$ (3)	$2kr_{1np} / (2 + r_{1np} - r_{1np}\beta_0)$	$r_{1np}(1 - k) / (2 - r_{1np}\beta_0)$

Результаты расчета вариантов конструкций двухзеркальных композиций с отличительными признаками также сведены в таблицы, которые совместно с таблицами общего массива составляют каталог исходных вариантов.

Однако при выборе исходных вариантов, когда не только уточняются конструктивные параметры найденной конструкции, но осуществляется поиск самой конструкции, пользоваться таблицами затруднительно. Поэтому авторами настоящей статьи предложен новый графический способ одновременного представления многообразия двухзеркальных композиций и их отличительных признаков.

Графическое представление конструкций двухзеркальных композиций. Если все конструктивные параметры двухзеркальных композиций вычисляются при $h_1 = +1$ для любых значений β_0 и s_1 , то многообразие двухзеркальных композиций для каждого значения β_0 графически можно отобразить на плоскости (на „странице“) с координатами k и h_1/r_1 .

Рассмотрим вариант с удаленным объектом ($h_1 = f'_{эКВ} = +1$). Для графического представления результатов расчета установим практические ограничения: $k = \pm 5$ — в этом случае диаметр второго зеркала, по меньшей мере, в 5 раз больше диаметра первого зеркала; $f'_{эКВ}/r_1 = \pm 5$ — тогда при относительных отверстиях каждого зеркала не более 1/1 относительное отверстие всей системы при $|f'_{эКВ}/r_1| > 5$ меньше 1/10.

Для выделения композиций с отличительными конструктивными признаками требуется установить зависимость между k и ρ_1 : для конструкций с исправленной сферической аберрацией была получена формула

$$k = \frac{(2\rho_1 + 2)^3 + 2(2\rho_1 + 2)^2 - 4(2\rho_1 + 2) - 8}{(2\rho_1 + 2)^3 - (2\rho_1 + 2)^2 - (2\rho_1 + 2) + 1}, \quad (4)$$

а для конструкций с одинаковым расстоянием между зеркалами — формула

$$k = -2d_{np}\rho_1 + 1. \quad (5)$$

При этом для графического представления конструкций не всегда требуются вычисления, иногда достаточно установить аналитическую зависимость (см., например, формулу (5)): все конструкции с одинаковым расстоянием между зеркалами лежат на прямой, проходящей через точку ($k=1, \rho_1=0$) под углом γ , $\text{tg } \gamma = -2d_{np}$.

В качестве примера на рис. 3 графически представлены отдельные характеристики двухзеркальных композиций: прямыми 1, 2 показаны конструкции с одинаковыми расстояниями между

зеркалами ($d_{\text{пр}}=+1$ и $d_{\text{пр}}=-1$), кривыми 3—5 — конструкции с исправленной сферической аберрацией ($S_I=0$), кривыми 6, 7 — концентрические конструкции двухзеркальных композиций.

Эффективность графического представления многообразия двухзеркальных композиций заключается в том, что оно позволяет одновременно и наглядно продемонстрировать возможности и отличительные признаки многих конструкций, это, в свою очередь, позволяет осуществить многосторонний анализ и выбрать исходный вариант.

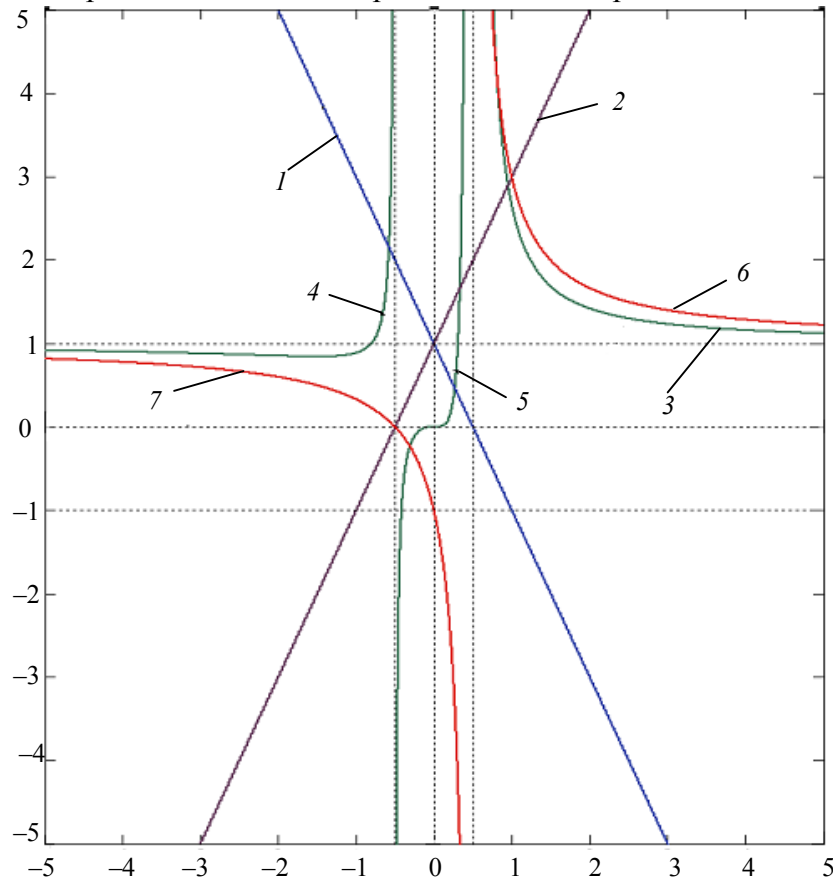


Рис. 3

На основе проведенных авторами исследований двухзеркальных композиций разработаны принцип построения и методика их расчета, а по результатам расчета создан каталог, состоящий из таблиц и графиков, для выбора исходных вариантов [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
2. Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос, 2000.
3. Справочник по инфракрасной технике / Под ред. У. Волфа, Г. Цисуса. М.: Мир, 1998. Т. 2, 4.
4. Каталог исходных вариантов двухзеркальных композиций различного назначения / К. Х. Нгуен, Т. И. Якушенкова // Сб. трудов „ПО—2006“. 2006. Т. 3. С. 163—167.

Сведения об авторах

Нгуен Куанг Хиен

— аспирант; Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра светотехники; E-mail: hiermprei_79@mail.ru

Татьяна Ивановна Якушенкова

— канд. техн. наук, доцент; Московский энергетический институт (Технический университет), кафедра светотехники

Рекомендована кафедрой
светотехники

Поступила в редакцию
25.03.08 г.

Л. Н. АНДРЕЕВ, Ю. А. КОМАРОВА

АБЕРРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Рассмотрены коррекционные возможности в области Зейделя отражающих поверхностей второго порядка: параболы, гиперболы и эллипса. На основе выражений для коэффициентов aberrаций третьего порядка сформулирована теорема об абберационных свойствах этих поверхностей.

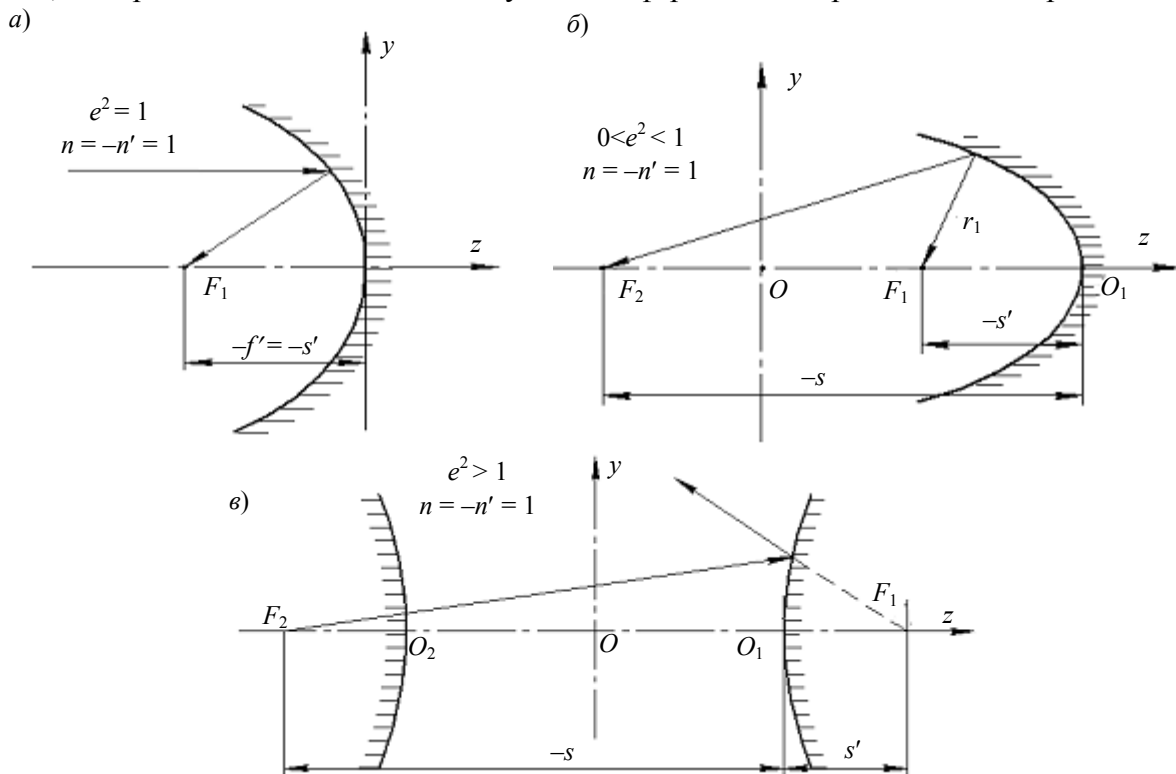
Ключевые слова: асферические отражающие поверхности, aberrации третьего порядка, абберационные свойства.

Уравнения кривых второго порядка имеют вид [1, 2]

$$y^2 = 2r_0z - (1 - e^2)z^2, \quad (1)$$

где r_0 — радиус в вершине кривой, e — эксцентриситет кривой второго порядка.

Для окружности $e^2=0$, для параболы $e^2=1$, для эллипса $0 < e^2 < 1$ и для гиперболы $e^2 > 1$: см. рисунок, где приведены схемы соответствующих асферических отражающих поверхностей.



На основе фокальных свойств кривых второго порядка [3] установлено, что оба фокуса являются сопряженными. Поэтому при расположении точки предмета в одном из фокусов отражающих поверхностей изображение находится в другом, и при этом гомоцентричность пучков лучей не нарушается, т.е. сферическая aberrация отсутствует [4—9].

Рассмотрим коэффициенты (S_I — S_V) aberrаций третьего порядка отражающих поверхностей второго порядка.

Коэффициенты aberrаций третьего порядка, выраженные через параметры P , W , π [1], определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{I}} &= h(P + \Delta P); \\ S_{\text{II}} &= H(P + \Delta P) - IW; \\ S_{\text{III}} &= \frac{H^2}{h}(P + \Delta P) - 2I \frac{H}{h}W - I^2\Phi; \\ S_{\text{IV}} &= \pi = -\frac{\Delta n^{-1}}{r_0} = \Phi; \\ S_{\text{V}} &= \frac{H^3}{h^2}(P + \Delta P) - 3I \frac{H^2}{h^2}W - 2I^2 \frac{H}{h}\Phi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где h и H — высота пересечения соответственно 1-го и 2-го паракиальных лучей с асферической поверхностью; $n = -n' = 1$; при этом

$$P = \left(\frac{\Delta a}{\Delta n^{-1}} \right)^2 \Delta a \frac{1}{n}; \quad W = \frac{\Delta a}{\Delta n^{-1}} \Delta a \frac{1}{n}; \quad \Phi = \frac{\alpha' - \alpha}{h}, \quad \Delta P = -e^2 \frac{\Delta a n^3}{\Delta n^2}.$$

Для параболоида (см. рисунок, а) при $\bar{P} = -0,25$; $\bar{W} = 0,50$; $\Delta \bar{P} = 0,25$ и $\alpha_1 = 0$; $\alpha' = 1$; $h_1 = f' = 1$; $\beta_1 = 1$, $I = -1$ уравнения (2) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_{\text{I}} &= 0; \\ \bar{S}_{\text{II}} &= \bar{W} = 0,5; \\ \bar{S}_{\text{III}} &= -H - 1 = -\bar{s}_p - 1; \\ \bar{S}_{\text{IV}} &= 1; \\ \bar{S}_{\text{V}} &= \frac{3}{2}\bar{H}^2 + 2\bar{H} = \frac{3}{2}\bar{s}_p^2 + 2\bar{s}_p, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где s_p — приведенное положение входного зрачка относительно вершины поверхности.

Для эллиптической и гиперболической отражающих поверхностей (см. рисунок, б, в) уравнения (2) при $\alpha_1 = -\beta^x$; $h_1 = s\alpha = -s\beta^x$; $H = s_p$; $I = n_1\alpha_1 l = -(s_p - s) \frac{1-e}{1+e}$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{I}} &= s \frac{(1-e)}{(1+e)} \left[-\frac{2e^2}{(1+e)^3} + \frac{2e^2}{(1+e)^3} \right] = 0; \\ S_{\text{II}} &= -\frac{2(s_p - s)(1-e)e}{(1+e)^3}; \\ S_{\text{III}} &= \frac{4(s_p - s)s_p e}{s(1+e)^2} + \frac{2(s_p - s)^2(1-e)}{s(1+e)^2}; \\ S_{\text{IV}} &= \pi = -\frac{\Delta n^{-1}}{r_0} = \Phi; \\ S_{\text{V}} &= -\frac{6e(s_p - s)s_p^2}{(1-e^2)s^2} + \frac{4(s_p - s)^2 s_p}{s^2(1+e^2)}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где s и s_p — расстояние от предмета и входного зрачка до вершины поверхности.

Для эллипсоида и гиперболоида

$$s = \frac{r_0}{1-e} \quad \text{или} \quad s' = \frac{r_0}{1+e}. \quad (5)$$

Анализ выражений (2)—(5) и фокальных свойств кривых второго порядка позволяет вывести следующую теорему.

Теорема. Отражающие поверхности второго порядка (параболоидальная, эллипсоидальная и гиперболоидальная) характеризуются следующими свойствами:

1) при расположении предмета в одном из фокусов сферическая aberrация исправлена ($S_I=0$), при этом гомоцентричность пучка лучей не нарушается;

2) при выполнении п. 1 кома третьего порядка не зависит от положения входного зрачка (s_p);

3) при выполнении п. 1 астигматизм третьего порядка зависит от положения входного зрачка (s_p): при расположении предмета и входного зрачка в сопряженных фокусах F_1 и F_2 соответственно он исправлен;

4) при выполнении п. 1 дисторсия третьего порядка зависит от положения входного зрачка: при $s_p=0$ и $s_p = \frac{2r_0}{2+e}$ исправлена;

5) кривизна поверхности изображения не зависит от положения входного зрачка (s_p) и эксцентриситета (e), так как $S_{IV} = \Phi = 2/r_0$.

В заключение следует отметить, что приведенные результаты исследования коррекционных свойств отражающих асферических поверхностей второго порядка в области Зейделя могут быть полезны при проектировании зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 379 с.
2. *Русинов М. М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
3. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике. М.: Гостехтеориздат, 1956. 608 с.
4. *Русинов М. М.* Несферические поверхности в оптике. М: Недра, 1965. 195с.
5. *Чуриловский В. Н.* Теория оптических приборов. М. — Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
6. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
7. *Зверев В. А.* Основы геометрической оптики. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. 218 с.
8. *Зверев В. А., Точилина Т. В.* Оптехника проектирования оптических приборов. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 457 с.
9. *Андреев Л. Н.* Прикладная теория aberrаций. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. 96 с.

Сведения об авторах

Лев Николаевич Андреев

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

Юлия Александровна Комарова

— студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
19.03.08 г.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.315.592; 621.315.51.6; 621.3.049.77.14

А. М. СКВОРЦОВ, ФАМ КУАНГ ТУНГ

СТРУКТУРА НАНОКЛАСТЕРОВ КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ КРЕМНИЙ — ДИОКСИД КРЕМНИЯ

Представлен обзор публикаций, посвященных исследованию различных структур нанокластеров кремния в слоях диоксида кремния. Показано, что при формировании нанокластеров кремния на монокристаллических кремниевых подложках методом нанолитографии поверхности с последующим термическим окислением или методом лазерного облучения окисленного кремния нанокластеры чаще всего имеют кристаллическую структуру; при использовании других методов требуется дополнительная обработка, в частности высокотемпературный отжиг. Указывается на возможность использования массива нанокристаллов кремния для создания цифровых устройств нанoeлектроники.

Ключевые слова: нанокластер, нанокомпозит, нанокристалл, структура нанокластера.

В настоящее время в связи с интенсивным развитием нанотехнологий повышенный научный и практический интерес в электронике вызывает получение на основе полупроводниковых материалов таких наноразмерных объектов, как квантовые ямы, квантовые точки, квантовые проволоки и, наконец, сверхрешетки, содержащие эти наноразмерные объекты. Так, например, гетероструктуры на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 с квантовыми ямами, квантовыми точками и сверхрешетками применяются при создании полупроводниковых лазеров [1].

Важное место в работах по созданию нанокомпозитных материалов и их применению в нанoeлектронике отводится кремнию. Кремний — один из самых широко используемых материалов в современной полупроводниковой микроэлектронике и интегральной оптике. Поэтому исследования по формированию и модификации параметров кремниевых наноструктур являются очень актуальными. Нанокристаллы кремния (НКр Si) в более широкозонных материалах, таких как его оксиды и нитриды, проявляют квантовые свойства при температурах вплоть до комнатных, что имеет практический интерес при реализации приборов на основе этих диэлектриков.

В традиционной планарной кремниевой технологии нитриды и оксиды кремния используются в качестве изолирующих материалов. При разработке изделий полупроводниковой микроэлектроники на основе МОП-транзисторов необходимо изолировать рабочую область транзистора от управляющего затвора в целях уменьшения пороговых напряжений и токов утечки. Это достигается, в частности, использованием диэлектриков с контролируемыми токами утечки для создания элементов памяти с кластерами кремния, встроенными в диэлектрик, которые служат центрами хранения заряда в так называемой перепрограммируемой памяти (или флэш-памяти). В настоящее время для создания такой памяти в качестве кластеров

кремния используются НКр Si, встроенные в термический окисел кремния (наноккомпозит, представляющий собой НКр Si—SiO₂). Это позволяет существенно уменьшить размер элемента памяти и увеличить число элементов на одном чипе [2—6].

Более того, квантование электронов и дырок в пределах НКр Si обуславливает изменение свойств наноккомпозита, при этом за счет квантования электронов в нанокристалле расширяется спектр электронных переходов. В оптике это проявляется в том, что наблюдается излучение от нанокристаллов в видимом диапазоне спектра, а в электронике — в изменении проводимости традиционных диэлектриков [7].

Как уже упоминалось, именно квантование электронов в НКр Si, располагающихся в диоксиде кремния, и туннелирование через потенциальный барьер (гетерограницу между НКр Si и SiO₂) обеспечивает практическое использование таких материалов в нанoeлектронике. Нанокластер, в котором наблюдается квантование носителей заряда, и носители ограничены в трех направлениях, называют квантовой точкой (КТ). Таким образом, КТ кремния, имеющая алмазоподобную структуру, является нанокристаллом кремния.

Структура нанокластеров кремния (НКл Si), формируемых в пленках SiO₂ на кремниевых подложках, зависит от ряда факторов. К их числу, в первую очередь, относятся технологические особенности формирования нанокластеров. Например, на основе окисленного микропористого кремния стабильно получают кластеры кремния различных размеров (от единиц до сотен нанометров и более) с кристаллической структурой. Наноккомпозиты, изготовленные на основе пористого кремния с высокой концентрацией НКр Si, находят широкое применение в нанoeлектронике. Вопросам получения, анализа свойств и применения пористого кремния посвящено значительное количество публикаций (см., например, [8—11]).

Кристаллическая структура нанокластеров кремния обеспечивается также при микроструктурировании поверхности монокристаллических кремниевых пластин нанолитографическим и лазерным методами [12, 13]. Как следует из ряда работ, использование лазерного излучения позволяет получить НКр Si и в пленках аморфного кремния. Например, в работе [14] рассматриваются результаты применения эксимерного Krf-лазера: тонкая пленка аморфного кремния на стеклянной подложке была облучена при комнатной температуре импульсным эксимерным Krf-лазером с длиной волны 248 нм и плотностью энергии 180 мДж/см²; после охлаждения на облученных областях были обнаружены нанокластеры монокристаллического кремния сферической формы размером 3—4 нм.

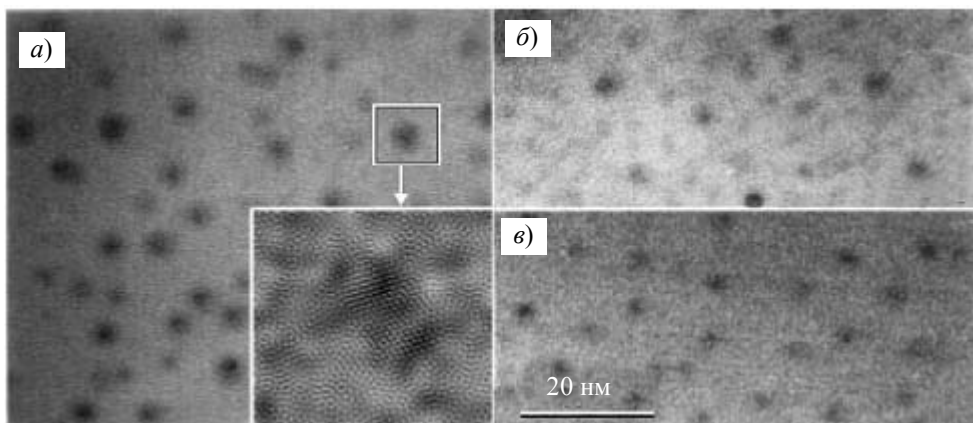
Как показано в работе [15], нанокластеры кремния могут быть получены в растущем слое SiO₂ при термическом окислении кремниевой подложки. На их зарождение и рост, кроме режимов окисления, существенно влияет структура окисляемой поверхности монокристалла. Формирующиеся в оксиде кремния НКл Si имеют аморфную структуру. При последующем отжиге в азоте или другом инертном газе происходит самоструктурирование нанокластеров в нанокристаллы кремния.

Структура и форма НКл Si, формируемых в пленке SiO₂, зависят также от числа атомов в нанокластере. Как следует из работы [16], кластеры кремния, содержащие до 20 атомов, имеют множество изомеров и могут отличаться большим разнообразием форм упаковок атомов. Сферическая форма НКл Si является равновесной, если эти кластеры содержат более 28 атомов [17]. Однако в другой работе [18] приведены результаты квантово-механических расчетов, которые показывают, что уже при числе атомов кремния в кластере более 19 НКл Si приобретает стабильную сферическую форму. О влиянии числа атомов кремния в НКл Si на его структуру свидетельствуют работы японских ученых [19]. Облучая пленку SiO₂ электронным пучком просвечивающего электронного микроскопа с дозой излучения 1×10^9 Кл/м², они формировали в пленке оксида нанокластеры кремния. При этом на начальном этапе образования НКл Si электронный микроскоп не фиксировал появления кристаллической структуры нанокластеров. С повышением дозы

электронов в два раза количество атомов кремния в кластере быстро увеличивается и образуется кристаллическая фаза кремния, т.е. происходит самоструктурирование нанокластеров в нанокристаллы; затем наблюдается увеличение размеров нанокристаллов. Таким образом, следует вывод о наличии некоторого критического процесса зародышеобразования кластеров кремния, их роста, самоструктурирования в кристаллическую фазу, а затем дальнейшего роста кристаллитов кремния.

Зависимость структуры НКл Si от количества атомов кремния, введенных в тонкую пленку SiO₂ при имплантации ионов Si с последующим отжигом, отмечена также в работах [20]. Ионы Si с энергией 150 кэВ, плотностью тока до 5 мкА/см² и дозой $Q=10^{17}$ см⁻² имплантировались в слой SiO₂ толщиной 80 нм, выращенные термически на кремниевых подложках Si (100). Авторами обнаружено, что при концентрации избыточного кремния в пределах 3—14 ат. % НКл Si образуются сразу после имплантации. Кластеры имеют рыхлую структуру. При последующих отжигах подложек происходит трансформация рыхлых образований атомов кремния в более компактные фазовые образования, имеющие выраженную поверхность раздела с SiO₂. Формирование нанокластеров кремния завершается после отжига при температуре 1000 °С, однако формирование наноразмерных кристаллитов кремния завершается лишь после отжига при температуре 1100 °С. Размеры НКр Si составляют 4—5 нм, а плотность — порядка $10^{11} \dots 10^{12}$ см⁻². При меньших дозах или в случае если указанная доза набиралась с промежуточными отжигами, на изображении скола в SiO₂ были видны нанопреципитаты в виде темных пятен (см. рисунок). Выявить в них признаки кристаллической структуры не удавалось. Ранее подобные пятна неоднократно наблюдались разными исследователями, когда условия синтеза оказывались недостаточными для формирования НКр Si. Данные исследований, проведенных авторами работ [20], свидетельствуют о наличии в НКр Si кристаллического ядра и поверхностного слоя толщиной около 1 нм. Высказывается предположение о том, что именно противодействие поверхностного слоя является причиной высокой температуры кристаллизации нановыделений кремния.

На рисунке представлено фотоизображение, полученное с помощью электронного микроскопа высокого разрешения на поперечных срезах образцов при различных режимах ионно-пучковой имплантации: *a* — $Q=10^{17}$ см⁻², с последующим однократным отжигом при 1100 °С в течение 2 ч; *б* — $Q=5 \cdot 10^{16}$ см⁻², с последующим отжигом при 1100 °С в течение 1 ч, затем процедура повторялась еще раз; *в* — $Q=3,3 \cdot 10^{16}$ см⁻², с последующим отжигом при 1100 °С в течение 40 мин, процедура повторялась 2 раза [20].



Итак, при разработке нанокompозитного материала на основе тонких слоев диоксида кремния с включениями нанокластеров кремния необходимо использовать такие методы формирования нанокластеров и, если потребуется, такие режимы последующих термообработок, которые позволят обеспечить кристаллическую структуру нанокластеров при высокой плотности нанокристаллов кремния на единицу площади нанокompозитного слоя. Кроме того,

для создания суперминиатюрных цифровых нанoeлектронных устройств, наряду с высокой плотностью нанокристаллов, требуется, чтобы нанокристаллы кремния составляли регулярную матрицу в слое нанокомпозита на подложке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32, № 1. С. 3—18.
2. Singl-electron memory for giga-to-tera bit storage / Y. Kazuo, I. Tomoyuki, S. Toshiaki et al. // Pros. IEEE. 1999. Vol. 87, N 4. P. 633—651.
3. Quantum computer using coupled-quantum-dot molecules / W. N. Jian, K. Masurao, N. Aniko, Y. Hitoshi // Jap. J. Appl. Phys. Pt.1. 2000. Vol. 39, N 7B. P. 4642—4646.
4. Memory devices obtained by Si⁺ irradiation through poly-Si/SiO₂ gate stack / P. Dimitrakis, P. Normand, E. Vontitseva et al. // J. of Physics: Conference Series 10. 2005. P. 7—10.
5. Silicon nanocrystal field-effect light-emitting devices / R. J. Walters, J. Carreras, Tao Feng et al. // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2006. Vol. 12, N 6. P. 1647—1657.
6. Silicon nanocrystal memories by LPCVD of amorphous silicon, followed by solid phase crystallization and thermal oxidation / E. Tsoi, P. Normand, A. G. Nassiopoulou, V. Ioannou-Sougleridis et al. // J. of Physics: Conference Series 10. 2005. P. 31—34.
7. Ynokuma T., Wakayama Y., Muramoto T. et al. Optical properties of Si cluster and Si nanocrystallites in high temperature in annealed SiO₂ films // J. App. Phys. 1998. Vol. 83, N 4. P. 2228—2234.
8. Лабунюв В. А., Бондаренко В. П. Пористый кремний в полупроводниковой электронике // Зарубежная электронная техника. 1978. № 15 (185). С. 4—36.
9. Gullis A. G., Canham L. T. The structural and luminescence properties of porous silicon // Appl. Phys. Rev. 1997. P. 909—965.
10. Smith R. L., Collins S. D. Porous silicon formation mechanisms // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 71, N 8. P. 1—22.
11. Collins R. T., Fauchet P. M., Tischler M. A. Porous silicon: From luminescence to LEDs // Phys. Today. 1997. Vol. 50. P. 24—31.
12. Скворцов А. М., Жарова Ю. А., Ткалич В. Л. Микроstructuring поверхности монокристаллов кремния в электронной технике // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 1. С. 60—65.
13. Вейко В. П., Дышловченко С. С., Скворцов А. М. Лазерное микроstructuring поверхности кремния // Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов: науч.-техн. сб. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. Ч. 2. С. 138—153.
14. Jiun-Lin Yeh, Hsuen-Li Chen, An Shih, Si-chen Lee. Formation of Si nanoclusters in amorphous silicon thin films by excimer laser annealing // Electronics Lett. 1999. Vol. 35, N 23. P. 2508—2509.
15. Скворцов А. М., Плотников В. В., Соколов В. И. Формирование нанокластеров кремния в структуре кремний/диоксид кремния // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 3. С. 62—67.
16. Kawazoe Y., Kondow T., Ohno K. Clusters and Nanomaterials. Theory and Experiment. Berlin: Springer, 2002. 334 p.
17. Kaxiras E., Jackson K. Shape of small silicon clusters // Phys. Rev. Lett. 1993. Vol. 71, N. 5. P. 727—730.
18. Ho Kai-Ming, Shvartsburg A. A., Phan Bicaï et al. Structures of medium-sized silicon clusters // Nature (Gr. Brit.). 1998. N 6676. P. 582—585.
19. Takiguchi M., Furaya K., Yooshihara K. Structure study of Si nanocrystals formed by electron-induced radiation of SiO₂ at high temperature // Jap. J. Appl. Phys. Pt. 1. 1999. Vol. 38. N 12B. P. 7140—7143; Electron energy loss spectroscopy study of the formation desorbition-decomposition // Micron. 1999. Vol. 30, N 2. P. 147—150.
20. О формировании нанокристаллов кремния при отжиге слоев SiO₂, имплантированных ионами Si / Г. А. Качурин, С. Г. Яновская, В. А. Володин и др. // ФТП. 2002. Т. 36, вып. 6. С. 685—689; Формирование кремниевых нанокристаллов в слоях SiO₂ при имплантации ионов Si с промежуточными отжигами / Г. А. Качурин, В. А. Володин, Д. И. Тетельбаум и др. // Там же. 2005. Т. 39, вып. 5. С. 582—586.

Сведения об авторах

- Альберт Матвеевич Скворцов** — д-р. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
- Фам Куанг Тунг** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: quang_tung@yahoo.com

Рекомендована кафедрой проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию 25.01.08 г.

УДК 621.793.18

С. Н. БЕЛЯЕВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ НАПЫЛЕНИЯ УЗЛОВ ГИРОСПРИБОРОВ

Рассматриваются основные принципы выбора материалов покрытий и методов их напыления на узлы гиросприборов, исходя из технических требований к изделию, его геометрических и функциональных особенностей, а также в зависимости от физико-механических и теплофизических свойств материала покрытия. Представлены основные параметры процессов нанесения покрытий методами магнетронного напыления и термического испарения в вакууме для различных материалов.

Ключевые слова: тонкопленочное покрытие, магнетронное напыление, термическое испарение в вакууме, датчик положения, гиросприбор.

Введение. При разработке современных изделий точного приборостроения, в том числе гироскопических приборов, большое значение имеют технологические процессы нанесения покрытий, реализуемые различными методами напыления. При технологическом проектировании процессов вакуумного напыления определяющим фактором является выбор материалов покрытий, обеспечивающих рабочие характеристики изделия. При этом техническим требованиям, например, по таким показателям, как магнитные или электрические свойства, механические характеристики и т.д., могут соответствовать различные материалы. Очевидно, что выбор материала покрытия должен осуществляться исходя из максимальной технологичности процесса его нанесения.

В настоящей статье рассматриваются результаты исследований, цель которых заключалась в выявлении и систематизации по значимости критериев выбора материала функциональных покрытий и в определении режимов и методов их напыления на прецизионные элементы узлов гиросприборов.

Технологические особенности выбора материалов. Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

— выявление исходных условий и основных принципов выбора материалов и методов напыления, исходя из технических требований к изделию и свойств материала;

— определение и сравнительная оценка основных параметров и характеристик технологических процессов нанесения покрытий для различных конструкционных материалов применительно к конкретным узлам гиросприборов.

В качестве наиболее наглядных примеров использования вакуумных покрытий при изготовлении деталей и узлов giroприборов можно привести формообразование массивного армирующего элемента в конструкции ротора бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) и нанесение тонкопленочных электродов на узлы датчика положения чувствительного элемента гравитационного вариометра (ЧЭ ГВ).

Реализация ротора БЭСГ (рис. 1) осуществляется посредством диффузионной сварки в вакууме охватывающей втулки 2 и охватываемого цилиндра 1 с профилированной кольцевой проточкой, заполненной материалом армирующего элемента 3 путем напыления, с последующим формообразованием сферы ротора 4 диаметром $D+\Delta$ [1].

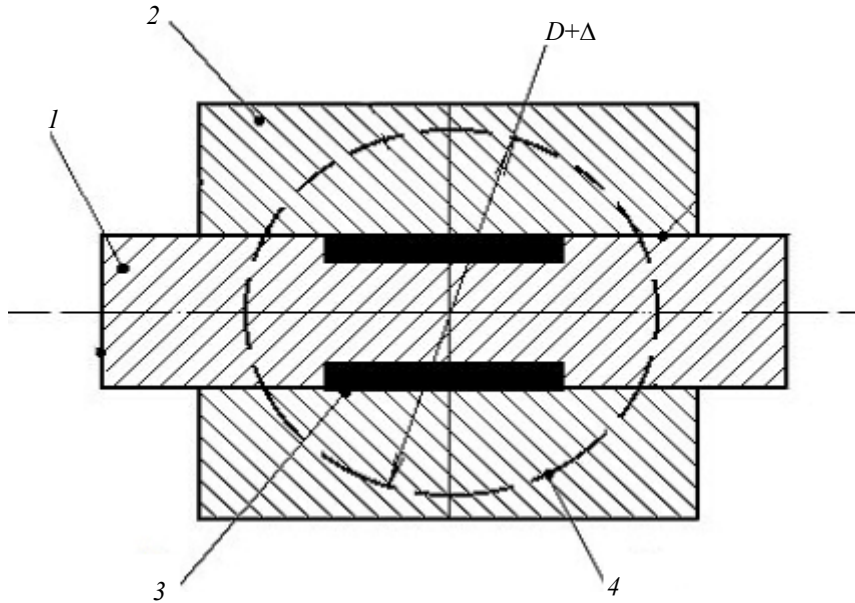


Рис. 1

К данному ротору предъявляется ряд технических требований, основное из которых — обеспечение относительной разности моментов инерции ротора (ε), определяемой в диапазоне (0,030—0,034), что и достигается наличием в его составе армирующего элемента. Эта разность определяется как

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{ос}} - I_{\text{рад}}}{I_{\text{ос}}},$$

где $I_{\text{ос}}$ и $I_{\text{рад}}$ — моменты инерции цилиндра вдоль и перпендикулярно оси вращения для армирующего элемента, вычисляемые по соответствующим формулам:

$$I_{\text{ос}} = \gamma_{\text{Ве}} \pi \frac{h}{2} (R^4 - r^4) = m \frac{R^2 + r^2}{2};$$

$$I_{\text{рад}} = \gamma_{\text{Ве}} \pi \frac{h}{4} (R^2 - r^2) \left(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3} \right) = m \frac{R^2 + r^2 + h^2/3}{4},$$

где h — ширина прослойки армирующего элемента; R и r — внешний и внутренний радиусы кольцевого армирующего элемента; m — масса армирующего элемента; $\gamma_{\text{Ве}}$ — удельный вес бериллиевого ротора.

Таким образом, для того чтобы подобрать необходимую относительную разность моментов инерции ротора, следует оперировать такими взаимообусловленными параметрами, как ширина h и разность радиусов R и r (толщина) кольцевого армирующего элемента, а также удельный вес γ его материала.

В качестве предполагаемых материалов для армирующего элемента были рассмотрены применяемые в гироскопии такие материалы, как медь, молибден, тантал, титан, ниобий, золото, серебро, вольфрам и хром. Выбор материала определяется по следующим критериям, расположенным в порядке убывания их сравнительной значимости.

1. Температура плавления ($T_{пл}$) материала армирующего элемента.
2. Немагнитность материала армирующего элемента.
3. Упругость паров (P) напыляемого материала армирующего элемента при определенной температуре сварки ($T_{св}$).
4. Удельный вес материала армирующего элемента (с учетом величины превышения удельного веса материала γ_m над удельным весом бериллия γ_{Be}).
5. Согласованность материала армирующего элемента и бериллия по значениям термических коэффициентов линейного расширения — ТКЛР (соотношение Δ).
6. Адгезия материала армирующего элемента к бериллиевой подложке.
7. Наличие и ширина (s) переходных зон твердофазного взаимодействия между бериллием и материалом армирующего элемента при определенном времени сварки ($t_{св}$).
8. Скорость (v) процесса напыления.
9. Экономичность процесса напыления (стоимость материала — n).

Для наглядного представления о значимости критериев составлена таблица, в которой приведены некоторые свойства материалов и геометрические характеристики армирующего элемента ротора БЭСГ (см. табл. 1) [2, 3]. В табл. 1 для каждого элемента представлены совокупность критериев выбора материалов и данные о геометрической конфигурации проточки под армирующий элемент, которые могут варьироваться в пределах, определяемых геометрией сферы ротора.

Критерии 1—3 (см. приведенный выше перечень) обусловлены однозначно необходимыми требованиями, определяющими принципы работы прибора, и фактически являются ограничительными. При этом упругость паров материала (критерий 3) не должна превышать определенного значения, составляющего примерно 1,3 Па; при этом чем меньшим значением P обладает материал, тем он предпочтительнее. Очевидно, что при равнозначности представленных в табл. 1 материалов по ограничительным критериям возможно их ранжирование с определением предпочтительности использования по сравнительным признакам, которые характеризуются критериями 4—7. Далее рассматриваются технологические критерии 8 и 9, связанные с особенностями проведения процесса напыления. Эти критерии весьма важны, поскольку обеспечивают возможность практической реализации процесса и характеризуют его производительность, воспроизводимость результатов, а также стоимость-затратные показатели.

Как показывает анализ свойств рассматриваемых материалов, критериям 1—3 удовлетворяют в той или иной степени все материалы; критерию 4, в порядке предпочтения, — вольфрам, тантал, золото, серебро, молибден и медь; критерию 5 — золото, медь и серебро; критерию 6, в той или иной степени, — титан, серебро и медь; критерию 7 — все материалы; критериям 8 и 9 — медь. (Данные по критериям 8 и 9 представлены в табл. 2.)

По совокупной оценке материалов (см. табл. 1) в качестве наиболее приемлемого материала для формообразования армирующего элемента методом напыления была выбрана медь, которая характеризуется высокой упругостью паров, необходимым удельным весом, хорошей согласованностью с бериллием по ТКЛР, высокой скоростью распыления при минимальных временных затратах и низкой стоимостью.

Технология изготовления датчика положения ЧЭ ГВ включает множество операций, наиболее важной из которых является нанесение электродов посредством напыления на ротор и статор, которые выполнены из корундовой керамики и имеют встречно-ориентированные друг относительно друга рабочие сферические поверхности [4]. Рабочая поверхность ротора представляет собой сплошной электрод, а поверхность статора — три кольцевые дорожки электродов. При этом толщина электродов ($h_{эл}$), в зависимости от напыляемого материала, может быть различной.

Таблица 1

Материал армирующего элемента	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$\gamma_n, \text{г/см}^3$	$P, \text{Па},$ при $T_{св} \approx 700 \dots 900 ^\circ\text{C}$	$s, \text{мкм},$ при $T_{св} = 700 \dots 900 ^\circ\text{C}$ и $t_{св} = 1 \text{ ч}$	Δ при $T_{св} = 800 \dots 900 ^\circ\text{C}$	$R, \text{мм}$	$R-r, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	ϵ
Cu	1083	8,96	$10^{-5} - 10^{-3}$	9—12	1,14	4	0,2	1,3	0,033
Mo	2610	10,22	$< 10^{-15}$	0,06—0,44	0,35	4,1	0,1	2	0,032
Ti	1725	4,54	$< 10^{-10}$	0,04—3,6	0,51	4	0,5	1,45	0,031
Au	1063	19,32	$10^{-7} - 10^{-4}$	Нет данных	0,90	4	0,1	1,05	0,034
Ag	960	10,5	$5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-1}$	Нет данных	1,33	4	0,11	2	0,033
Ta	2996	16,6	$< 10^{-16}$	0,9—2,2	0,37	4	0,06	2	0,034
Nb	2415	8,57	$< 10^{-17}$	0,07—0,2	0,44	4	0,28	1	0,033
W	3400	19,3	$< 10^{-18}$	0,1—0,16	0,29	4,1	0,1	0,95	0,033
Cr	1890	7,19	$10^{-8} - 5 \cdot 10^{-5}$	0,02—2,7	1,79	4	0,2	1,8	0,033

Таблица 2

Материал электрода	σ_b , МПа	ρ , мкОм·м	Δ при $T_H = 300$ °С	θ	$h_{эл}$, мкм	ν , мкм/ч*	n , руб.
Mo	490—981	0,05	0,93	+	2—3	4	4500
Cu	220—400	0,0168	2,52	-	3—4	60	200
Cr	190—200	0,15	1,61	+	1—2	5	300
Ti	392—539	0,58	1,42	+	2—3	0,5	850
Ag	127—156	0,0160	3,20	+	1—3	3,5	450
Au	135—140	0,023	2,36	-	1—2	2	19500
Nb	470—510	0,15	1,17	+	3—4	1,5	3100
Ta	204—349	0,15	1,06	-	2—3	0,9	15100
W	610—660	0,056	0,72	-	2—3	0,4	3700

Примечание: * — приведены значения ориентировочной скорости процесса при использовании магнетронного метода напыления.

Исходя из совокупности технических требований к электродным покрытиям на статоре и роторе, можно определить следующие основные критерии выбора материала электродов.

1. Температура плавления ($T_{пл}$) материала электрода.
2. Немагнитность материала электрода.
3. Удельное электросопротивление материала электрода (ρ).
4. Согласованность материала электрода и керамики по ТКЛР (соотношение Δ) при определенной температуре напыления (T_n).
5. Механическая прочность материала (σ_b).
6. Адгезия материала электрода к керамике, характеризующаяся, в том числе, возможностью трехфазного взаимодействия (θ).
7. Скорость (v) процесса напыления.
8. Экономичность процесса напыления (стоимость 1 кг пруткового материала (n), по данным 2007 г.).

Аналогично предыдущему примеру приведенные критерии можно разделить на ограничительные (1—3), сравнительные (4—6) и технологические (7, 8).

В табл. 2 представлены параметры материалов, являющиеся критериями их выбора, и характеристики электродов датчика положения ЧЭ ГВ [2, 3]. (Значения $T_{пл}$ и γ_m приведены в табл. 1.)

Основываясь на анализе приведенных критериев и данных табл. 2, можно отметить, что критериям 1 и 2 удовлетворяют в той или иной степени все материалы; по критерию 3 наиболее приемлемыми, в порядке предпочтения, являются серебро, медь, золото, молибден и вольфрам; по критерию 4 — вольфрам, молибден, тантал, ниобий и титан, по критерию 5 — молибден, вольфрам, титан, ниобий и тантал; по критерию 6 — титан, молибден, ниобий, хром и серебро; по критериям 7 и 8 — медь.

Сравнительный анализ критериев показал, что наиболее предпочтительным материалом для напыления электродов является молибден, который характеризуется сравнительно низким электросопротивлением, удовлетворительной согласованностью с керамикой по ТКЛР, высокой механической прочностью и хорошей адгезией к керамике.

Технологические особенности методов напыления. Для выбранных материалов были определены методы их нанесения. Для напыления медного армирующего элемента использовался метод термического испарения в вакууме, позволяющий получить покрытие сравнительно большой толщины при минимальных затратах материала. Для нанесения молибденовых электродов выбран метод магнетронного напыления, обеспечивающий минимальную разнотолщинность покрытия.

Основные режимы процессов напыления армирующего элемента ротора БЭСГ и электродов датчика положения ЧЭ ГВ, определенные в результате исследований, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Нанесение меди методом термического испарения в вакууме		Нанесение молибдена методом магнетронного напыления	
Давление в камере, Па	$6,7(\pm 1) \cdot 10^{-2}$	Давление в камере, Па	$2,7(\pm 0,2) \cdot 10^{-3}$
Ток испарителя, А	250±10 —1-й этап, 440±5 —2-й этап	Давление рабочего газа, Па	$1,6(\pm 0,05) \cdot 10^{-1}$
Напряжение испарителя, В	8±0,5	Ток разряда мишени, А	4,2±0,1
Температура нагрева детали, °С	400±10	Напряжение разряда, В	550±5
Расстояние испаритель — деталь, мм	70±5	Температура нагрева детали, °С	310±10
Время напыления, ч	3±0,2	Расстояние мишень — деталь, мм	90±5
Средняя скорость испарения, мкм/ч	60±0,5	Время напыления, ч	0,5±0,05
		Скорость напыления, мкм/ч	4±0,2

В соответствии с выбранными режимами были изготовлены узлы гироприборов с напыленными покрытиями (рис. 2). На рисунке представлены заготовки ротора БЭСГ под операцию диффузионной сварки (рис. 2, а); шлифы поверхностей роторов в осевом сечении с на-

пыленными армирующими элементами (рис. 2, б); статор датчика положения ЧЭ ГВ с напыленными дорожками электродов (рис. 2, в) и ротор датчика положения с напыленным сплошным электродом (рис. 2, г).

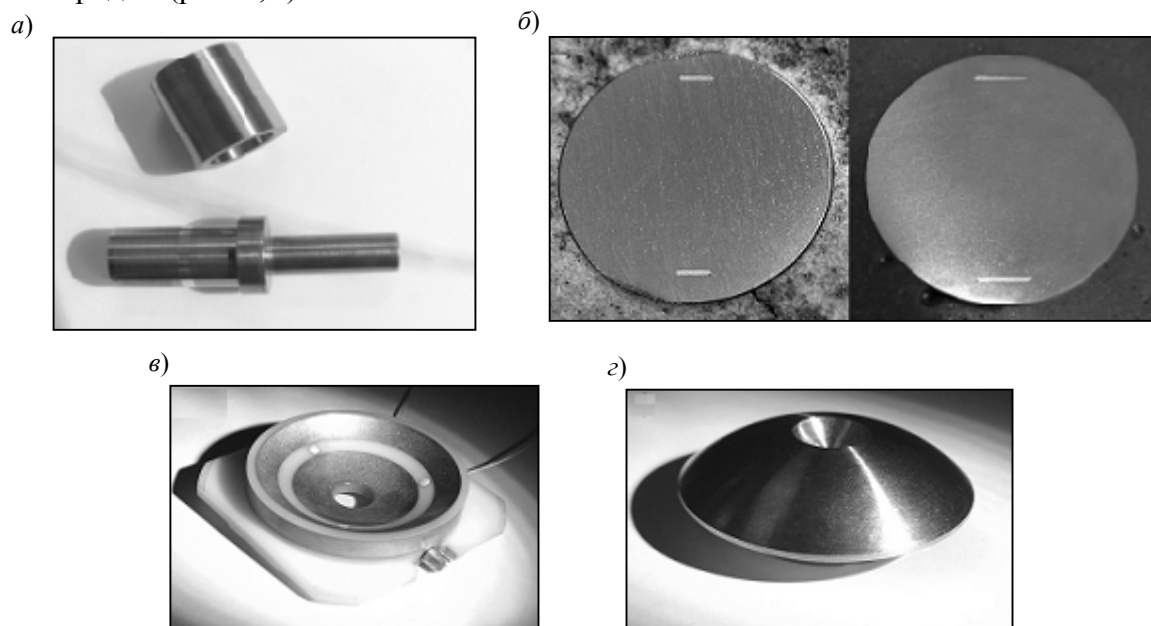


Рис. 2

Заключение. В результате проведенных экспериментов, исходя из сравнительного анализа свойств и характеристик материалов, а также технических требований к изделиям при нанесении покрытий на конкретные узлы гиросприборов, были определены и сгруппированы по ограничительным, сравнительным и технологическим признакам основные критерии выбора материалов с установлением уровня значимости каждого критерия. Для рассмотренных узлов гиросприборов были выбраны материалы покрытий и определены наиболее предпочтительные методы их напыления. По разработанным технологиям изготовлены реальные узлы гиросприборов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 08-08-12032-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ изготовления ротора шарового гироскопа / Б. Е. Ландау, А. Я. Бузык, А. Г. Щербак и др. // Заявка № 2005107600/02. Полож. реш. от 17.05.06.
2. Беляев С. Н. Прецизионная технология формообразования тонкопленочных электродов на элементах изделий точного приборостроения // Материалы IV Междунар. конгресса „Машиностроительные технологии“. Варна, 2004.
3. Свойства элементов. Справочник / Под ред. М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1985. 672 с.
4. Справочник по вакуумной технике и технологии / Пер. с англ.; Под ред. Ф. Росбери. М.: Энергия, 1972. 456 с.

Сведения об авторе

Сергей Николаевич Беляев

— ФГУП ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург;
E-mail: serenible@mail.ru

Рекомендована
ЦНИИ „Электроприбор“

Поступила в редакцию
19.02.08 г.

SUMMARY

P. 5—12.

SOLUTION OF THE PROBLEM OF NONLINEAR PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF STOCHASTIC OBJECTS BASED ON THE MINIMUM CRITERION OF THE ESTIMATION ERROR PROBABILITY

The nonlinear stochastic parametrical identification problem is considered. The method of the decision of identification parameter problem of the discrete observer with use of estimation error probability minimum criterion is offered. For an illustration of efficiency of the offered approach the numerical example is considered.

Keywords: parametrical identification, estimation error, a minimum of criterion, Kalman filter.

Data on authors

- Sergey V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Rostov State University of Means of Communication, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transport
- Pavel A. Kucherenko* — Post-Graduate Student; Rostov State University of Means of Communication, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transport; E-mail: pavelpost83@mail.ru

P. 12—17.

METHOD OF ADAPTIVE SCALAR QUANTIZATION IN LOSSY IMAGE COMPRESSION SCHEMES

The problem of adaptive generation of quantization matrixes for lossy compression schemes, using spectral transformations is considered. The way of adaptive scalar quantization of spectral coefficients on the basis of weight criterion is offered, ways of calculation of this criterion are considered.

Keywords: image compression, adaptive quantization, weight criterion, JPEG.

Data on author

- Yury V. Luzhkov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computing Technique; E-mail: luzhkov@inbox.ru

P. 17—21.

SPEECH COMMANDS AUTOMATIC RECOGNITION SYSTEM

The article gives a description of the automatic recognition of speech commands. The system consists of several modules: a digitized signal; selection of primary features of the speech signal based on linear spectral roots, search for the standard basis of dynamic programming semantic correction of the recognition sequence of characters linguistically Dictionary. The work can be used in the field of speech technologies.

Keywords: speech recognition, dynamic programming, linear production.

Data on authors

- Konstantin K. Gladyshev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Telecommunications, Department of Digital Computing Technique; E-mail: gladkos@gmail.com
- Eugene A. Shulgin* — Dr. Techn. Sci., Professor; Nevsky Institute of Language and Culture, St. Petersburg; E-mail: eshu1944@mail.wplus.net

P. 21—23.

TRANSFORMATION OF SINGLY-CONNECTED BAYESIAN BELIEF NETWORKS INTO ALGEBRAIC BAYESIAN NETWORKS

The paper presents the key steps of the algorithm which can transform uncertain knowledge patterns bases represented as singly-connected Bayesian belief networks (i.e. structured as a poly-tree) into the bases represented as algebraic Bayesian networks. The major part of this transformation successively performs calculation of join probability tensors based on already-known conditional probability tensors that are stored in the nodes of Bayesian belief networks. The transformation process is completed when join probability tensors are re-calculated into the set of probability estimates over elements of conjuncts ideals.

Keywords: Bayesian networks, probabilistic semantics, uncertain knowledge models, probabilistic-logic inference.

Data on author

Aleksander L. Tulup'ev — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Applied Informatics;
E-mail: alt@iiias.spb.su

P. 23—28.

DYNAMIC SYSTEMS WITH VARIABLE STRUCTURE AND DIMENSION

The approach to mathematical modeling of variable structure and dimension systems is proposed. The model is described by the systems of ordinary differential equations, the number and the form of which depends on behavior of special variables. The continuous and discontinuous variation of structure is considered. The solid body system stabilization problem is adduced as the example of proposed method use.

Keywords: dynamical system, mathematical model, structure variation, variable dimension, decomposition, control.

Data on author

Aleksander N. Kirillov — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg State Technological University of Plant Polymers, Department of Higher Mathematics; E-mail: krllvaleksandr@rambler.ru

P. 29—31.

IMITATING MODELING AT RESEARCH OF TIME CHARACTERISTICS OF DISCRETE SYSTEMS

Basic phase of design simulation models are at issue of this paper, method of building simulation package is based on table-driven approach. Mathematic base as piecewise linear aggregates of organization simulation package is introduced.

Keywords: imitating modelling, discrete systems, columns of situations.

Data on authors

Eugeny A. Barbashov — OAO "Kotlin-Novator", St. Petersburg, Main Designer
Anatoly V. Demin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics
Vyacheslav S. Kulagin — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electronics
Aleksander B. Nachkebiya — ZAO "Teplofizpribor", St. Petersburg, Director

P. 32—37.

OPTIMAL CONTROL OF WIND-DRIVEN POWERPLANT BY OSCILLATING MODE

The circuit of wind-driven powerplant with oscillating operating mode and mathematical model of rotative airfoils dynamic were under consideration in this article. To satisfy minimum of Krasovsky criterion, the algorithm of optimal control with predictive model was designed. The parameters of Krasovsky criterion were changed.

Keywords: wind-driven powerplant, optimal control, motion prediction model.

Data on authors

Sergey A. Kabanov — Dr. Techn. Sci., Professor; Baltic State Technical University "Voenmech" by the name D. F. Ustinov, Department of Information Processing Systems and Control, St. Petersburg; E-mail: kabanov@bstu.spb.su

Elena S. Petukhova — Engineer; Baltic State Technical University "Voenmech" by the name D. F. Ustinov, Department of Information Processing Systems and Control, St. Petersburg; E-mail: helpet@yandex.ru

P. 38—42.

TECHNOLOGY OF TRAINING DIALOGUES CONSTRUCTION IN COMPUTER TUTORIAL TRAINING SYSTEMS

Using of finite automats with memory for construction of multistage training dialogues in systems of tutorial type is discussed. It allows to simplify essentially program algorithms, simulate training dialogue in a natural language, not imposing obvious restrictions on terminology and phraseology of the answer trained and to realize in training system flexible individualized training. The conclusion to the trainee of corresponding retorts or helps, in each of states of the finite automat, depending on the current value of the visiting counter of this states, promotes essential increase of intellectuality of dialogue.

Keywords: tutorial training systems, dialogue systems, automated training systems.

Data on author

Andrey D. Tazetdinov — Cand. Techn. Sci.; International Bank Institute, St. Petersburg; Director of Information Technologies Center; E-mail: 191_nkp@bk.ru

P. 42—45.

INTEGRATION OF PRODUCT DATA MANAGEMENT SYSTEMS AND COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEMS: FROM PARTIAL SOLUTION TO GLOBAL STRATEGY

The article is devoted to modern questions of PDM and CAD systems integration in mechanical engineering. The article observes the unified approach and describes the architecture of software environment, which demonstrates implementation of this approach.

Keywords: CAD system, PDM system, STEP, CALS.

Data on author

Tatiana D. Golitsyna — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: tdg@inbox.ru

P. 46—50.

DOPPLER SIGNALS SPECTRUM ANALYZER

Questions of construction of Doppler signals of spectral analysis system, providing the minimal time of the analysis and high sensitivity are considered. At processing signals with the small attitude signal/noise is applied the block of restriction of the false operations, allowing essentially to lower probability of a false alarm at preservation of probability of correct detection.

Keywords: spectrum analyzer, deviation of frequency, a divider of frequency, autofine tuning.

Data on author

Vladimir L. Kozlov — Post-Graduate Student; Belarussian State University, Department of Quantum Radiophysics and Optoelectronics, Minsk; E-mail: KozlovVL@bsu.by

P. 51—56.

INFLUENCE OF TRANSPARENT MATERIAL ON OPTOELECTRIC SIGNAL IN NANOGRA-PHITE FILMS

Results of research of influence of a transparent covering nanographite film on amplitude of optoelectric signal arising in a film at its irradiation by laser pulses are considered. It is shown, that at drawing a covering dependence of amplitude of signal on a corner of falling of the laser beam on the film surface that can be used for modernization of the gauge of spatial position of the object made from nanographite film.

Keywords: nanographite films, optoelectric signal, thermal sputtering.

Data on authors

- Gennady M. Mikheev* — Dr. Phys.-Math. Sci.; Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Izhevsk; E-mail: mikheev@udman.ru
- Ruslan G. Zonov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Izhevsk; E-mail: ZNV@udman.ru
- Aleksander N. Obratsov* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Lomonosov Moscow State University, Department of Crystallography; E-mail: obraz@polly.phys.msu.ru
- Vasily M. Styapshin* — Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Izhevsk; Laboratorian

P. 56—59.

PHOTO REGISTERING DEVICES FOR REPRODUCTION OF SPACE-METEOROLOGICAL SYSTEMS OF 3rd GENERATION

The structure and features of photo registering complex intended for service of the meteorological equipment of 3rd generation is considered. The theoretical analysis of conditions of achievement of limiting sanction and power efficiency possible sizes of photo registering devices is carried out.

Keywords: photo registering devices, sensitivity, contrast, a field of vision, optical system.

Data on authors

- Vsevolod D. Smirnov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Scientific Research Institute of TV, St. Petersburg; E-mail: niit@infos.ru
- Ivan D. Egelsky* — Scientific Research Institute of TV, St. Petersburg; Engineer
- Aleksander E. Bendugovsky* — Cand. Techn. Sci.; Scientific Research Institute of TV, St. Petersburg

P. 60—65.

CALCULATION AND RESEARCH OF DOUBLE-MIRROR COMPOSITION OF OPTICAL SYSTEMS

The principle of finding of all possible variants of construction of double-mirror focusing compositions is offered, the generalized method and results of calculation of their design parameters are presented and the graphic way of simultaneous representation of results of calculation of many variants and their characteristics is offered.

Keywords: double-mirror composition, screening coefficient.

Data on authors

- Nguyen Quang Hiep* — Post-Graduate Student; Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Department of Light Engineering; E-mail: hiepmpei_79@mail.ru
Tatiana I. Yakushenkova — Cand. Techn. Sci.; Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Department of Light Engineering

P. 66—68.

ABERRATIONAL PROPERTIES OF REFLECTING SURFACE OF THE SECOND ORDER

Correctional opportunities in Zeidel area of reflecting surfaces of the second order are considered: parabolas, hyperboles and ellipse. On the basis of expressions for factors of aberrations of the third order the theorem of aberrational properties of these surfaces is formulated.

Keywords: aspherical reflecting surfaces, aberrations of the third order, aberration properties.

Data on authors

- Lev N. Andreev* — Dr., Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics
Yulia A. Komarova — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics

P. 69—73.

STRUCTURE OF SILICON NANOCUSTER WITHIN THE SYSTEM SILICON — SILICON OXIDE

It is shown, that the silicon nanoclusters within layers SiO₂ can have the various form and structure. In cases when silicon nanoclusters are formed on silicon substrates by methods nanolithography of surfaces with the subsequent thermal oxidation or a laser irradiation of the oxidized silicon, nanoclusters usually have crystal structure. At use of other methods of formation silicon nanoclusters for reception of diamondlike structures of these clusters, the additional processing is usually required, in particular, high-temperature anneal.

Keywords: nanocluster, nanocomposite, nanocrystal, structure of nanoclusters.

Data on authors

- Albert M. Skvortsov* — Dr., Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Designing;
E-mail: a-skvortsov@yandex.ru
Pham Quang Tung — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Designing;
E-mail: quang_tung@yahoo.com

P. 73—79.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF CHOICE MATERIALS AND SPUTTERING METHODS FOR GYRO-DEVICES UNITS

The article considers the main principles of choice materials and sputtering methods of functional coatings as applies to gyro-devices units. These principles follow from technical requirements to product, its geometrical and functional features and physic-mechanical and thermo-physical properties of coating material.

Keywords: thin-film coating, magnetron sputtering, thermic vacuum evaporation, position pickup, gyro-device.

Data on author

Sergey N. Belyaev — Central Scientific Research Institute „Elektropribor“, St. Petersburg;
E-mail: serenible@mail.ru