МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Выпуск 15

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2004

Выпуск содержит материалы XXXIII научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО.

Конференция была проведена 3–6 февраля 2004 г. Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики в сотрудничестве с

ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова,
Институтом аналитического приборостроения РАН,
Институтом проблем машиноведения РАН,
Комитетом по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга,
ВНИИМ им. Д.И. Менделеева,
ОАО «ЛОМО»,
ОАО «Техприбор»,
ОАО «Электроавтоматика»,
ЦНИИ «Электроприбор».

Программный комитет конференции:

Васильев В.Н. (СПбГИТМО (ТУ)) – председатель

Аронов А.М. (ОАО ЛОМО)
Викторов А.Д. (Администрация Санкт-Петербурга)
Гатчин Ю.А. (СПбГУ ИТМО)
Гуров И.П. (СПбГУ ИТМО)
Индейцев Д.А. (ИПМаш РАН)
Карасев В.Б. (ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова)
Козлов С.А. (СПбГУ ИТМО)
Колесников Ю.Л. (СПбГУ ИТМО)
Курочкин В.Е. (ИанП РАН)
Маслов Ю.В. (ОАО "Техприбор")
Мирошник И.В. (СПбГУ ИТМО)
Мусалимов В.М. (СПбГУ ИТМО)
Парамонов П.П. (ОАО «Электроавтоматика»)
Пешехонов В.Г. (ЦНИИ «Электроприбор»)
Путилин Э.С. (СПбГУ ИТМО)
Ханов Н.И. (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)
Храмов В.Ю. (СПбГУ ИТМО)
Шехонин А.А. (СПбГУ ИТМО)
Яковлев Е.Б. (СПбГУ ИТМО)

Организационный комитет конференции:

Никифоров В.О. – председатель
Студеникин Л.М. – зам. председателя
Казар Л.Н. – ученый секретарь

Горкина Н.М.
Гусарова Н.Ф.
Золотарев В.М.
Ленский А.В.
Метляков А.П.
Подлесных В.И.
Прудентова Т.А.
Савельева Л.П.
Ткалич В.Л.

.

ISBN 5-7577-0245-7

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка и совершенствование передовых технологий является одним из ключевых направлений деятельности современной науки. Настоящий выпуск «Научно-технического вестника СПбГУ ИТМО», как и предыдущие, содержит материалы XXXIII научной и учебно-методической конференции, проходившей 3–6 февраля 2004 года в нашем университете, и представляет результаты работ, проводимых по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ, результаты работ в рамках межвузовских научно-технических программ, грантов на проведение научно-исследовательских работ и инициативных научных исследований, выполненных в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики.

Выпуск носит название «Теория и практика современных технологий». В нем собраны материалы, содержащие научные результаты и отражающие практическую, технологическую направленность работ, выполняемых сотрудниками СПбГУ ИТМО, в том числе во взаимодействии с другими организациями.

Целый ряд работ посвящен разработке и реализации наукоемких технологий в медицине, в частности, вопросам биомедицинской оптики, а также технологиям экологического приборостроения и мониторинга. Представлены результаты исследований в традиционных для нашего Университета отраслях, связанных с технической оптикой и оптическими технологиями. Классические проблемы приборостроения решаются с активным использованием информационных технологий, что нашло отражение в выпуске. Рассмотрены подходы к созданию перспективных технологий, в том числе нанотехнологий, в физическом материаловедении.

Широко представлены результаты исследований и разработок новых технологий в электротехнике.

Особое внимание в выпуске уделено новым образовательным технологиям, в том числе проектированию, методическому и информационному обеспечению информационных образовательных ресурсов. О перспективности этого направления работы сотрудников Университета говорит тот факт, что среди авторов статей широко представлены аспиранты и студенты выпускных курсов Университета.

Доктор технических наук, профессор

И.П. Гуров

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ ВОЛНОВОДОВ

И.Ю. Попов, С.В. Фролов, К.С. Хрулев

Рассмотрена система трех волноводов, связанных через малые отверстия. Численными методами проанализированы резонансные эффекты при распространении волн в системе.

Рассмотрим уравнение Даламбера в системе 3 конечных волноводов G, связанных малыми отверстиями с условиями Дирихле на стенках:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = k^2 \Delta u, \tag{1}$$

$$u(x,t) = 0 \text{ для } x \in \Gamma, 0 \le t \le T, \tag{2}$$

$$u(x,0) = u_0(x), \tag{3}$$

$$\frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0 \text{ для } x \in \overline{G}. \tag{4}$$

Здесь Γ – внутренние и внешние границы волноводов, $\overline{G} = G + \Gamma$.

Для численного решения поставленной задачи воспользуемся методом суммарной аппроксимации. Основная идея этого метода состоит в следующем. Процесс приближенного решения многомерной задачи разбивается на несколько простых этапов, на каждом из которых решается простая задача, например, одномерная. При этом, несмотря на то, что каждая из промежуточных схем цепочки может не аппроксимировать исходную задачу, аппроксимация достигается за счет суммирования всех невязок. В нашем случае такой промежуточной задачей является трехточечная разностная задача (одномерное разностное уравнение 2-го порядка).

Вместо уравнения (1) будут рассматриваться следующие 2 уравнения:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 2k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 2k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}. \tag{6}$$

Аппроксимацию будем проводить на временной сетке ω_τ по аргументу t. Переход со слоя j на слой $j+1$ будет осуществляться в 2 этапа. На 1-ом этапе производится переход на слой $j+1/2$ с помощью уравнения (5). На 2-ом этапе решается уравнение (6) для перехода на слой $j+1$. Таким образом, на каждом из этих этапов будем рассматриваться одномерное уравнение. Такая схема называется локально-одномерной.

Разностную схему будем строить следующим образом. Введем декартову систему координат так, чтобы ось абсцисс совпадала с нижней стенкой 3-го волновода, а ось ординат – с торцевыми стенками волноводов. Построим в $\overline{G}$ сетку $\overline{\omega}_h$ с шагами $h_1 = L/N_1$, $h_2 = D/N_2$, где L и D – ширина и высота области G соответственно, N_1 и N_2 – целые положительные числа. Для этого построим 2 семейства прямых

$$x_1^{(i_1)} = i_1 h_1,\ \ i_1 = 0,1,\ldots,N_1,\ \ x_2^{(i_2)} = i_2 h_2,\ \ i_2 = 0,1,\ldots,N_2.$$

Точка пересечения прямых $x_1^{(i_1)}$ с прямыми $x_2^{(i_2)}$ назовем узлами. Шаги по вертикали и горизонтали h_1 и h_2 должны быть согласованы с размерами волноводов d_1, d_2, d_3 и полушириной отверстий a таким образом, чтобы на каждой границе волноводов находился ряд узловых точек и чтобы a было кратно h_1. Внешними узлами назовем узлы, принадлежащие Γ, а внутренними – не принадлежащие Γ. Совокупность всех внутренних узлов ω_h и граничных узлов γ_h назовем сеткой $\overline{\omega}_h = \omega_h + \gamma_h$.

Построим также временную сетку $\overline{\omega}_\tau$ с шагом $\tau = T/N_3$, где N_3 – целое положительное число.

На внутренних узлах $\omega_h \times \omega_\tau$ сетки $\overline{\omega}_h \times \overline{\omega}_\tau$ будем следующим образом аппроксимировать операторы $\dfrac{\partial^2}{\partial x_1^2}$ и $\dfrac{\partial^2}{\partial x_2^2}$:

$$2k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} \approx \Lambda_1(u(x,t) + u(x,t-\tau/2)),$$

$$2k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} \approx \Lambda_2(u(x,t+\tau/2) + u(x,t)),$$

где

$$\Lambda_1 u = \frac{k^2}{h_1^2}\big(u(x_1+h_1,x_2,t) - 2u(x_1,x_2,t) + u(x_1-h_1,x_2,t)\big),$$

$$\Lambda_2 u = \frac{k^2}{h_2^2}\big(u(x_1,x_2+h_2,t) - 2u(x_1,x_2,t) + u(x_1,x_2-h_2,t)\big).$$

В каждом временном узле $i_3\tau$, $i_3 = 1/2, 1, 3/2, \ldots, N_3 - 1/2$ дифференциальный оператор $\dfrac{\partial^2}{\partial t^2}$ будем аппроксимировать разностным оператором D_t^2:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \approx D_t^2 u = \frac{u(x_1,x_2,t+\tau/2) - 2u(x_1,x_2,t) + u(x_1,x_2,t-\tau/2)}{(\tau/2)^2},\ \ (x_1,x_2) \notin \Gamma.$$

Окончательно, ставим в соответствие задаче (1)–(4) разностную задачу Дирихле: найти сеточную функцию $y(x,t)$, определенную на $\overline{\omega}_h \times \overline{\omega}_\tau$, удовлетворяющую на внутренних узлах (на $\omega_h \times \omega_\tau$) уравнению

$$\frac{y^{j+1/2} - 2y^j + y^{j-1/2}}{\tau^2} = \frac{1}{4}\Lambda_1(y^{j+1/2} + y^{j-1/2}),\ j = 1,2,\ldots,N-1,\ x \in \omega_h, \tag{7}$$

$$\frac{y^{j+1} - 2y^{j+1/2} + y^j}{\tau^2} = \frac{1}{4}\Lambda_2(y^{j+1} + y^j),\ j = 0,1,\ldots,N-1,\ x \in \omega_h, \tag{8}$$

принимающую на границе γ_h нулевые значения,

$$y^{j-1/2} = y^j = 0,\ j = 1,2,\ldots,N_3,\ x \in \gamma_h \tag{9}$$

и удовлетворяющую начальным условиям:

$$y^0 = u_0(x), x \in \overline{\omega}_h, \tag{10}$$

$$\left(E - \frac{\tau^2}{4}\Lambda_1\right) y^{1/2} = u_0(x) + \frac{\tau^2}{8}\left(\Lambda_1 - \Lambda_2\right) u_0(x), x \in \omega_h. \tag{11}$$

Здесь $y^l = y(x, l\tau)$, E – тождественный оператор.

Результатом решения поставленной разностной задачи должен явиться, очевидно, 3-мерный массив размером $N_1 + 1 \times N_2 + 1 \times 2N_3 + 1$ вещественных чисел $\{y(i_1h_1, i_2h_2, i_3\tau)\}$, $i_1 = 0,1,...,N_1$, $i_2 = 0,1,...,N_2$, $i_3 = 0,1/2,1,3/2,...,N_3$. Вначале, в соответствии с (9), приписываются нулевые значения элементам массива, соответствующим внешним узлам пространственной сетки: $y(i_1h_1, i_2h_2, i_3\tau) = 0$, $(i_1h_1, i_2h_2) \in \gamma_h$, $i_3 = 0,1/2,1,3/2,...,N_3$. Далее заполнение массива происходит послойно. Нулевой слой заполняется в соответствии с (10). Для построения $1/2-$слоя используется трехточечная система линейных уравнений (11) относительно $y^{1/2}$. Для построения $1-$слоя используется система трехточечных уравнений относительно y^1, получаемая элементарными преобразованиями из (8) при $j = 0$. Аналогично, $y^{3/2}$ находится из (7) при $j = 1$. Далее, для построения следующих слоев поочередно используются уравнения (8) и (7). Заметим, что для построения y^{i_3} необходимо знать $y^{i_3-1/2}$ і y^{i_3-1}, так как в каждом из уравнений (7) и (8) задействованы по 3 слоя, поэтому схема (7)–(8) называется трехточечной аддитивной. Все трехточечные системы линейных уравнений решались методом прогонки.

В [2] показано, что схема (7)–(11) обладает суммарной аппроксимацией. Известно также ([2]), что ЛОС (7)–(11) сходится в сеточной норме W_2^1 со скоростью $O\left(\tau + |h|^2\right)$, если решение $u = u(x,t)$ имеет непрерывные в $\overline{G} \times [0 \le t \le T]$ производные по x_1, x_2 до 4-го порядка включительно и производные $\frac{\partial^4 u}{\partial x_1^4}$ и $\frac{\partial^4 u}{\partial x_2^4}$ удовлетворяют условию Липшица по t.

Для численного решения поставленной задачи была составлена компьютерная программа, которая на входе получала следующие данные: N_3, L (длина волноводов), d_1, d_2, d_3 (ширины волноводов), a (полуширина окна связи), h_1, h_2, τ, k. Кроме того, в соответствии с функцией $u_0(x)$, инициализировались значения функции y в узлах нулевого слоя. На выходе мы получаем полную информацию о значениях y во всех узлах сетки $\overline{\omega}_h \times \overline{\omega}_\tau$.

Полученные результаты также представлялись и в графической форме. Для каждого слоя строился график зависимости y^2 от i_1 и i_2. Построение графика происходило следующим образом. В двумерной декартовой системе координат значения i_1 откладывались по оси абсцисс, значения i_2 – по оси ординат. Точка с координатами (i_1, i_2) отображалась черным цветом, интенсивность которого зависела от значения функции y^2 в точке $(i_1h_1, i_2h_2, i_3\tau)$, где h_1, h_2, i_3, τ фиксированы. Чем больше было значение функции, тем чернее точка (см. рис. 1).

Чтобы значения функции y^2 в боковых волноводах попадали в диапазон, отображаемый графически, они были умножены на масштабный коэффициент.

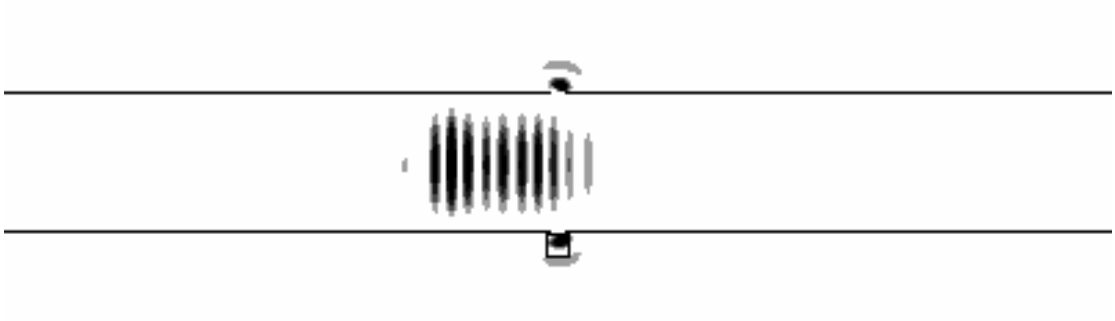


Рис. 1. Распределение энергии в системе трех волноводов и область численного интегрирования

Кроме того, для исследования явления резонанса было проведено численное интегрирование функции y^2 для каждого слоя. Область интегрирования представляла собой прямоугольную окрестность отверстия, соединяющего 2-ий и 3-ий волноводы (область отмечена на рис. 1); размеры прямоугольника были выбраны равными $8h_1 \times 8h_2$, таким образом, при интегрировании был задействован 81 узел сетки. На рис. 2 приведен график зависимости вычисленного значения этого интеграла от времени.

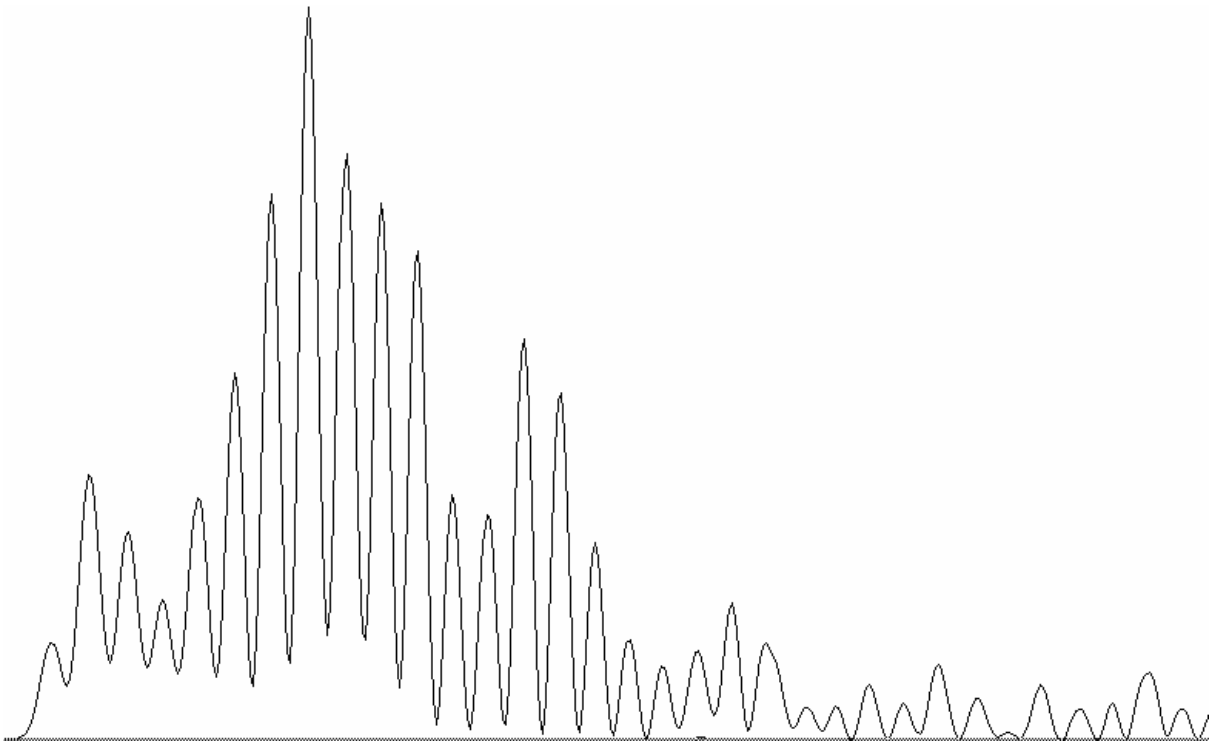


Рис. 2. Рассеяние энергии системы с течением времени

Для проверки результата та же задача была независимо решена при помощи явной разностной схемы.

Введем декартову систему координат: ось x_1 направлена вдоль центрального волновода, начало координат расположено так, что отверстия в стенках имеют координаты $(0, d_2/2)$ (верхнее) и $(0, d_2/2)$ (нижнее).

Непрерывную область определения G искомой функции u заменим сеткой

$\omega_h = \{x_{i,1} = ih, x_{i,2} = jh, i, j = 0,1,2,..\}$ с шагом h. Аналогично введем сетку $\omega_\tau = \{t_j = j\tau, j = 0,1,2,..\}$.

Для аппроксимации Δu используем разностный оператор Лапласа на 5-точечном шаблоне «крест» (12)

$$\Lambda y = \sum_{\alpha=1}^{p} \Lambda_\alpha y, \Lambda_\alpha y = y_{\bar{x}_\alpha x_\alpha}, \tag{12}$$

где

$$y_{\bar{x}_\alpha x_\alpha} = \frac{y^{(+1_\alpha)} - 2y + y^{(-1_\alpha)}}{h_\alpha^2}, y = y(x), y^{(\pm 1_\alpha)} = y(x^{(\pm 1\alpha)}), \tag{13}$$

$$x = (i_1 h_1, \ldots, i_p h_p) \in \omega_h, \tag{14}$$

$$x^{(\pm 1_\alpha)} = (i_1 h_1, \ldots, i_{\alpha-1} h_{\alpha-1}, (i_\alpha \pm 1) h_\alpha, i_{\alpha+1} h_{\alpha+1}, \ldots, i_p h_p). \tag{15}$$

Для аппроксимации $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ используем разностный оператор D_t^2 (5):

$$D_t^2 = \frac{u(x_1, x_2, t+\tau) - 2u(x_1, x_2, t) + u(x_1, x_2, t-\tau)}{\tau^2}. \tag{16}$$

Условие Дирихле на границе аппроксимируется точно при (условии согласования h с ширинами волноводов).

Начальное условие приближается при помощи выражений (6).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{y_1 - y_0}{\tau} \tag{17}$$

$$y_1 = y_0 + \psi(x_1, x_2)\tau \tag{18}$$

где $y_0 = u(x_1, x_2, 0)$ и y_1 – нулевой и первый слои.

Таким образом, вместо исходной задачи (1)–(4) получим явную разностную схему (8).

$$D_t^2 y = k^2 \Lambda y. \tag{19}$$

В [1] показано, что эта схема устойчива при $t \le kh/\sqrt{2}$.

Будем искать значения сеточной функции y, которые в моменты времени t_j в точках сетки совпадают со значениями искомой функции u. $y(t_{j+1})$ находится по формуле, получаемой при подстановке в (19) выражений (12) и (16).

Для решения этой задачи была написана программа, на вход которой подаются параметры системы (h, τ, ширины волноводов d_i, k, длина волноводов, число шагов по времени, полуширина отверстия a). В результате работы программы получаем значения $|y|^2$ в точках сетки. Кроме того, поскольку основной интерес представляет резонанс, возникающий в системе, для анализа скорости рассеяния энергии программа производит численное интегрирование $|y|^2$ в окрестности окошек.

Нужно отметить, что, так как при нахождении значения y в момент времени t_{j+1} значение $y(t_{j-1})$ используется только один раз, то мы можем хранить в памяти *два слоя*, а не три.

Полученные результаты подтверждают наличие резонанса в окрестностях нижних границ ветвей непрерывного спектра для системы трех волноводов, связанных че-

рез малые отверстия, которые ранее были обнаружены с помощью асимптотических методов [3]. При этом удается проследить за скоростью убывания энергии резонансного состояния, которая связана с величиной мнимой части соответствующего квазисобственного значения оператора Лапласа задачи Дирихле для данной области.

Работа поддержана Министерством образования Российской Федерации (грант T02-02.2-599) и программой «Интеграция».

Литература

1. Самарский А. А., Гулин А. В. Устойчивость разностных схем, М.:: Наука, 1973. 656 с.
2. Самарский А. А., Теория разностных схем, М.:: Наука, 1977. 416 с.
3. Popov I. Yu., Frolov S.V. Three laterally coupled quantum waveguides: breaking of symmetry and resonance asymptotics // J. Phys. A: Math. Gen. 2003. V. 36 P. 1655-1670

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И МЕХАНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГОЛОНОМНЫХ СИСТЕМ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ НА ВИБРИРУЮЩЕМ ОСНОВАНИИ

Г.И. Мельников, С.Е. Иванов

При исследовании динамики виброзащитных систем необходимо использовать нелинейные математические модели. Рассматривается актуальная задача и метод исследования нелинейных виброзащитных систем с тремя степенями свободы, с правыми частями в виде многочленов до четвертой степени от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. Методом многочленных преобразований уравнения движения системы приводится к автономному виду, выделяются существенные константы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы колебаний.

Дифференциальные уравнения движения виброзащитной системы запишем в общем виде:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = \sum_{|\mu|=1}^{4} g_\mu \cos(\omega t)^{\mu_1} \sin(\omega t)^{\mu_2} + \sum_{|\nu|=2}^{4} h_\nu \cos(\omega t)^{\nu_1} \sin(\omega t)^{\nu_2} q_1^{\nu_3} q_2^{\nu_4} q_3^{\nu_5} \dot{q}_1^{\nu_6} \dot{q}_2^{\nu_7} \dot{q}_3^{\nu_8}, \quad (1)$$

где $q = [q_1, q_2, q_3]^T$ – вектор обобщенных координат системы, A, B, C – матрицы третьего порядка, $\mu = (\mu_1\mu_2), \nu = (\nu_1\nu_2\nu_3\nu_4\nu_5\nu_6\nu_7\nu_8)$ – векторные индексы, $|\mu| = \mu_1 + \mu_2$, $|\nu| = \nu_1 + \nu_2 + ... + \nu_8$, $g_\mu = [g^1{}_\mu, g^2{}_\mu, g^3{}_\mu]^T$ $h_\nu = [h^1{}_\nu, h^2{}_\nu, h^3{}_\nu]^T$ – столбцы.

Предполагается, что характеристическое уравнение $Det[A\lambda^2 + B\lambda + C] = 0$ имеет сопряженные корни $\lambda_S, \overline{\lambda}_S$ с малыми отрицательными вещественными частями. Положим также, что компоненты вектора нелинейных частей $|g^S{}_\mu| < 1$, $|h^S{}_\nu| < 1$ малы.

Приведем алгоритм метода многочленных преобразований. Введем комплексно-сопряженные переменные $q_0 = \exp(i\omega t)$ и $\overline{q}_0 = \exp(-i\omega t)$, $\lambda_1 = i\omega$, тогда можно записать

$$\cos(\omega t) = \frac{1}{2}(q_0 + \overline{q}_0) \text{ и } \sin(\omega t) = \frac{1}{2i}(q_0 - \overline{q}_0). \quad (2)$$

Запишем систему (1), учитывая введенные комплексно-сопряженные переменные (2) в виде системы восьми дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\dot{X} = PX + R. \quad (3)$$

Вектор-столбец новых переменных $X = [q_0\overline{q}_0 q_1 q_2 q_3 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \dot{q}_3]^T$

Квадратная блочная матрица 8×8 имеет вид

$$P \equiv \begin{bmatrix} W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ A^{-1}H & -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A^{-1}G \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} i\omega & 0 \\ 0 & -i\omega \end{bmatrix},$$

где I – единичная диагональная матрица 3×3, 0 – нулевая матрица,

$H = [0.5(g_{10} - ig_{01}) \quad 0.5(g_{10} + ig_{01})]$,

$$G = \sum_{|\mu|=2}^{4} (-i)^{\mu_2} 0.5^{\mu_1+\mu_2} g_\mu (q_0 + \bar{q}_0)^{\mu_1} (q_0 - \bar{q}_0)^{\mu_2} +$$

$$\sum_{|\nu|=2}^{4} (-i)^{\nu_2} 0.5^{\nu_1+\nu_2} h_\nu (q_0 + \bar{q}_0)^{\nu_1} (q_0 - \bar{q}_0)^{\nu_2} q_1^{\nu_3} q_2^{\nu_4} q_3^{\nu_5} \dot{q}_1^{\nu_6} \dot{q}_2^{\nu_7} \dot{q}_3^{\nu_8}.$$

Выполняется линейное преобразование

$$Y = DX \ . \tag{4}$$

Линейная часть системы (3) приводится к диагональному виду:

$$\dot{Y} = \Lambda Y + R\Big|_{X \to D^{-1}Y}, \text{ где } \Lambda = diag[\lambda_1, \bar{\lambda}_1, ..., \lambda_4, \bar{\lambda}_4]. \tag{5}$$

Выполняется многочленное преобразование с точностью до членов четвертого порядка включительно:

$$y_S = z_S + \sum_{|\nu|=2}^{4} a_\nu^S Z^\nu, (s = 3,...,8), Z^\nu \equiv z_1^{\nu_1} z_2^{\nu_2} ... z_8^{\nu_8}, \tag{6}$$

где a_ν^S – неизвестные коэффициенты преобразования. Введенные комплексно-сопряженные переменные не преобразовываются

$$y_S = z_S \ (s = 1,2) \ .$$

Результатом многочленного преобразования является автономная система:

$$\dot{z}_S = \lambda_S z_S + \sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S Z^\nu, \ (s = 3,..., 8), \tag{7}$$

где q_ν^S – искомые коэффициенты преобразованной системы.

Особые значения индекса при фиксированном s находятся как целочисленные неотрицательные решения двух уравнений [1]:

$$\sum_{k=1}^{8} \lambda_k \nu_k - \lambda_S \approx 0, \ \sum_{k=1}^{8} \nu_k = 2,3,4 \ . \tag{8}$$

Постоянные q_ν^s приравнивают нулю при неособых значениях индексов; при таких значениях вычисляют постоянные a_ν^s. И наоборот, при особых значениях индексов полагают коэффициенты a_ν^s равными нулю и вычисляют q_ν^s.

В нерезонансном случае, когда собственные частоты колебаний системы и частота вибрации не совпадают и не кратны, находим следующие особые индексы:

при q_ν^3 : $\nu = (00100011), \nu = (00101100), \nu = (00210000), \nu = (11100000)$,

при q_ν^5 : $\nu = (00001011), \nu = (00002100), \nu = (00111000), \nu = (11001000)$,

при q_ν^7 : $\nu = (00000021), \nu = (00001110), \nu = (00110010), \nu = (11000010)$.

В преобразованной системе (7) сделаем замену переменных:

$$\begin{aligned} &z_{S,S+1} \equiv \rho_S Exp\big(i(t \operatorname{Im}\lambda_S \pm \theta_S)\big), \bar{z}_S = z_{S+1}, s = 3,5,7; \\ &z_{1,2} \equiv Exp(\pm it\omega). \end{aligned} \tag{9}$$

В результате систему (7) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} &\dot{\rho}_S = \operatorname{Re}(\lambda_S)\rho_S + \operatorname{Re}(\Psi), \ \dot{\theta}_S = \rho_S^{-1} \operatorname{Im}(\Psi), \ s = 3,5,7, \\ &\Psi = \sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S \rho_3^{\nu_3+\nu_4} \rho_5^{\nu_5+\nu_6} \rho_7^{\nu_7+\nu_8} Exp(i(\theta_3(\nu_3 - \nu_4) + \theta_5(\nu_5 - \nu_6) + \theta_7(\nu_7 - \nu_8) - \theta_S)). \end{aligned} \tag{10}$$

В нерезонансном случае экспонента не входит в систему (10), так как ее степень равна нулю. Стационарные решения можно найти, приравняв правые части системы (10) к нулю.

Получив решение преобразованной системы (10) и подставив его в формулы замены переменных (9), найдем вектор Z. Вектор Y выражается через вектор Z по

формулам многочленной замены (6). Вектор X выражается через вектор Y по формулам замены, обратной линейной: $X = D^{-1}Y$.

Получим алгоритмические формулы для расчета коэффициентов преобразования и преобразованной системы. Запишем систему (5) в переменных Z многочленного преобразования (6)

$$\dot{y}_S = \lambda_S z_S + \lambda_S \sum_{|\nu|=2}^{4} a_\nu^S Z^\nu + R_S(Z)\,. \tag{11}$$

Продифференцируем формулу многочленных преобразований (6), учитывая равенство (7) получим:

$$\begin{gathered}\dot{y}_S = \lambda_S z_S + \sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S Z^\nu + \sum_{|\nu|=2}^{4}(a_\nu^S Z^\nu \sum_{k=1}^{8}\lambda_k \nu_k) + \\ \sum_{|\nu|=2}^{4}(a_\nu^S Z^\nu \sum_{k=3}^{8}\nu_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^{4} q_\mu^k Z^\mu).\end{gathered} \tag{12}$$

Из формул (11) и (12) получим равенство:

$$\begin{gathered}\sum_{|\nu|=2}^{4} q_\nu^S Z^\nu + \sum_{|\nu|=2}^{4}(a_\nu^S Z^\nu (\sum_{k=1}^{8}\lambda_k \nu_k - \lambda_S)) + \\ \sum_{|\nu|=2}^{4}(a_\nu^S Z^\nu \sum_{k=3}^{8}\nu_k z_k^{-1} \sum_{|\mu|=2}^{4} q_\mu^k Z^\mu) = R_S(Z),\end{gathered} \quad (s = 3,...,8) \tag{13}$$

Приравнивая в (13) коэффициенты при одинаковых степенях Z, получаем систему алгебраических уравнений для определения неизвестных коэффициентов преобразования и преобразованной системы.

Для записи суммы по векторному индексу в программе использовано представление следующего вида:

$$\sum_{|\nu|=2}^{4} p_{\nu_1,\nu_2,\nu_3,\nu_4,\nu_5,\nu_6,\nu_7,\nu_8} = \sum_{i_8=2}^{4}\sum_{i_7=0}^{i_8}\sum_{i_6=0}^{i_7}\sum_{i_5=0}^{i_6}\sum_{i_4=0}^{i_5}\sum_{i_3=0}^{i_4}\sum_{i_2=0}^{i_3}\sum_{i_1=0}^{i_2} p_{i_1,i_2-i_1,i_3-i_2,i_4-i_3,i_5-i_4,i_6-i_5,i_7-i_6,i_8-i_7}\,. \tag{14}$$

На базе символьных преобразований многочленов была разработана программа для исследования методом многочленных преобразований нелинейных виброзащитных систем с тремя степенями свободы вида (1).

Рассмотрим виброзащитную систему с тремя степенями свободы с нелинейными правыми частями в виде многочлена третей степени от фазовых переменных с постоянными и периодическими параметрами. Система виброзащиты состоит из объекта виброзащиты массой m_1, установленного на две платформы, находящиеся одна под другой, их массы m_2 и m_3, нижняя из них закреплена на вибрирующем основании. Предполагается, что упругие элементы системы имеют вид полинома третей степени $kx + lx^2 + px^3$, демпфирующие элементы имеют нелинейную кубическую характеристику $c\dot{x} + d\dot{x}^3$. Внешнее гармоническое возмущение воздействует на основание. Для получения уравнений движения виброзащитной системы используем уравнения Лагранжа.

Система уравнений движения виброзащитной системы имеет вид:

$$\begin{gathered}m_1\ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + d_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^3 + k_1(x_1 - x_2) + l_1(x_1 - x_2)^2 + p_1(x_1 - x_2)^3 = 0, \\ m_2\ddot{x}_2 + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + d_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^3 + k_1(x_2 - x_1) - l_1(x_2 - x_1)^2 + p_1(x_2 - x_1)^3 + \\ c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + d_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^3 + k_2(x_2 - x_3) + l_2(x_2 - x_3)^2 + p_2(x_2 - x_3)^3 = 0, \\ m_2\ddot{x}_3 + c_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + d_2(\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^3 + k_2(x_3 - x_2) - l_2(x_3 - x_2)^2 + p_2(x_3 - x_2)^3 + \\ c_3(\dot{x}_3 - \dot{f}) + d_3(\dot{x}_3 - \dot{f})^3 + k_3(x_3 - f) + l_3(x_3 - f)^2 + p_3(x_3 - f)^3 = 0\end{gathered} \tag{15}$$

где x_1, x_2, x_3 – абсолютные перемещения по отношению к положению равновесия системы. На основание действуют вертикальные колебания:

$$f(t) = a\sin\,(\omega t). \qquad (16)$$

Введем относительное перемещение:

$$\tilde{x}_1 = x_1 - f,\ \tilde{x}_2 = x_2 - f,\ \tilde{x}_3 = x_3 - f\ . \qquad (17)$$

Запишем уравнения движения (15) в новых переменных:

$$m_1\ddot{\tilde{x}}_1 + c_1(\dot{\tilde{x}}_1 - \dot{\tilde{x}}_2) + d_1(\dot{\tilde{x}}_1 - \dot{\tilde{x}}_2)^3 + k_1(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2) + l_1(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2)^2 + p_1(\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2)^3 = -m_1\ddot{f}_1,$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_1(\dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_1) + d_1(\dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_1)^3 + k_1(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1) - l_1(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)^2 + p_1(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_1)^3 +$$

$$c_2(\dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_3) + d_2(\dot{\tilde{x}}_2 - \dot{\tilde{x}}_3)^3 + k_2(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_3) + l_2(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_3)^2 + p_2(\tilde{x}_2 - \tilde{x}_3)^3 = -m_2\ddot{f}, \qquad (18)$$

$$m_2\ddot{x}_3 + c_2(\dot{\tilde{x}}_3 - \dot{\tilde{x}}_2) + d_2(\dot{\tilde{x}}_3 - \dot{\tilde{x}}_2)^3 + k_2(\tilde{x}_3 - \tilde{x}_2) - l_2(\tilde{x}_3 - \tilde{x}_2)^2 + p_2(\tilde{x}_3 - \tilde{x}_2)^3 +$$

$$c_3\dot{\tilde{x}}_3 + d_3\dot{\tilde{x}}_3^{\,3} + k_3\tilde{x}_3 + l_3\tilde{x}_3^{\,2} + p_3\tilde{x}_3^{\,3} = -m_3\ddot{f}$$

$$\ddot{f}(t) = -a\omega^2\sin(\omega t). \qquad (19)$$

Выполним многочленное преобразование системы (18) согласно схеме. Запишем систему уравнений в матричной форме:

$$\dot{X} = RX + P,$$

где

$$X = [\exp(i\omega t), \exp(-i\omega t), \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \dot{\tilde{x}}_1, \dot{\tilde{x}}_2, \dot{\tilde{x}}_3]^T, \qquad (20)$$

а P – нелинейный вектор системы. В результате линейной замены переменных

$$Y = AX \qquad (21)$$

получим систему с линейной диагональной матрицей вида

$$\dot{Y} = \Lambda Y + \tilde{P}. \qquad (22)$$

Выполним многочленную замену переменных:

$$y_S = z_S + \sum_{|\nu|=2}^{4} a_\nu^S Z^\nu, (s = 3,...,8),\ y_S = z_S\ \ (s = 1,2),\ Z^\nu \equiv z_1^{\nu_1} z_2^{\nu_2} z_3^{\nu_3} z_4^{\nu_4} z_5^{\nu_5} z_6^{\nu_6} z_7^{\nu_7} z_8^{\nu_8}\ . \qquad (23)$$

С точностью до членов четвертого порядка получаем автономную дифференциальную систему:

$$\dot{z}_3 = (\lambda_3 + q^3_{11100000})z_3,\ \dot{z}_5 = (\lambda_5 + q^5_{11001000})z_5\ ,\dot{z}_7 = (\lambda_7 + q^7_{11000010})z_5 \qquad (24)$$

Решение системы записывается в виде:

$$z_{3,4} \equiv \rho_{01}\exp(t\,\mathrm{Re}(\lambda_3 + q^3_{11100000}) \pm i(\theta_{01} + t\,\mathrm{Im}(\lambda_3 + q^3_{11100000}))),$$

$$z_{5,6} \equiv \rho_{02}\exp(t\,\mathrm{Re}(\lambda_5 + q^5_{11001000}) \pm i(\theta_{02} + t\,\mathrm{Im}(\lambda_5 + q^5_{11001000}))), \qquad (25)$$

$$z_{7,8} \equiv \rho_{03}\exp(t\,\mathrm{Re}(\lambda_7 + q^7_{11000010}) \pm i(\theta_{03} + t\,\mathrm{Im}(\lambda_7 + q^7_{11000010}))).$$

Получим переходный и установившийся режимы колебаний виброзащитной системы (18) при следующих параметрах:

$$m_1 = 1.13, c_1 = 0.23, d_1 = 0.01, k_1 = 1.23, l_1 = 0.04, p_1 = 0.02,$$

$$m_2 = 3.17, c_2 = 0.61, d_2 = 0.03, k_2 = 3.13, l_2 = 0.13, p_2 = 0.06,$$

$$m_3 = 8.71, c_3 = 1.73, d_3 = 0.09, k_3 = 9.11, l_3 = 0.37, p_3 = 0.17$$

На систему действует внешнее возмущение : $\omega = 2, a = 0.5$. Определены коэффициенты преобразованной автономной системы (24)

$$q^3_{11100000} = -0.086 + 0.011i, q^5_{11001000} = -0.154 + 0.012i, q^7_{11000010} = -0.044 + 0.001i\ .$$

Тогда решение системы (24) записывается в виде:

$$z_{3,4} \equiv \rho_{01}\exp(-0.297t \pm i(\theta_{01} + 1.480t)),$$

$$z_{5,6} \equiv \rho_{02}\exp(-0.273t \pm i(\theta_{02} + 1.130t)),$$

$$z_{7,8} \equiv \rho_{03}\exp(-0.083t \pm i(\theta_{03} + 0.635t)).$$

а установившийся режим колебаний системы имеет вид

$$x_1 = -0.035\cos(\omega t) - 0.470\sin(\omega t),$$

$$x_2 = -0.113\cos(\omega t) - 0.526\sin(\omega t),$$

$$x_3 = -0.261\cos(\omega t) - 0.612\sin(\omega t).$$

Установившиеся вынужденные колебания системы происходят с частотой внешней силы.

Вынужденные колебания в начале установления являются квазипериодическими.

Таким образом, методом многочленных преобразований уравнения движения системы приводятся к автономному виду в рамках принятой точности. В нерезонансном случае получено решение преобразованной системы. Выделяются существенные константы, характеризующие переходные процессы и установившиеся режимы колебаний.

Метод позволяет получить достаточно подробные качественные и количественные характеристики изучаемых движений, исследовать установившиеся режимы колебаний для систем, находящихся в условиях периодического внешнего воздействия, а также изучать переходные процессы.

Литература

1. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л: Машиностроение, 1975. 198 с.
2. Мельников Г.И. К теории нелинейных колебаний. // Вестник ЛГУ. 1964. № 1. Вып.1. С. 88–-98.
3. Фролов К.В. Нелинейные задачи динамики машин. М: Машиностроение, 1992. 376 с.
4. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М: Наука, 1981. 568 с.
5. Вибрации в технике. Справочник в 6-ти т. Т.6. / Под ред. К.В. Фролова М.: Машиностроение, 1995. 456 с.
6. Фурман Ф.А., Фролов К.В. Прикладная теория виброзащитных систем. М: Машиностроение, 1980. 317с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКОНОМИЗАЦИИ К.ЛАНЦОША ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В.Г. Мельников

Рассматривается голономная стационарная механическая система с одной степенью свободы с автономными нелинейными полиномиальными характеристиками относительно фазовых переменных. Развивается метод многочленных преобразований с включением в него τ-метода экономизации, который с повышенной точностью преобразует исходное уравнение к линейному виду при определенных ограничениях на константы исходного уравнения.

Рассмотрим голономную стационарную механическую систему с одной степенью свободы, движение которой подчинено автономному дифференциальному уравнению второго порядка, содержащему нелинейную функцию в виде однородной кубической формы:

$$\ddot{q} + a_1\dot{q} + a_0 q + \varepsilon Q(q,\dot{q}) = 0 \quad \text{при} \quad Q = \sum_{k_1+k_2=3} a_{k_1k_2} q^{k_1}\dot{q}^{k_2}, \quad [q,\dot{q}] \in D. \qquad (1)$$

Здесь $[q,\dot{q}]$ – фазовый вектор объекта, ε – малый параметр, $|\varepsilon| < 1$, $a_{k_1k_2}$ – постоянные коэффициенты. Кубическая форма в математической модели объекта появляется в результате аппроксимации в конечной области фазового пространства нелинейных нечетных характеристик обобщенных сил или моментов сил. Развернутый вид кубической формы:

$$Q = a_{30}q^3 + a_{21}q^2\dot{q} + a_{12}q\dot{q}^2 + a_{03}q\dot{q}^3.$$

Предполагаем, что уравнение (1) описывает движение реальной механической системы неточно, с точностью до величин порядка ε^2, и поэтому допустимо изменение нелинейной функции в малых пределах.

Считаем, что уравнение (1) задано на фазовой плоскости в квадрате

$$D = \{[q,\dot{q}] : |q| \le 1, |\dot{q}| \le 1\}.$$

Заметим, что любая прямоугольная область $D_1 = \{[q_1,\dot{q}_1]: \ |q_1| \le a, |\dot{q}_1| \le b\}$ отображается на квадрат D линейной заменой переменных вида $q_1 = aq, t = \tau a/b$. Примером динамического уравнения вида (1) может служить физический маятник в случае аппроксимации синуса угла отклонения $\sin\varphi \approx \varphi - \varphi^3/6$.

Корни $\lambda_{12} = -a_1/2 \pm i\sqrt{c-(a_1/2)^2}$ характеристического уравнения линейной части предполагаются комплексными, имеющими существенно отрицательную вещественную часть. Допускается также случай двух вещественных существенно отрицательных корней. Дополнительно предполагается отсутствие внутреннего резонанса третьего порядка, т.е. предполагается существенное неравенство нулю восьми выражений

$$(k_1-1)\lambda_1 + k_2\lambda_2 \ne 0, \quad k_1\lambda_1 + (k_2-1)\lambda_2 \ne 0, \quad \forall\, k_1+k_2 = 3. \qquad (2)$$

При этих условиях, применяя метод Пуанкаре-Дюлака в конечной форме, можно выполнить нелинейное преобразования переменных, содержащее кубическую форму. В результате в дифференциальном уравнении (1) исключаются однородные кубические формы порядка ε, но появляются однородные формы пятой, седьмой и девятой степеней с общим множителем ε^2. Преобразование выполняется посредством перехода к комплексным каноническим фазовым переменным, подстановки в систему уравнений новых переменных и составления алгебраических уравнений, определяющих коэффициенты преобразования. Здесь мы выполним многочленное преобразование непосредственно в исходных вещественных переменных. При этом дополнительно внесем в

процесс преобразования процедуру аппроксимации остаточных членов однородными кубическими формами по τ- методу, предложенному К. Ланцошем [1]. В результате получим скорректированный метод полиномиальной линеаризации, поскольку в преобразованных уравнениях будут отброшены существенно меньшие величины, имеющие порядок ε^3. Вместе с тем модифицированный метод приводит к некоторому усложнению расчетных формул для коэффициентов многочленного преобразования.

Итак, потребуем, чтобы в новых фазовых переменных $[y, \dot{y}]$ преобразованное динамическое уравнение с точностью до членов порядка ε^3 было линейным,

$$\ddot{y} + b_1\dot{y} + b_0 y = 0, \tag{3}$$

в единичном квадрате новой фазовой плоскости

$$[y, \dot{y}] \in D_2 = \{[y, \dot{y}]: \quad |y| \le 1, |\dot{y}| \le 1\} \ . \tag{4}$$

Коэффициенты b_0, b_1 подлежат определению, они отличаются от a_0, a_1 на малые величины. Обобщенную координату q свяжем с новой координатой формулой многочленного кубического преобразования

$$q = y + \varepsilon c_{k_1 k_2} y^{k_1} \dot{y}^{k_2} \quad \text{при} \quad k_1 + k_2 = 3 \ . \tag{5}$$

Здесь и в дальнейшем для краткости опущен знак суммирования по повторяющимся индексам, что принято в литературе. Ограничения на индексы суммирования k_1, k_2 указаны в формуле (5). Отметим, что единичная область D_2 на фазовой плоскости $[y, \dot{y}]$ не является точным отображением области D.

Выразим производные $\dot{q}, \ddot{q}$ через $y, \dot{y}$, применяя соотношение (3) и переобозначая индексы суммирования k_1, k_2 на k'_1, k'_2, чтобы использовать индексы k_1, k_2 в конечных формулах. Получим

$$\dot{q} = \dot{y} + \varepsilon c_{k'_1 k'_2} k'_1 \, y^{k'_1 - 1} \dot{y}^{k'_2 + 1} - \varepsilon c_{k'_1 k'_2} k'_2 \, y^{k'_1} \dot{y}^{k'_2 - 1} (b_0 y + b_1 \dot{y})$$

Окончательно,

$$\dot{q} = \dot{y} + \varepsilon c^1_{k_1 k_2} y^{k_1} \dot{y}^{k_2} \quad \text{при} \quad k_1 + k_2 = 3, \tag{6}$$

где

$$c^1_{k_q k_2} = (k_1 + 1) c_{k_1+1, k_2-1} - b_1 k_2 c_{k_1 k_2} - b_0 (k_2 - 1) c_{k_1-1, k_2+1} \tag{7}$$

По аналогии с (6)–(7) составляем выражение для второй производной:

$$\ddot{q} = \ddot{y} + \varepsilon c^2_{k_1 k_2} y^{k_1} \dot{y}^{k_2} \quad \text{при} \quad k_1 + k_2 = 3, \tag{8}$$

где

$$c^2_{k_q k_2} = (k_1 + 1) c^1_{k_1+1, k_2-1} - b_1 k_2 c^1_{k_1 k_2} - b_0 (k_2 - 1) c^1_{k_1-1, k_2+1} \tag{9}$$

В выражениях (7), (8) следует приравнивать нулю все константы, имеющие хотя бы один отрицательный индекс, например, $c_{k_1+1, k_2-1} = 0$ при $k_2 = 0$.

Преобразуем многочлен Q к новым переменным путем подстановки в него выражения (5), (6) и удержания членов порядка ε. Получим приближенное выражение

$$Q(q, \dot{q}) = Q(y, \dot{y}) + \varepsilon Q_5(y, \dot{y}) \quad \text{при} \quad Q_5 = \sum_{k_1 + k_2 = 5} a^{(1)}_{k_1 k_2} y^{k_1} \dot{y}^{k_2} \ . \tag{10}$$

В каждом одночлене однородной формы пятой степени Q_5, зависящей от двух переменных, непременно имеется одна из переменных третей степени – либо q^3, либо $\dot{q}^3$. Поэтому многочлен Q_5 можно разбить на два многочлена:

$$Q_5 = y^3 \sum_{k_1 + k_2 = 2} a^{(2)}_{k_1 k_2} y^{k_1} y^{k_2} + \dot{y}^3 \sum_{k_1 + k_2 = 2} a^{(3)}_{k_1 k_2} y^{k_1} y^{k_2} \quad \text{при} \quad [y, \dot{y}] \in D_2 . \tag{11}$$

Применим τ - метод К. Ланцоша [1–3], позволяющий аппроксимировать полиномы высоких степеней полиномами меньших степеней, связанный со среднеквадратичными аппроксимациями П.Л. Чебышева. В данном случае применим аппроксимации

$$y^3 = \frac{3}{4}y + \frac{1}{4}\cos(3\arccos y) \approx \frac{3}{4}y \quad \text{при} \quad y \in [-1,1];$$
$$\dot{y}^3 \approx \frac{3}{4}\dot{y} \qquad \text{при} \quad \dot{y} \in [-1,1]. \tag{12}$$

По существу, приближение (12) есть гармоническая линеаризация величин y^3 и $\dot{y}^3$ на единичных интервалах. Подставим среднеквадратичную аппроксимацию (12) в выражения (10), (11) и приведем подобные члены. Получим окончательно представление кубической формы, входящей в уравнение (1), в новых переменных:

$$Q\ (q,\dot{q}) = \sum_{k_1+k_2=3}(a_{k_1k_2} + \varepsilon\tilde{a}_{k_1k_2})y^{k_1}y^{k_2}. \tag{13}$$

Подставим выражение (13) в уравнение (1). Получим математическую модель механического движения, где ε-малые величины аппроксимированы в классе функций (4), содержащем подлежащие определению константы:

$$\ddot{q} + a_1\dot{q} + a_0 q + \varepsilon \sum_{k_1+k_2=3}(a_{k_1k_2} + \varepsilon\tilde{a}_{k_1k_2})y^{k_1}\dot{y}^{k_2} = 0. \tag{14}$$

Затем подставим в полученное на этом этапе динамическое уравнение выражения в новых переменных (5), (6), (8), приведем подобные члены и приравняем нулю коэффициенты при каждом одночлене третьей степени, а также учтем уравнение (3). Получим нелинейную замкнутую систему алгебраических уравнений для определения коэффициентов преобразования (5), содержащую линейную часть и нелинейные члены в виде произведений искомых величин. Если в системе отбросить члены порядка ε^2, то система становится линейной с существенно не равным нулю определителем при выполнении условия (3). Решение такой линейной системы известно в комплексной форме [3–5]. Приближенное решение нелинейной алгебраической системы находится посредством решения соответствующей линейной системы и однократной итерации.

Модифицированный метод полиномиальной линеаризации уравнения (1) содержит процедуры подстановки многочленов в многочлен, упрощения выражений, конкатенацию матриц и решение алгебраической системы. Эти процедуры выполняются в пакете Symbolic Math систем Maple, Mathematica, Matlab. Изложенный метод применен при исследовании нелинейных колебаний одностепенной механической системы.

Литература

1. Ланцош К. Параметрические методы прикладного анализа. М.: Физматлит, 1961.
2. Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1968.
3. Мельников Г.И. Динамика нелинейных механических и электромеханических систем. Л.: Машиностроение, 1975.
4. Брюно А.Д. Нормальная форма дифференциальных уравнений с малым параметром. // Матем. заметки, 1986. 40. Вып.3. С. 385–392.
5. Климов В.Ю. Методы теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1996.
6. Мельников В.Г. Полиномиальная линеаризация систем модального управления и ее применение / Научно-технический вестник СПбГТМО(ТУ). Вып.3. 2001. С.17-19.
7. Melnikov V.G. Analysis of transient performance of system with unknown inertia load. // Prepr. 8-th International Student Olympiad on Automatic Control. St.Petersburg, 2000. P.167-171.
8. Параметрические критерии фильтрационных свойств систем управления. // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. №3. С. 25-28.

3 КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОМЕДИЦИНСКАЯ ОПТИКА

ДИНАМИКА ТВЕРДЫХ МАКРОЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ В ПОЛЕ СУБМИЛЛИСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА YAG:ER ЛАЗЕРА

А.В. Беликов

Измерена скорость сапфировых частиц, ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера. Описана оригинальная система измерения скорости. Показано, что для ускорения частиц сапфира, помещенных в воду (суспензия), требуется энергия практически в два раза меньшая, чем для ускорения частиц сапфира, содержащих только воду, абсорбированную поверхностью (порошок). Установлено, что скорость частиц распределена неравномерно в течение времени действия лазерного импульса.

Идея о возможности светового давления восходит к Кеплеру, который в 1619 году постулировал, что световое давление является той силой, которая определяет положение хвоста кометы всегда в сторону от солнца. Корпускулярная теория света, предложенная Ньютоном, сделала идею светового давления более правдоподобной и стимулировала многочисленные попытки его экспериментального измерения. В XVIII и XIX веках все попытки обнаружить световое давление или силу, которая не могла бы быть приписана конвекции в воздухе, окончились неудачей. В 1873 году Уильям Крукс полагал, что открыл световое давление в частично эвакуированной камере, хотя в действительности он изобрел радиометр. Существование светового давления, свободного от возмущающих тепловых эффектов, было, наконец, экспериментально доказано в начале нашего века Лебедевым в России и Николсом и Хэллом в США [1].

Световое давление вновь привлекло внимание в свете новых достижений лазерной техники. Еще в 1962 году в статье [2] было показано, что мощный световой луч способен оказывать сильное действие на заряженные и поляризующиеся частицы, причем сила может менять знак при переходе через резонансную частоту поляризуемости. Были отмечены возможности применения такого воздействия для сдерживания перепада концентрации частиц, транспортировки частиц, создания разрежений или сгущений в средах. В то же время в работе [3] было показано, что с поглощением света в облучаемой частице могут быть связаны три типа сил: нагрев и движение самой среды – конвекционное увлечение, нагрев среды от поглощающей поверхности частицы – радиометрическое давление, и давление от испарения самой частицы – светореактивное давление. Все эти эффекты могут во много раз превосходить световое давление и проявляться с большой вероятностью в экспериментах. При этом светореактивное давление может достигать 10^{12} атмосфер. Такое давление можно использовать, в частности, для ускорения макрочастиц [4] до скоростей 10^6–10^8 см/с для получения искусственных микрометеоров – частиц, дающих большие локальные энерговыделения при столкновениях с мишенью или друг с другом. Подобные частицы могут быть использованы для обработки композитных материалов (в том числе биологического происхождения) в тех случаях, когда возможности традиционных или лазерных технологий уже исчерпаны. Так, возможно использование потока Al_2O_3 частиц, ускоренных лазерным излучением, для увеличения скорости обработки эмали зуба человека [5]. В этом случае вода, окружающая частицы (суспензия) или абсорбированная поверхностью частиц (порошок), очень эффективно поглощая излучение на длине волны 2.94 мкм, испаряется, стимулируя тем самым светореактивное движение частицы. В настоящей работе мы впервые экспериментально исследовали влияние плотности лазерной энергии на скорость твердых сапфировых частиц, ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера, определили энергии, достаточные для ускорения сапфировых частиц различно-

го диаметра, и оценили распределение скорости частиц по времени, прошедшему с момента лазерного воздействия.

В исследовании использовался макет лазера на кристалле YAG:Er (∅6.3×100 мм), работающий в режиме свободной генерации на длине волны 2.94 мкм. Длительность лазерного импульса по полувысоте составляла величину порядка 250 мкс. Излучение, проходя через CaF_2 линзу, фокусировалось в пятно диаметром 600±50 мкм, что позволяло достигать плотность энергии 250 Дж/см^2. В качестве твердых частиц использовался сверхчистый Al_2O_3 порошок фирмы Swam-Blast. Паспортная плотность материала частиц составляла величину 3.97×10^3 кг/м^3. Диаметр частиц соответствовал 12, 27, 40 и 160 мкм.

Мы исследовали порошок и водную суспензию частиц. Водная суспензия готовилась в следующей пропорции: в 300 мг частиц добавлялось 0.2 мл воды. В эксперименте частицы в виде порошка или суспензии помещались в стеклянную кювету, дно которой было изготовлено из сапфира. Толщина слоя твердых частиц была 200±50 мкм. Лазерное излучение фокусировалось в плоскость контакта между твердыми частицами и дном кюветы. Ускоренные лазерным излучением твердые частицы покидали область взаимодействия и фотографировались высокочувствительной видеокамерой MINTRON с управляемым затвором, сопряженной с ЭВМ и блоком синхронизации. Оптическая ось объектива видеокамеры была перпендикулярна направлению распространения лазерного луча и проходила через область взаимодействия лазерного излучения с частицами. Блок синхронизации вырабатывал стартовый синхроимпульс, инициирующий лазерную генерацию и кадровый синхроимпульс. Мы могли изменять временной сдвиг Δt_L между началом кадрового синхроимпульса (t_o) и началом лазерного импульса (t_L). Время экспозиции, т.е. время, в течение которого затвор камеры остается открытым, могло быть изменено от 100 мкс до 2 мс и в настоящем эксперименте составляло величину 500 мкс. В эксперименте также можно было изменять временной сдвиг Δt_S между началом кадрового синхроимпульса (t_o) и моментом открытия затвора видеокамеры (t_S). Таким образом, в течение 500 мкс можно было сфотографировать события, происходящие спустя промежуток времени Δt_S. В эксперименте, сокращая Δt_S, мы добивались отсутствия изображения скопления разлетающихся частиц на экране монитора, при этом незначительное увеличение t_S приводило к появлению изображения. Этот момент времени t_1 мы принимали за начало процесса движения частиц. Оценив разность между t_L и t_1, мы определяли задержку между началом лазерного импульса и началом движения частиц. Далее, увеличивая t_S, мы могли регистрировать скопление разлетающихся частиц в течение времени Δt, определяемого разностью между t_S и t_1. ЭВМ использовалась для управления блоком синхронизации, сбора, хранения и обработки получаемых в эксперименте фотографий.

На полученных фотографиях измерялась длина наиболее интенсивных треков, оставляемых разогретыми в поле лазерного импульса твердыми частицами, летящими в направлении близком к нормали к поверхности слоя частиц, что позволяло минимизировать неточность в определении длины трека, вызванную разлетом частиц под углами. Зная Δt и длину трека, можно, поделив длину на время, легко определить среднюю скорость движения частиц за этот промежуток времени.

В эксперименте мы определили пороговое значение плотности лазерной энергии, при котором начинается движение частиц различного диаметра. Оказалось, что для ускорения частиц диаметром 12 мкм из суспензии достаточно 0.3 Дж/см^2, а для ускорения частиц диаметром 12 мкм из порошка необходимо уже 0.7 Дж/см^2. Для ускорения частиц диаметром 27 мкм из порошка необходимо 1.5 Дж/см^2, для ускорения частиц диа-

метром 40 мкм – 2.2Дж/см^2, а для частиц диаметром 160 мкм – 6.0 Дж/см^2. Другими словами, для ускорения частиц сапфира, помещенных в воду (суспензия), требуется энергии практически в два раза меньше, чем для ускорения частиц сапфира, содержащих только воду, абсорбированную поверхностью (порошок).

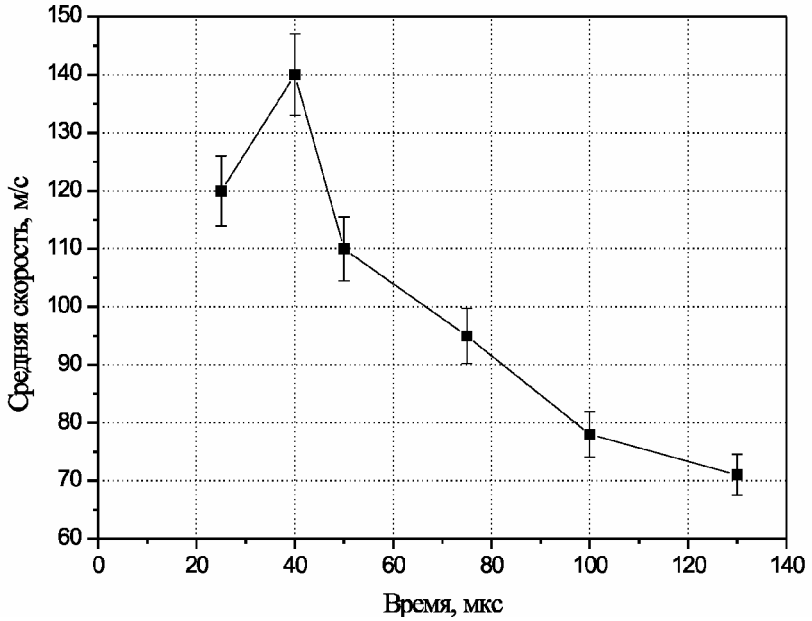


Рис. 1. Зависимость средней скорости движения частиц от времени, прошедшего после начала лазерного импульса (порошок из частиц Al_2O_3 диаметром 12 мкм, YAG:Er лазер, плотность энергии 135 Дж/см^2).

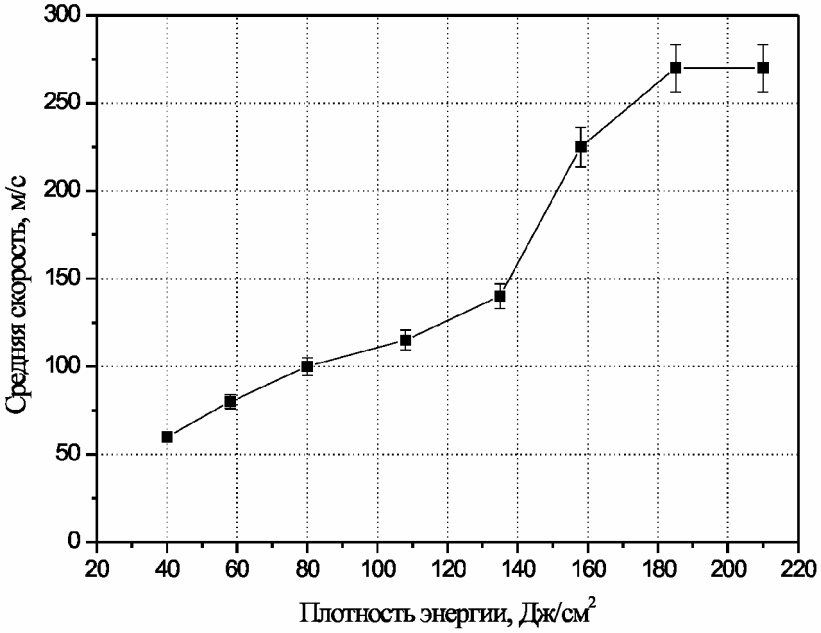


Рис.2. Зависимость средней скорости движения частиц от плотности энергии лазерного импульса (порошок из частиц Al_2O_3 диаметром 12 мкм, YAG:Er лазер, скорость регистрировалась спустя 40 мкс после начала действия лазерного импульса).

Мы экспериментально установили, что скорость частиц распределена неравномерно в течение времени действия лазерного импульса (рис. 1) и увеличивается с ростом плотности энергии лазерного излучения (рис. 2). Так, для частиц Al_2O_3 диаметром 12 мкм скорость в течение времени действия лазерного импульса сначала резко растет,

на сороковой микросекунде достигает максимума и далее постепенно уменьшается к концу лазерного импульса, кроме того, частицы продолжают двигаться после окончания лазерного импульса. Необходимо отметить, что подобная закономерность наблюдалась и для частиц других диаметров. В поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера непоглощающая частица из Al_2O_3, окруженная водой, абсорбированной поверхностью (порошок), может быть ускорена до скорости 275 м/с, что при диаметре частицы 12 мкм соответствует кинетической энергии порядка 0.27 мкДж, достаточной для разрушения такого твердого материала, как эмаль зуба [5].

Литература

1. Nichols E.F., Hull G. F.// Phys. Rev., 1903.V. 17. P. 26
2. Arthur Ashkin, The pressure of Laser light.// Scientific American. 1972. V. 226(2). P. 63. Аскарьян Г.А., Мороз, Е.М. Давление при испарении вещества в луче радиации // Письма в редакцию ЖЭТФ.1962 №12. С.2319
3. Аскарьян Г.А., Рабинович М.С, Савченко М.М., Степанов В.К., Студенов В.Б. Светореактивное ускорение макрочастиц вещества. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Т.5. С 258.
4. Altshuler G.B., Belikov A.V., Sinelnik Y.A. A Laser-Abrasive method for the cutting of enamel and dentin. // Lasers in Surgery and Med. 2001. V. 28. P. 435–444.

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ДИФФУЗИЯ ПИЩЕВЫХ КИСЛОТ В ГИДРОКСИЛАПАТИТЕ

А.В. Беликов, А.В. Скрипник

В работе экспериментально измерена скорость диффузии пищевой лимонной кислоты в эмали зуба человека. Исследована взаимосвязь скорости диффузии, температуры и кислотности водного раствора пищевой лимонной кислоты. Обсуждается эффективность светоиндуцированного нагрева водного раствора пищевой лимонной кислоты.

Гидроксилапатит является основным неорганическим компонентом большинства биологических композитов, к числу которых относятся эмаль и дентин зуба человека [1]. Помещение гидроксилапатита в среду с низким уровнем pH способствует его растворению с образованием трикальцийфосфата. Воздействие кислоты на эмаль зуба человека также приводит к растворению содержащегося в ее призмах гидроксилапатита. Этот эффект имеет как негативное, так и позитивное результирующее действие. Несомненно, негативным является разрушение эмали при кариесе [2], когда кислота, образуясь как продукт жизнедеятельности бактерий, является своего рода катализатором, ускоряющим процесс разрушения эмали. Позитивным является использование кислот на этапе подготовки поверхности эмали перед постановкой реставративной пломбы из светополимеризуемого материала [3]. При этом кислота, в большинстве случаев ортофосфорная, разрушая межпризменные промежутки, способствует росту шероховатости поверхности эмали, повышает адгезию пломбировочного материала к поверхности, увеличивая срок службы пломбы. К недостаткам этого метода можно отнести его низкую селективность, так как при травлении могут пострадать мягкие ткани. В настоящей работе мы исследовали пищевые кислоты как наиболее биосовместимые [4]. Мы оценили скорость диффузии наиболее распространенной из пищевых кислот – лимонной [5].

Нас интересовала возможность повышения селективности кислотного травления эмали за счет избирательного нагрева кислоты в месте ее аппликации на эмаль зуба.

Пищевые кислоты являются безопасными для человеческого организма в связи с отсутствием сильного раздражающего действия на слизистые пищеварительного тракта и мягкие ткани ротовой полости.

Подобное название кислоты получили по причине их активного участия в процессах обмена веществ в живых клетках, а также из-за частого использования в пищевой промышленности. В данной группе кислот выделяют так называемые карбоновые кислоты, т.е. органические соединения, содержащие одну или несколько карбоксильных групп COOH. К числу наиболее распространенных пищевых кислот можно отнести винную ($C_4H_6O_6$), лимонную ($C_6H_8O_7$), молочную ($C_3H_6O_3$), сорбиновую ($C_6H_6O_2$), уксусную ($C_2H_4O_2$) и яблочную ($C_4H_6O_5$). Из этого ряда наибольшая температура плавления (153 ^oC) принадлежит лимонной, а наибольшая температура кипения (228 ^oC) – сорбиновой кислотам.

В эксперименте мы использовали свежеэкстрагированные по ортодонтическим показателям зубы человека. Вплоть до начала эксперимента, но не более 2 недель, образцы хранились в физиологическом растворе.

Поверхность коронки зуба разделялась на две равные области. Одна область покрывалась нерастворимым лаком, что препятствовало проникновению кислоты. Вторая область оставалась открытой. Образец помещался в кювету с водным раствором лимонной кислоты на определенные промежутки времени. Раствор кислоты мог иметь контролируемый уровень pH и температуру. После изъятия из раствора зуб промывался дистиллированной водой в течение двух минут, далее алмазным диском мы рассекали зуб вдоль его оси.

Полученный образец помещался под микроскоп и фотографировался цифровой камерой. Изображение передавалось в компьютер, где определялась глубина «протравленного слоя».

«Протравленный слой» можно было визуально отличить от интактной эмали, так как он был значительно белее.

Прежде всего мы оценили влияние температуры водного раствора лимонной кислоты на глубину «протравленного слоя» $h_{пс}$ (рис.1).

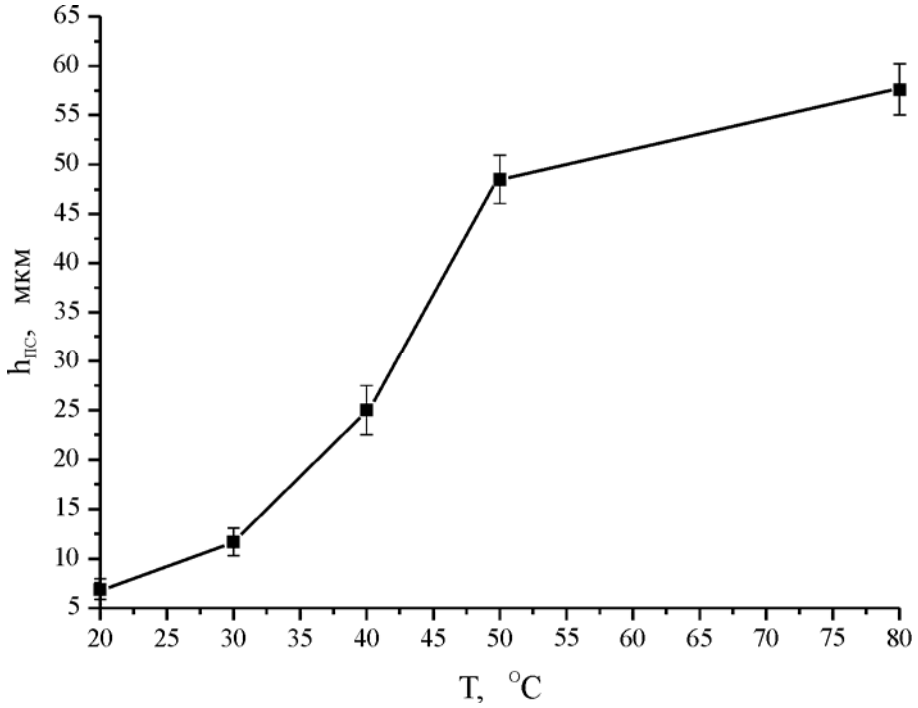


Рис.1. Зависимость глубины «протравленного слоя» в эмали (водный раствор лимонной кислоты с pH=1.5) от температуры при времени воздействия t=10мин.

Видно, что скорость диффузии, определяемая как глубина «протравленного слоя», отнесенная ко времени ее формирования, существенно зависит от температуры. Так, при температуре +20 °C скорость диффузии водного раствора лимонной кислоты с pH=1.5 в эмали составляет величину порядка 0.8 мкм/мин, при температуре +36 °C – 1.5 мкм/мин, при температуре +42 °C – 2.5мкм/мин, при температуре +50 °C – 5 мкм/мин, а при температуре +80 °C – 5.5 мкм/мин. Увеличение скорости диффузии может быть объяснено ростом градиента температуры в объеме (эффект Соре [6]).

В дальнейшем мы исследовали водный раствор лимонной кислоты с температурой +50°C. Мы определили взаимосвязь скорости диффузии с уровнем кислотности этого реагента (рис.2).

Из приведенных зависимостей видно, что для эффективного разрушения гидроксилапатита необходимо использовать водный раствор лимонной кислоты с pH=1.5 и температурой +50°C. Резкое уменьшение $h_{пс}$ при использовании раствора с pH>2.0, по всей видимости, связано с падением кислотности. Снижение глубины «протравленного слоя» $h_{пс}$ при pH<1.0 может быть связано с уменьшением диффузионных свойств раствора, вызванным ростом его вязкости.

Повышение температуры выше +50°C при сохранении положительной динамики эффекта существенно повышает риск термической травмы пульпы зуба и по этой причине является нежелательным.

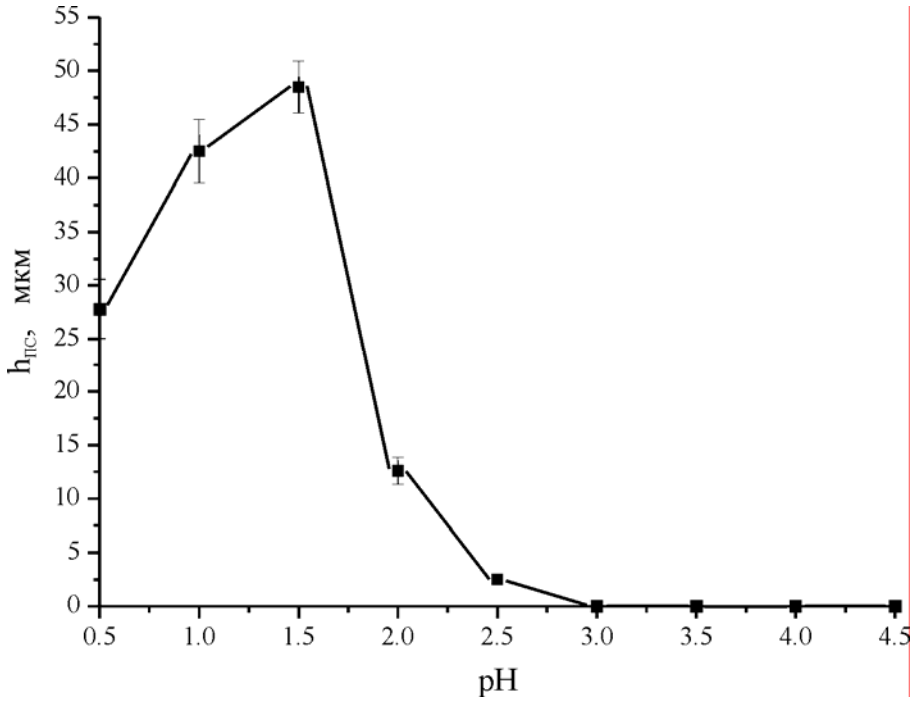


Рис. 2. Зависимость глубины «протравленного слоя» в эмали (водный раствор лимонной кислоты T=+50°C, t=10 мин) от уровня pH раствора

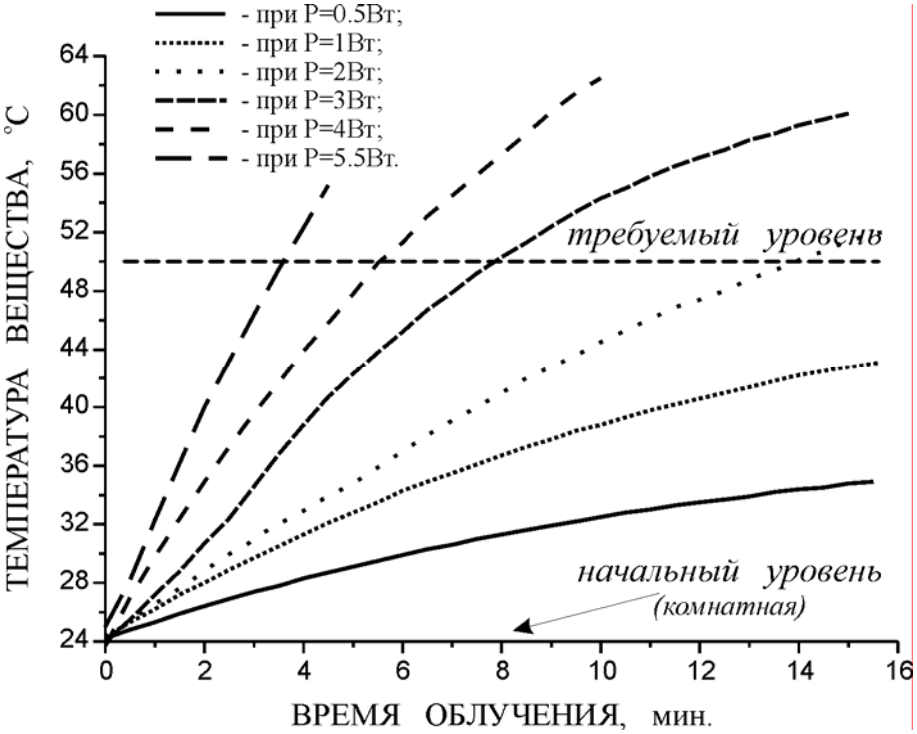


Рис.3. Зависимость температуры водного раствора лимонной кислоты (pH=1.5) от времени воздействия излучения галогеновой лампы с различной мощностью (требуемый уровень соответствует температуре +50 °C, начальный уровень +23 °C)

Итак, нагрев раствора лимонной кислоты с pH=1.5 до +50 °C позволяет повысить селективность (как отношение скоростей диффузии) травления эмали по отношению к воздействию раствора лимонной кислоты с pH=1.5, но при температуре +20 °C приблизительно в 6 раз. Для селективного малоинерционного нагрева можно исполь-зовать свет. Можно добавлять в водный раствор пищевой кислоты красители, избирательно поглощающие излучение используемого для нагрева светового источника. В настоящей

работе мы исследовали возможность нагрева простого водного раствора излучением галогеновой лампы, полагая, что содержащаяся в растворе вода (при pH=1.5 объемное соотношение между водой и кислотой соответственно было порядка 5:1) эффективно поглотит излучение этого источника. В наших экспериментах мы использовали 7.5 мл водного раствора лимонной кислоты с pH=1.5. Исследуемый раствор помещался в изолированную от окружающей среды кварцевую кювету, облучение производилось в непрерывном режиме через диафрагму диаметром 10 мм. В эксперименте мы исследовали зависимость температуры, до которой может быть нагрет раствор фиксированной световой мощностью галогеновой лампы, от времени (рис.3).

Видно, что при плотности мощности 7 Вт/см^2 (5.5 Вт) скорость нагрева составляет величину порядка 15 ^{o}C/мин, при 4 Вт/см^2 (3Вт) – 6 ^{o}C/мин, при 2.5 Вт/см^2 (2 Вт) – 3.5 ^{o}C/мин. Эти результаты достаточно хорошо согласуются с результатами, рассчитанными по формуле

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \frac{k \cdot P}{c \cdot \rho \cdot V}, \qquad (1)$$

где c - теплоемкость нагреваемого вещества, ρ – плотность нагреваемого вещества, V – объем нагреваемого вещества, ΔT - разность температур, $\Delta \tau$ - промежуток времени, в течение которого производится нагрев, k - коэффициент поглощения света веществом.

Корреляция теоретически рассчитанной по (1) и экспериментально полученной скорости нагрева водного раствора лимонной кислоты излучением галогеновой лампы позволяет сделать вывод о том, что этот тип источника достаточно эффективно можно использовать для управления (ускорения, замедления) процессами термической диффузии пищевых кислот в биологических тканях, содержащих гидроксилапатит (эмаль и дентин зуба, костные ткани), на этапе их искусственной обработки (модификация шероховатости поверхности, очистка и т.д.).

Литература

1. Терапевтическая стоматология / под редакцией Е.В.Боровского. / 2-е издание М., Мед. Информац. Агенство: ТОО «Техлит», 1997. 544с.
2. Самусев Р.П., Дмитриенко С.В., Краюшкин А.И. Основы клинической морфологии зубов. Москва, ОНИКС 21 век, Мир и Образование, 2002.
3. Peutzfeldt A, Garcia-Godoy F, Asmussen E, Surface hardness and wear of glass ionomers and compomers. // Am.J.Dent. 1997. 10(1): P. 15-17.
4. Краткая химическая энциклопедия. Т.4. / Ред. Кнунянц И.Л. и др. М.: Сов.энциклопедия, 1965. 1182с.
5. Новицкая И.Б., Гуревич М.А. Тепловыделение при биосинтезе лимонной кислоты // Хранение и перераб.сельхозсырья. 1997. № 6. С.24–25.
6. Грю К.Э., Иббс Т.Л., Термическая диффузия в газах. 1956.

РАЗРУШЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ В ПОЛЕ СУБМИЛЛИСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА ER:YAG ЛАЗЕРА

А.В. Беликов

В работе представлены результаты теоретической и экспериментальной оценки эффективности удаления эмали и дентина зуба человека потоком частиц сапфира, ускоренных лазерным излучением. Показано, что совместное воздействие лазерного излучения и ускоренных этим излучением частиц, предварительно нанесенных в виде водной суспензии на поверхность обрабатываемого материала, позволяет существенно повысить эффективность удаления последнего по отношению к воздействию только лазерного излучения.

Попытки использовать лазерное излучение для воздействия на различные объекты и материалы стали предприниматься сразу же после изобретения лазера, причем исследователи пытались охватить как можно больший диапазон практических применений [1, 2]. Одним из таких применений была попытка использования лазерного излучения для воздействия на неподвижные и движущиеся объекты конечных размеров с целью изменения траектории их движения или для их ускорения [3]. Предполагалось, что таким образом можно будет управлять траекторией спутников или метеоров, рассеивать облака и производить очистку атмосферы от посторонних включений вдоль распространения лазерного луча.

В общем случае можно считать, что в основе ускорения частиц лазерным излучением лежит принцип, аналогичный принципу ускорения космического корабля или реактивного самолета. Также можно рассматривать и влияние силы светового давления. Наиболее вероятны абляционный и связанный с микровзрывом материала частицы механизмы ускорения твердых частиц лазерным излучением [4].

При рассмотрении абляционного механизма полагаем, что световой поток падает на частицу таким образом, что частица освещается с одной стороны, тогда при превышении порога абляции с освещенной поверхности будет происходить вынос материала. Если абляция происходит в виде испарения материала частицы, то у освещенной поверхности частицы возникает слой насыщенного пара атомов частицы, и на поверхность будет действовать сила, ускоряющая частицу в направлении распространения лазерного излучения. Второй механизм ускорения связан с микровзрывом материала под действием лазерного импульса с образованием осколков. Здесь рассматривается композитный материал, состоящий из твердых частиц с высоким порогом лазерной абляции, помещенных в матрицу. Матрица имеет существенно более низкий порог лазерной абляции, чем материал частицы. Тогда под действием лазерного импульса происходит быстрый нагрев и испарение матрицы с образованием пара, имеющего высокое давление. Градиенты этого давления приводят к ускорению и разлету твердых частиц, которые приобретают при этом высокую скорость. Ускоряющая сила фактически обусловлена неравномерностью давления паров на поверхности частицы. Композитный материал может представлять собой или суспензию твердых частиц, или спрессованный порошок с поглощающими микрочастицами на границе зерен, или твердые частицы, помещенные в поглощающий лазерное излучение легкоплавкий наполнитель, например, полимер, и т. п.

На практике достаточно легко можно встретить порошок из твердых (сапфир, кварц) частиц, каждая из которых покрыта тончайшей (адсорбция из атмосферы) пленкой воды. Такие частицы могут быть ускорены импульсом YAG:Er лазера. Ускорение в этом случае происходит за счет абляции пленки воды вследствие чрезвычайно эффективного поглощения лазерного излучения с длиной волны 2.94 мкм последней. Ускоренные таким образом частицы могут быть использованы для разрушения эмали и дентина зуба человека. Рассмотрим баланс энергии при абляционном механизме лазерного

ускорения одиночной частицы и оценим скорость и энергию частиц, ускоренных одиночным лазерным импульсом, достаточные для разрушения эмали зуба человека. Считаем, что твердая частица имеет форму шара, покрытого тонкой пленкой воды, и облучается с одной стороны лазерным излучением. В качестве материала частицы возьмем сапфир, в качестве обрабатываемого материала – эмаль зуба. Положим, что энергия лазерного излучения расходуется только на нагрев обрабатываемого материала $E_{\text{мат}}$ (это энергия, прошедшая мимо твердых частиц) и на ускорение частиц энергией $\Delta E_{\text{абр}}$ до скорости υ:

$$E_{\text{лаз}} = \Delta E_{\text{мат}} + \Delta E_{\text{абр}} . \qquad (1)$$

Для разрушения обрабатываемого материала твердой частицей давление, оказываемое этой частицей $P_{\text{абр}}$, должно превосходить давление, необходимое для его разрушения $P_{\text{мат}}$, т.е.

$$P_{абр} \geq P_{мат} . \qquad (2)$$

В свою очередь,

$$P_{\text{абр}} = \rho\upsilon^2 \qquad (3)$$

где ρ = 3,97 10^3 кг/м^3 – плотность сапфира, υ – скорость частицы.

Для разрушения такого твердого материала, как эмаль зуба человека, давление $P_{\text{абр}}$ должно составлять величину порядка 100 атм. [5], откуда находим скорость твердой частицы, достаточную для разрушения эмали $\upsilon \approx$ 50м/с. Из (1) получаем, что энергия, расходуемая на взаимодействие с абразивными частицами, $E_{абр} = \Delta E_{лаз} - \Delta E_{мат}$, считая, что эта энергия идет на нагрев водяной пленки, окружающей абразивную частицу ($E_{\text{абр}}(1)$), ускорение частицы ($E_{абр}(2)$) и испарение водяной пленки ($E_{абр}(3)$), получим:

$$E_{абр} = E_{абр}(1) + E_{абр}(2) + E_{абр}(3) = cm\Delta T + \frac{m_{абр}\upsilon^2}{2} + VE_{исп}, \qquad (4)$$

где c – удельная теплоемкость водяной пленки, m – масса водяной пленки, $m_{\text{абр}}$ – масса абразивной частицы, $\Delta T = T^{\text{вода}}_{\text{кипения}} - T_{\text{комнатная}}$ – перегрев, V – объем испаряемой водяной пленки, $E_{\text{исп}}$ = 2.3*10^9Дж - удельная энергия испарения водяной пленки.

В рамках представленной модели и для частицы сапфира диаметром 10мкм:

$$Eабр = Eабр(1) + Eабр(2) + Eабр(3) = 0.14*10^{-12} + 0.25*10^{-8} + 0.92*10^{-6} \approx 0.92*10^{-6}\text{ Дж}$$

Таким образом, для разрушения эмали зуба человека одной частицей диаметром 10 мкм необходима энергия $\approx$ 0.92*10^{-6}Дж, при этом частица должна иметь скорость ≈ 50 м/с, что создает давление на поверхности образца порядка 100 атм. Такое давление больше усилия на разрыв эмали (твердость эмали близка к семи по шкале Мооса). Очевидно, что лазерное излучение с энергией 1 Дж позволяет разогнать около одного миллиона сапфировых частиц диаметром 10мкм до скоростей достаточных для разрушения эмали. Предполагая, что объем удаленного частицей абразива материала эмали пропорционален объему самой частицы, получаем, что эффективность удаления эмали может достичь величины порядка 1 мм^3/Дж.

В настоящей работе экспериментально измерялась эффективность удаления эмали и дентина зуба человека при использовании трех различных методик: воздушно-абразивной, лазерной и лазерно-абразивной. Также сравнивались теоретически и экспериментально полученные величины эффективности удаления эмали и дентина вышеперечисленными методами. Мы использовали сапфировые частицы диаметром 12мкм. Эти частицы ускорялись либо воздухом (воздушно-абразивный метод), либо излучением YAG:Er лазера (лазерно-абразивный метод). Абразив представлял собой водную

суспензию сапфировых частиц, нанесенных в виде слоя толщиной 200±50мкм на поверхность эмали или дентина зуба. Плотность энергии лазерного излучения (при лазерном и лазерно-абразивном методах) в режиме свободной генерации составляла величину порядка 100Дж/см^2, длительность лазерного импульса - 200±20мкс, частота следования лазерных импульсов - 10Гц. Обработка во всех случаях продолжалась в течение 120с. Затем образец распиливался вдоль оси образовавшегося в материале (эмаль, дентин) кратера. Кратер фотографировался цифровой камерой, фотография переносилась в компьютер, где методом конечных элементов в предположении осевой симметрии рассчитывался объем удаленного материала. Эффективность удаления определялась как объем материала, удаленный при вложении одного джоуля энергии. Результаты теоретических расчетов и экспериментов представлены в таблице 1.

Метод обработки	Эффективность удаления, мм^3/Дж			
	теория		эксперимент	
	эмаль	дентин	эмаль	дентин
Воздушно-абразивный	0,09	0,13	0,11	0,02
Лазерный (YAG:Er, 2.94мкм)	-	-	0,16	0,17
Лазерно-абразивный	0,13	0,17	0,23	0,28

Таблица 1. Эффективность удаления твердых тканей зуба

Из таблицы 1 видно, что лазерно-абразивная обработка позволяет эффективнее удалить твердую ткань зуба, чем лазерная и воздушно-абразивная обработки. Видно, что теоретические и экспериментальные результаты удовлетворительно коррелируют только для случая воздушно-абразивной обработки эмали. По-видимому, для описания процесса разрушения дентина абразивными частицами гипотеза о тождественности объема частицы объему удаленного материала неверна в силу высокой эластичности дентина. Расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами для лазерно-абразивной методики, кроме вышеизложенного, может быть объяснено дополнительным деструктивным действием энергии, прошедшей мимо частиц и поглощенной материалом образца ($E_{мат}$). В этой связи отметим, что эффективность удаления материалов ускоренными лазером частицами, помимо свойств самого обрабатываемого материала и материала частиц, может определяться также длительностью, длиной волны, плотностью энергии излучения, качеством (пространственно-временное распределение) лазерного излучения, концентрацией абразива в суспензии, диаметром и формой абразивных частиц и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскарьян Г.А., Мороз, Е.М. “Давление при испарении вещества в луче радиации”, Письма в редакцию ЖЭТФ, №12, 1962, 2319

2. R.W. Weeks W.W. Duley. “Aerosol-particle sizes from light emission during excitation by TEA CO2 laser pulse”, journal of Applied Physics, Vol. 45 #10, October 1974, pp. 4661-4662

3. Аскарьян Г.А., Рабинович М.С, Савченко М.М., Степанов В.К., Студенов В.Б. “Светореактивное ускорение макрочастиц вещества”, Письма в ЖЭТФ, **5**, 258, 1967

4. Altshuler G.B., Belikov A.V., Sinelnik Y.A., “A Laser-Abrasive method for the cutting of enamel and dentin” Lasers in Surgery and Med, 2001, 28, 435-444

5. D.K. Hudson, J.K. Hartley, R. Moore, W. T. Sweeney, A.B. Washington “Factors influencing the cutting characteristics of rotating dental instruments”. JADA, 1955;vol.50,pp.373-383.

МОДЕЛЬ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ТЕРМОГЕМОЛИЗА ЭРИТРОЦИТОВ

А.Ю. Москалева, В.А. Тарлыков

Рассмотрена возможность использования процесса гипоосмотического набухания эритроцитов, вызванного их нагревом вследствие поглощения излучения оптического диапазона, для измерения жесткости эритроцитарных мембран и оценки деформируемости эритроцитов

Введение

Для диагностики целого ряда заболеваний и оценки эффективности применяемого курса лечения необходимо осуществлять контроль реологических показателей крови. Это обусловлено тем, что многие заболевания и патологические состояния сопровождаются нарушениями реологических свойств крови, которые приводят к развитию различных осложнений, наиболее распространенными из которых являются гипервискозный синдром, нарушение суспензионной стабильности крови, изменения в системе микроциркуляции [1,6].

Одним из основных параметров, определяющих реологические свойства крови, является деформируемость, характеризующая способность красных клеток крови изменять свою форму под действием внешних сил. Высокая деформируемость эритроцитов играет важную роль в процессах переноса кровью кислорода и углекислого газа. Способность эритроцитов к деформации определяется вязкоэластичными свойствами мембраны, внутренней вязкостью и отношением объема клетки к ее площади. Физико-химические параметры крови (pH, осмолярность, газовый состав, температура), различные химические агенты также влияют на деформируемость эритроцитов. Существенные нарушения деформируемости эритроцитов наблюдаются при различных заболеваниях системы крови (анемиях, множественной миеломе, истинной полицитемии и др.), при гипертонии, ишемической болезни сердца и других патологиях.

Существуют различные методы измерения деформируемости эритроцитов. К прямым методам относятся измерения деформации мембраны при закреплении эритроцита в поле зрения микроскопа при различных механических воздействиях [1, 2]. В случае косвенных методов измерения о степени деформируемости эритроцитов судят по изменению различных параметров, отражающих способность эритроцитов к деформации. Это различные фильтрационные методы (пропускание эритроцитарной суспензии через микропористые фильтры, искусственные капилляры малого диаметра), оценка деформируемости по «пробе на упаковку» при центрифугировании [1-4,10]. Еще одним методом оценки деформируемости служит резистентность эритроцитов к различным воздействиям (химическим, осмотическим и др.), приводящим к гемолизу эритроцитов при превышении порога устойчивости [1, 5, 6].

Оптические методы регистрации характеризуются быстродействием, высокой точностью, чувствительностью, минимальным воздействием на объект исследования, возможностью одновременной регистрации большого количества малых частиц. Наиболее распространенным методом регистрации деформируемости эритроцитов является микроскопический метод, позволяющий наблюдать реакцию эритроцитов на различные внешние воздействия на них. Среди когерентно-оптических методов исследования, широко использующихся в биологии и медицине, большой интерес представляет применение дифракционного метода, основанного на явлении дифракции лазерного излучения на одиночных и множественных биологических микрообъектах. Параметры дифракционной картины однозначно связаны с параметрами микрообъектов, что дает возможность определять их размеры, форму, внутреннюю структуру и другие характеристики. В данной работе нами рассматривается возможность оценки деформируемости эритроцитов в условиях фотоиндуцированного нагрева, вызванного воздействием оптического излучения на образец крови.

Термическое воздействие на биообъекты. Термогемолиз эритроцитов

Воздействие повышенных температур на биологические объекты (гипертермия) широко используется в различных областях биологии и медицины [7–14]. Имеются различные объяснения механизмов влияния гипертермии на биологические объекты, согласно которым термическому воздействию подвергается мембрана клетки (изменяется ее проницаемость, происходят термические денатурационные переходы липидов и белков клеточной мембраны, например, спектрина) [2, 9–11], наблюдается денатурация гемоглобина – первая стадия термогемолиза эритроцитов [12] и другие явления. Эти процессы оказывают влияние на деформируемость эритроцитов. При превышении порога устойчивости к термическому воздействию происходит термогемолиз эритроцитов (рис. 1).

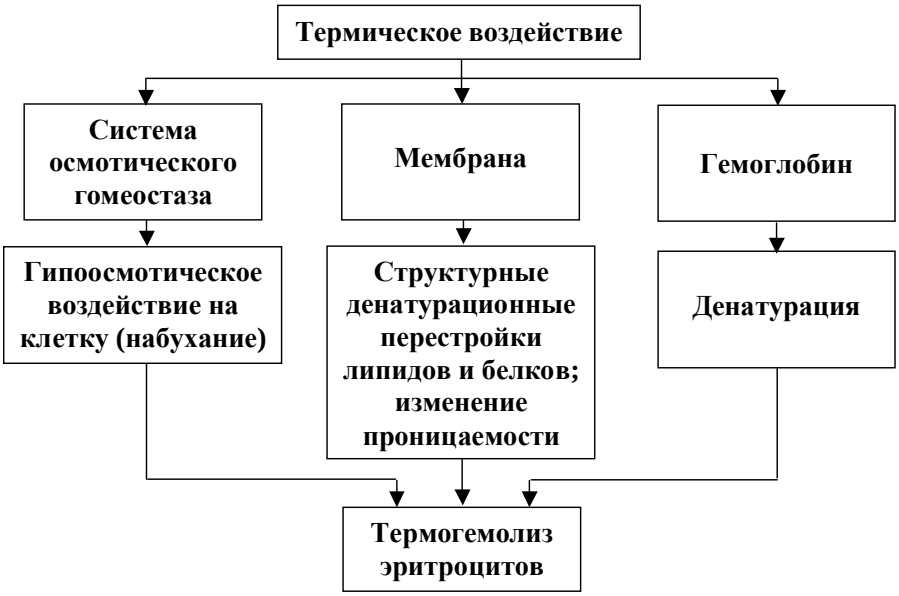


Рис. 1. Механизмы термогемолиза эритроцитов

Еще одной критической системой термического повреждения клеток и тканей является система осмотического гомеостаза [13]. При гипертермии нарушается существующее в условиях температурного оптимума осмотическое равновесие в системе клетка – среда вследствие различий констант электролитической диссоциации электролитов содержимого клетки и окружающей ее среды. При повышении температуры осмотическое давление содержимого клеток будет увеличиваться более интенсивно, чем давление суспензионной среды (например, физиологического раствора). В результате клетки подвергаются гипоосмотическому воздействию, степень влияния которого будет определяться скоростью нагрева, величиной перепада и абсолютным значением температуры. При этом происходит набухание эритроцитов, в конечном итоге приводящее к их гемолизу. Таким образом, фотоиндуцированный нагрев эритроцитов, происходящий при облучении образца крови, приводит к увеличению объема клеток вплоть до их гемолиза, что может быть использовано для определения деформируемости эритроцитов.

Модель фотоиндуцированного термогемолиза эритроцитов

Рассмотрим процессы, происходящие при облучении образца крови.

Оптическое излучение, поглощенное эритроцитом, находящимся в изотоническом растворе, вызывает повышение его внутренней энергии, что приводит к нагреванию клетки. При этом распределение теплового поля в плоскости клетки [8]

$$\Delta T(x,y) = \alpha(x,y,z)\frac{\omega(x,y)\cdot t}{\rho C_0}, \qquad (1)$$

где α – коэффициент поглощения излучения эритроцитом на длине волны λ; ω – плотность мощности излучения; t – длительность воздействия; ρ – плотность вещества; C_0 – удельная теплоемкость клетки. Таким образом, чем больше плотность мощности излучения и длительность воздействия, тем большему термическому влиянию подвергается клетка.

Источник оптического излучения необходимо выбирать с учетом максимального поглощения эритроцитом на этой длине волны, пренебрегая другими видами воздействия. Основным компонентом эритроцита, ответственным за поглощение, является гемоглобин, удельный коэффициент поглощения которого зависит от длины волны излучения (рис. 2) [14]. Наблюдается сильная полоса поглощения с центром в области около 414,5 нм и более слабые пики в области 550 нм. Оксигемоглобин по сравнению с гемоглобином меньше поглощает в красной области спектра. В качестве одного из возможных источников оптического излучения может быть выбрана вторая гармоника YAG:Nd^{3+}-лазера (λ=0,53 мкм).

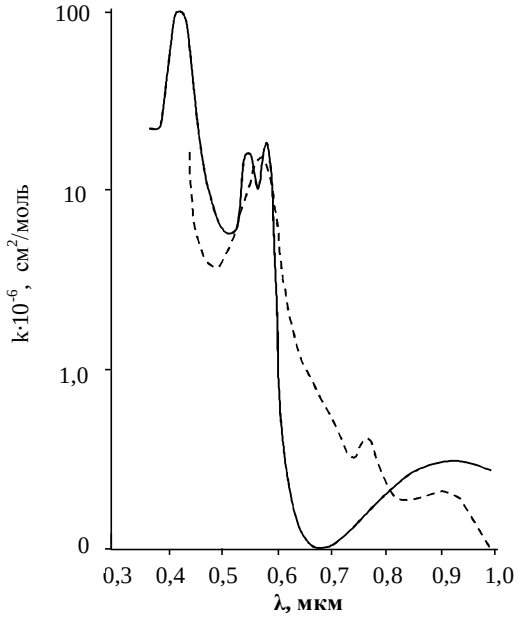


Рис. 2. Спектр оптического поглощения гемоглобина (– – –) и оксигемоглобина (——): зависимость удельного коэффициента поглощения от длины волны

При нагревании суспензии эритроцитов вследствие различий в электролитном составе суспензионной жидкости (в данном случае изотонического раствора NaCl) и содержимого клетки происходит нарушение осмотического гомеостаза, подобное процессу, вызываемому изменением соотношения концентраций осмотически активных элементов клеток и среды [13]. Суспензионные среды состоят преимущественно из сильных электролитов (хлорид натрия и др.), полностью диссоциированных на ионы независимо от температуры раствора. Осмотическое давление P для сильных электролитов

$$P = nCRT, \qquad (2)$$

где n – количество ионов, образованных из каждой молекулы растворенного соединения; C – концентрация вещества; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура. Следовательно, с увеличением температуры осмотическое давление раствора для сильных электролитов возрастает из-за повышения подвижности ионов, а не за счет увеличения их концентрации.

В состав внутренней среды клеток наряду с сильными электролитами входят также слабые полиэлектролиты (белки, нуклеиновые и аминокислоты и другие соедине-

ния) с относительно низкой константой электролитической диссоциации. Поэтому при повышении температуры рост величины осмотического давления для растворов слабых полиэлектролитов (например, белков) будет определяться не только увеличением подвижности ионов, но и их числа за счет дополнительной внутри- и межмолекулярной диссоциации, вызванной температурным повышением констант электролитической диссоциации [13]:

$$P = ШC\left(1 + \sqrt{\frac{e^{-\frac{Q}{RT}} + B}{C}}\right)RT, \qquad (3)$$

где P – осмотическое давление; Ø – осмотический коэффициент для неидеальных растворов; C – концентрация вещества; Q – тепловой эффект реакции; B – постоянный коэффициент, не зависящий от температуры; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура раствора.

Следовательно, повышение температуры вызывает более интенсивное увеличение осмотического давления содержимого клеток, чем давления суспензионной среды. В результате эритроциты подвергаются гипоосмотическому воздействию, степень которого будет определяться величиной температуры нагрева, ее перепадом и скоростью нагрева.

Будем считать, что при воздействии лазерного излучения температура суспензионной среды не изменяется, так как коэффициент ее поглощения пренебрежимо мал по сравнению с коэффициентом поглощения гемоглобина эритроцитов, т.е. примем, что при облучении образца крови происходит локальный фотоиндуцированный нагрев содержимого эритроцита.

Таким образом, поглощение эритроцитами оптического излучения, вызывающее их фотоиндуцированный нагрев, приводит к увеличению осмотического давления содержимого клеток по сравнению с осмотическим давлением среды, что аналогично помещению эритроцитов в гипоосмотический раствор. При этом происходит набухание эритроцитов и, при соответствующих значениях плотности мощности излучения и длительности воздействия, их гемолиз (фотоиндуцированный термогемолиз эритроцитов).

Варьируя длину волны излучения, мощность и длительность облучения, можно изменять степень теплового, а значит и гипоосмотического воздействия, т.е. контролировать процесс набухания эритроцитов и момент наступления гемолиза. Действие оптического излучения с различными характеристиками на эритроциты, находящиеся в изотоническом растворе, будет аналогично помещению эритроцитов в гипоосмотические растворы различной концентрации.

Модель расчета жесткости эритроцитарных мембран в условиях фотоиндуцированного набухания

Как известно [5,6], процесс набухания эритроцитов в гипоосмотических растворах за счет поступления внутрь них воды состоит из двух стадий. На первом этапе происходит увеличение объема эритроцита без изменения площади его поверхности (дискоцит трансформируется в сфероцит). На втором сферулированный эритроцит продолжает увеличиваться в объеме за счет растяжения мембраны, испытывая избыточное внутреннее осмотическое давление, вплоть до момента наступления гемолиза.

Диаметр эритроцитов здорового человека может варьироваться в пределах от 6,5 до 9 мкм (средние значения 7,5–7,9 мкм) [1,2]. Будем считать средний диаметр эритроцита равным 7,7 мкм. При моделировании сечения эритроцита овалом Кассини [1] для среднего значения радиуса 3,85 мкм получим первоначальные объем $V_э$=71,1 мкм^3 и

площадь поверхности $S_э$=142,5 мкм^2. Примем эти значения за исходные, тогда для момента, когда эритроцит примет сферическую форму,

$$R_{сф} = \sqrt{\frac{S_{сф}}{4\pi}}, \qquad V_{сф} = \frac{4}{3}\pi R_{сф}^3, \tag{4}$$

где $R_{сф}$, $S_{сф}$, $V_{сф}$ – соответственно радиус, площадь и объем эритроцита, принявшего сферическую форму. Тогда $R_{сф}$ = 3,37 мкм, $S_{сф}$ = 142,5 мкм^2, $V_{сф}$ = 160,1 мкм^3.

Во второй фазе гипоосмотического набухания сферулированный эритроцит увеличивается в объеме за счет растяжения мембраны, которая способна растягиваться вплоть до наступления гемолиза, увеличивая свою площадь по разным данным на 8–14% [2, 5]. Будем считать, что в среднем к моменту наступления гемолиза площадь сферулированного эритроцита увеличивается на 10 %. Тогда, считая за исходную площадь поверхности сферулированного эритроцита $S_{сф}$ = 142,5 мкм^2, получаем площадь поверхности сфероцита в момент гемолиза $S_г$ = 156,75 мкм^2, радиус $R_г$ = 3,53 мкм, объем $V_г$ = 184,16 мкм^3.

Установим аналитическую связь между избыточным давлением внутри эритроцита и изотропным поверхностным напряжением в мембране. Будем рассматривать эритроцит как тонкостенную сферу (для эритроцита $R \approx a \approx b$, где a и b – соответственно внутренний и внешний радиусы сферы), к которой приложены внешнее давление $P_р$ и внутреннее $P_э$. Тогда тангенциальное растягивающее напряжение, действующее в оболочке сферы на расстоянии R от центра сферы, определяется следующим образом [5]:

$$\sigma_t = \frac{3}{8} R\Delta P/(a-b), \tag{5}$$

где $\Delta P = P_э - P_р$. Числитель в полученном выражении является изотропным поверхностным напряжением $\overline{T}$, т.е.

$$\overline{T} = \frac{3}{8} R\Delta P. \tag{6}$$

$\overline{T}$ является функцией радиуса эритроцита, изменяющегося в процессе гипоосмотического набухания, и избыточного давления, действующего внутри клетки. Для мембраны эритроцитов справедливо следующее соотношение: $\overline{T} = K\Delta S / S_{сф}$, где K – поверхностная жесткость мембраны, ΔS – абсолютное приращение площади поверхности мембраны эритроцита при набухании [5]. Отсюда получаем, что равновесные состояния эритроцита в результате его гипоосмотического набухания будут описываться соотношением:

$$\frac{3}{8} R_i \Delta P_i = K\Delta S_i / S_{сф}, \tag{7}$$

где R_i – текущее равновесное значение радиуса эритроцита, $\Delta S_i = S_i - S_{сф}$ – абсолютное приращение площади поверхности эритроцитарной мембраны, S_i - соответствующее радиусу R_i значение площади ее поверхности. Значение ΔP_i определяется как разность внутреннего и внешнего давлений, приложенных к мембране эритроцита. Так как при воздействии оптического излучения происходит локальный фотоиндуцированный нагрев внутренней среды эритроцита и, следовательно, увеличение давления только внутри эритроцита, то величину ΔP_i можно определить как разность давлений внутри эритроцита до $P_{э_1}$ и после $P_{э_2}$ воздействия:

$$\Delta P_i = P_{э_2} - P_{э_1}, \tag{8}$$

где $P_{э_1}$, $P_{э_2}$ определяются из выражения (3). Выразим значения площадей мембран эритроцитов через их радиус, тогда:

$$\frac{3}{8} R_i \Delta P = K\left[\left(\frac{R_i}{R_{сф}}\right)^2 - 1\right]. \tag{9}$$

Отсюда получаем выражение для жесткости эритроцитарной мембраны:

$$K = \frac{3}{8} \Delta P_i R_{сф} \frac{R^i_{отн}}{\left(R^i_{отн}\right)^2 - 1}, \qquad (10)$$

где $R^i_{отн} = \frac{R_i}{R_{сф}}$ – текущий относительный радиус эритроцита.

Заключение

Предложенная модель фотоиндуцированного термогемолиза эритроцитов, вызванного их гипоосмотическим набуханием вследствие воздействия оптического излучения на эритроциты, может быть использована для оценки деформируемости эритроцитов и измерения жесткости эритроцитарных мембран. Это имеет большое значение для экспресс-контроля деформируемости эритроцитов как при диагностике, так и в динамике течения заболевания. Использование только изотонического раствора позволит сократить время проведения измерений жесткости эритроцитарных мембран по сравнению с методикой, использующей гипоосмотические растворы различных концентраций.

Литература

1. Левтов В.А., Регирер С.А., Шадрина Н.Х. Реология крови. М.: Медицина, 1982.
2. Черницкий Е.А., Воробей А.В. Структура и функции эритроцитарных мембран. Мн.: Наука и техника, 1984.
3. Методы исследования агрегации, вязкости и деформируемости эритроцитов. Под ред. Федоровой З.Д. Л.: НИИ гематологии и переливания крови, 1989.
4. Козинец Г.И., Сарычева Т.Г. Оценка деформабельности эритроцитов методом фильтрации // Лабораторное дело. 1990. №11. С.15.
5. Петренко Ю.М., Владимиров Ю.А. Изменение размеров эритроцитов при их набухании в гипоосмотических средах // Биофизика. 1987. Т.32. №3. С. 448– 453.
6. Бессмельцев С.С., Скворцова Ю.А., Тарлыков В.А. Исследование жесткости мембраны эритроцитов у больных с множественной миеломой на фоне терапии, включающей лечебный плазмаферез // Эфферентная терапия. 2000. Т.6. №1. С. 36–41.
7. Калинин Л.Г., Бошкова И.Л. Физическая модель отклика растительной ткани на воздействие микроволнового электромагнитного поля // Биофизика. 2003. Т.48. №1. С. 122–124.
8. Исследование влияния фотодинамического эффекта на микроорганизмы методом лазерной термооптической цитометрии / Лапотко Д.О., Жаров В.П., Романовская Т.Р., Кучинский Г.С. // Квантовая электроника. 1999. 29. №3. С. 221–226.
9. Волков Е.И., Полежаев А.А. Плазматическая мембрана как мишень действия гипертермии // Успехи современной биологии. 1983. Т.96. №3(6). С. 353–365.
10. Ямайкина И.В., Мансуров В.А., Ивашкевич Э.В. Температурная денатурация спектрина эритроцитов: реология, деформируемость и детергентоустойчивость // Биофизика. 1997. Т.42. №3. С. 675 – 679.
11. Александров В.Я. Клетки, макромолекулы и температура. Л.: Наука, 1975.
12. Ямайкина И.В., Черницкий Е.А. Денатурация гемоглобина – первая стадия термогемолиза эритроцитов // Биофизика. 1989. Т.34. №4. С. 656–659.
13. Морозов И.И. Термическое повреждение клеток и их осмотический гомеостаз // Медицинская радиология. 1992. Т.37. №11-12. С. 39–42.
14. Джонсон (C.C. Johnson), Гай (A.W. Guy). Воздействие неионизирующего электромагнитного излучения на биологические среды и системы // ТИИЭР. 1972. Т. 60. №6. С. 49–82.

ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ГАЛОГЕНОВАЯ УСТАНОВКА ВЫСОКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ КОСМЕТОЛОГИИ

А.В. Беликов, К.В. Приходько, Г.Н. Лукьянов, С.Л. Макаров

Обсуждаются схемотехнические особенности создания перестраиваемого по спектру светового источника с высокой яркостью на базе традиционной лампы накаливания с галогеновым циклом. Показано, что введение управляемых по току перегрузок позволяют смещать пик спектральной светимости спирали лампы в синюю область спектра с одновременным повышением светоотдачи, что особенно актуально для использования этого источника света в косметологии для воздействия на хромофоры кожи.

Широкое внедрение оптических технологий в сферу человеческой жизнедеятельности стимулирует создание новых и модификацию известных источников света. В настоящей работе мы рассмотрим возможность модификации выходных параметров источников света на основе галогеновых ламп накаливания. К наиболее важным выходным параметрам следует отнести спектр и мощность излучения. Для некоторых практических, в частности биомедицинских, приложений необходимо модифицировать спектр излучения галогенового источника, сдвинув его в коротковолновую область и повысить светоотдачу источника. В настоящей работе мы, прежде всего, хотим остановиться на особенностях блока питания, необходимого для получения потока излучения высокой интенсивности при малых габаритах источника излучения. Источники питания для различных ламп накаливания как постоянного, так и переменного токов широко известны. Для питания галогеновых ламп обычно используют источники напряжения, обеспечивающие на выходе достаточно стабильное напряжение и, в зависимости от области применения, погрешность величины силы тока 0,1%. Существенным недостатком этих блоков питания является отсутствие режима работы, обеспечивающего получение повышенного относительно номинального потока излучения, без пропорционального увеличения потребляемой мощности, хотя подобный режим питания безопасен для галогеновой лампы и не должен приводить к ощутимому уменьшению срока ее службы. Такое отличие от обычной лампы накаливания объясняется восстановлением в процессе работы свойств разогретой нити накала, находящейся в заполненной галогеном колбе.

В работе мы попытались получить максимальный поток излучения от галогеновой лампы путем автоматического управления потребляемой ею мощностью. Мы предложили и реализовали в макетном варианте устройства оригинальный режим питания галогеновой лампы, обеспечивающий получение интенсивного лучистого потока от этой лампы с одновременным восстановлением свойств рабочего тела лампы, помещенного в галоидную среду. В этом режиме напряжение на выходе источника питания, к которому подключают лампу, в два раза превышает номинальное для данной лампы значение. При этом непрерывно измеряют значение силы тока, протекающего через лампу, и в случае, если это значение оказывается больше заранее установленной величины, лампу отключают от источника питания, а затем подключают к нему снова. Таким образом, разработанное нами устройство состоит из источника питания и подключенной к нему галогеновой лампы, последовательно с которой с разных ее сторон включены электронный ключ и резистор. Параллельно цепи резистора и лампы включен блок управления мощностью лампы. Выход этого блока подключен к электронному ключу.

Предлагаемый способ питания галогеновой лампы удвоенным по отношению к номинальному значению пульсирующим напряжением вызывает, соответственно, удвоенное значение силы пульсирующего тока, протекающего через нить накала. Однако, благодаря наличию системы управления мощностью, среднее ее значение не превышает допустимое, и лампа работает в допустимом режиме. Этот принцип легко поясняется (рис.1). Устройство состоит из источника питания 1, включающего в себя сетевой выпрямитель 2, выходы 3 и 4 которого подключены к входам преобразователя 5. Выход 6 преобразователя 5 подключен к первичной обмотке трансформатора 7, второй конец

которой подключен к точке соединения 8 обкладок двух конденсаторов 9 и 10. Каждая из двух других обкладок этих конденсаторов подключена к точкам 3 и 4, т.е. к входам преобразователя 5. Концы 11 и 12 вторичной обмотки трансформатора 7 являются входами выпрямителя 13, выходы которого являются выходами источника питания 1 галогеновой лампы 14. Лампа 14 подключена к источнику 1 через электронный ключ 15, с одной стороны, и резистор 16 – с другой. Параллельно им выходы источника 1 замкнуты конденсатором 17, а параллельно галогеновой лампе 14 и резистору 16 подключен тремя своими входами блок управления 18, а выход этого блока является входом 19 электронного ключа 15.

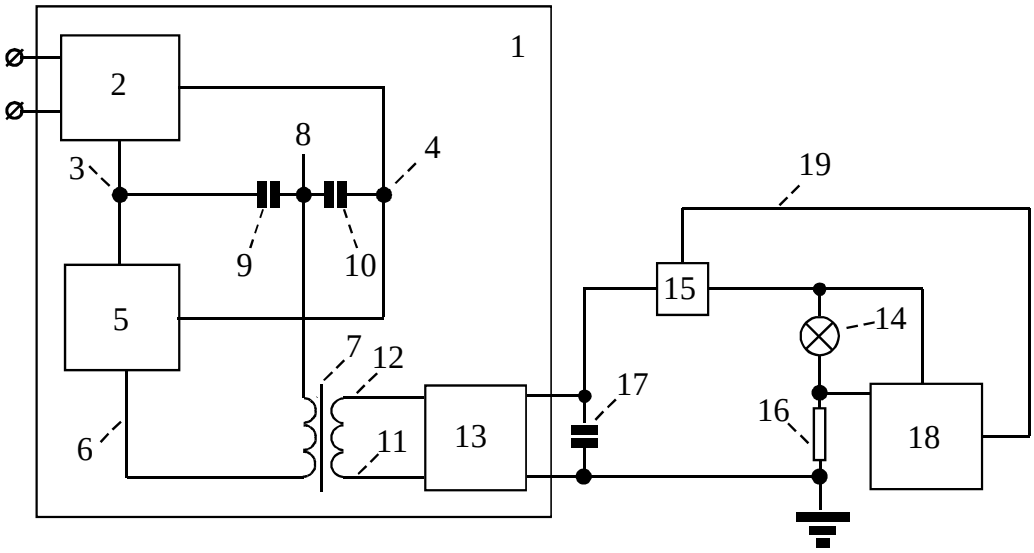


Рис.1. Схема управляемого по току блока питания для лампы накаливания

Выпрямленное переменное сетевое напряжение с выходов 3 и 4 выпрямителя подается на преобразователь 5, где преобразуется в переменное напряжение высокой частоты (около 80 кГц). Протекая через первичную обмотку трансформатора 7 и конденсаторы 9 и 10, ток этой частоты обеспечивает возникновение на концах 11 и 12 вторичной обмотки, а, следовательно, и на входах выпрямителя 13, переменное напряжение равное удвоенному номинальному напряжению питания лампы 14 и удвоенную относительно номинального значения величину силы тока через нее. Постоянное напряжение на выходе выпрямителя 13 вызывает ток через замкнутый ключ 15, лампу 14 и резистор 16, который в блоке управления 18 измеряется через падение напряжения на резисторе 16 и сравнивается с заранее установленным значением допустимой величины силы тока через лампу 14. В случае совпадения значений этих токов в блоке управления 18 вырабатывается сигнал, который поступает на вход 19 ключа 15 и размыкает цепь. При размыкании цепи другой сигнал из блока управления замыкает ключ 15.

В результате формируется последовательность импульсов напряжения с амплитудой, равной удвоенной величине номинального напряжения питания для данной лампы, а частота следования и длительность этих импульсов зависит от значения предварительно установленной величины силы тока и текущего его значения, протекающего через лампу.

При протекании через лампу тока, превышающего номинальную для данной лампы величину, происходит ее разогрев. При размыкании цепи ток прекращается, однако лампа до последующего замыкания цепи не успевает остыть и продолжает излучать. Такой режим работы приводит к существенному увеличению энергии излучения лампы по сравнению с номинальным режимом.

Для исключения выхода лампы из строя по причине перегорания нити накала от перегрузки измеряется также падение напряжения на лампе. В случае превышения по-

роговой величины этого напряжения сигнал из блока управления запирает ключ 15, и для восстановления работоспособности устройства необходимо выключить его из сети, установить более низкое допустимое значение и после этого снова включить.

В макетном варианте электронный ключ был реализован на основе МОП-транзистора типа IFRZ 44, позволяющего осуществлять переключения с частотой до 100Гц. Преобразование частоты сетевого напряжения (увеличение частоты) позволяет использовать трансформатор малых размеров. Преобразователь 5 реализован на основе драйвера фирмы International Rectifier с задающим генератором на микросхеме К561ЛА7 и мощными МОП-транзисторами.

В качестве выпрямителя 2 используется стандартный мостовой выпрямитель, рассчитанный на силу тока 10А, а в качестве выпрямителя 13 – также мостовой выпрямитель с высокочастотными диодами, например SF 52, рассчитанными на частоту до 100Гц.

Вариант устройства, состоящий из блока питания, работающего по вышеописанному принципу, и наконечника, содержащего лампу типа ELC фирмы Osram (номинальная электрическая мощность 250Вт и напряжение 24В), был реализован в макете.

В макетном варианте наконечника свет от галогеновой лампы отражался рефлектором и через сапфировое окно 6×10×4 мм выходил наружу. Мы измеряли энергию светового импульса (длительностью 1±0.1с) при помощи измерителя лазерной энергии LaserStar фирмы Ophir. Одновременно с энергией света мы контролировали ток, протекающий через лампу. Среднее значение напряжения на лампе во всех случаях не превышало 24±0.1В. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Ток, А	Электрическая мощность, Вт	Энергия излучения, Дж
10.4	250 (номинал)	27.8
11.0	264	32.8
11.2	268	34.4
11.4	273	36.0

Таблица 1. Значения тока, электрической мощности и энергии излучения галогеновой лампы типа ELC в номинальном и форсированном режимах

Видно, что использование форсированного режима (режима, при котором напряжение импульса в два раза превышает его среднее значение за 1с и ток превышает номинальное значение) позволяет при 3 % повышении потребляемой относительно номинального значения электрической мощности получить фактически 30 % повышение энергии светового излучения.

В форсированном режиме в результате повышения напряжения и тока, протекающего через лампу материал спирали дополнительно контролируемо разогревается до более высоких, чем в номинальном режиме, значений температуры. По закону Вина нагрев абсолютно черного тела, которым с достаточно высокой точностью можно считать спираль лампы накаливания, сопровождается смещением максимума спектрального распределения излучения, создаваемого этим черным телом, в коротковолновую область спектра. Мы экспериментально измерили спектры свечения галогеновой лампы в номинальном и форсированном режимах (рис.2.).

Видно, что в форсированном режиме происходит смещение края спектрального распределения в область коротких длин волн. Расчет для черного тела показал, что в номинальном режиме спираль лампы нагревается лишь до 1700–1800 ^{o}C (спектральный максимум локализован в области 1.3мкм), в то время как в форсированном режиме до 2700–2800 ^{o}C (спектральный максимум локализован в области 0.9 мкм). Пирометрические измерения подтвердили результаты расчетов. Мы также экспериментально оценили энергетическое распределение излучения по спектру. Нас интересовали диапазоны

длин волн 300–400 нм, 400–600 нм, 600–900 нм и выше 900 нм. Результаты измерений представлены в табл. 2.

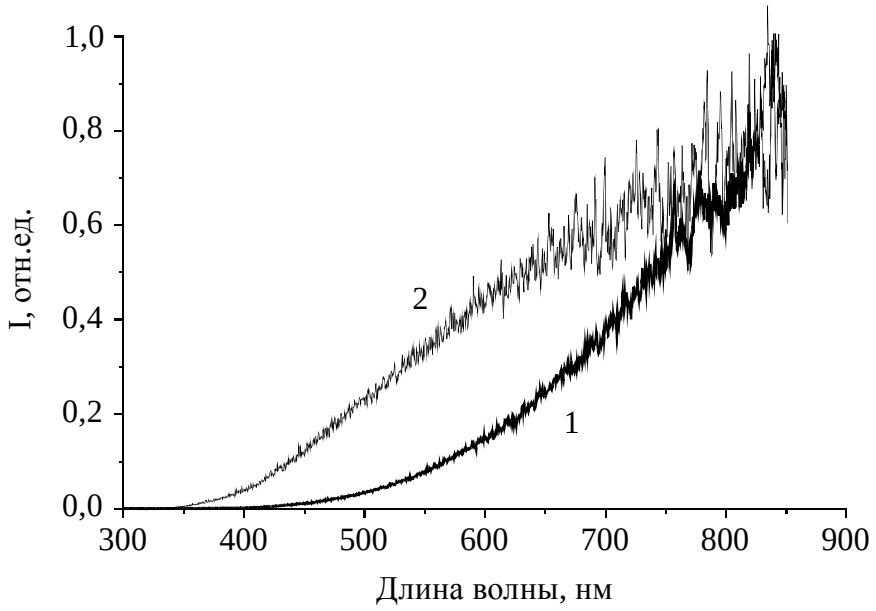


Рис. 2 Спектр излучения галогеновой лампы в номинальном (кривая 1) и форсированном (кривая 2) режимах

Спектральный диапазон	доля энергии излучения, лежащая в спектральном диапазоне	
	номинальный режим	форсированный режим
300÷400нм	0.2	0.8
400÷600нм	2.3	5.7
600÷900нм	10.9	23.0
выше 900нм	86.6	70.5

Таблица 2. Энергетическое распределение излучения галогеновой лампы по спектру

Ожидаемый теоретически и наблюдаемый в эксперименте эффект спектрального и энергетического перераспределения позволил предложить использовать установку на основе галогеновой лампы в косметологии для эпиляции волос, так как в форсированном режиме достаточное количество света от галогенового источника попадает в область так называемого «терапевтического окна» кожи, повышая вероятность селективного подэпидермального нагрева волосяной фолликулы.

Мы провели предклинический тест данной установки *in vivo*, имеющий целью наблюдение эффекта замедления роста волос. В эксперименте мы использовали галогеновую лампу с плотностью энергии излучения на поверхности кожи 40Дж/см^2 в пятне 6×10 мм, спектральный диапазон излучения был ограничен только полосами поглощения водяного фильтра толщиной 0.5 мм, помещенного между лампой и сапфировым выходным окном, находящимся в контакте с кожей *in vivo*. Температура сапфирового окна поддерживалась на уровне порядка +10 ^{o}C, обработка проводилась одним импульсом длительностью 5.5 с в форсированном режиме. До облучения мы считали количество и среднюю длину волос на площади 0.6см^2, которая затем подвергалась традиционной процедуре бритья. Через 4 дня после традиционного бритья мы механически (пинцетом) выдергивали выросшие волосы (удаляя волосы, находящиеся в анаденовой стадии), а затем облучали кожу одним импульсом света галогеновой лампы. В непосредственной близости от обрабатываемой находилась контрольная область, на ко-

торой мы делали все вышеизложенное, кроме облучения. Результат эксперимента можно представить в виде графика (рис. 3.).

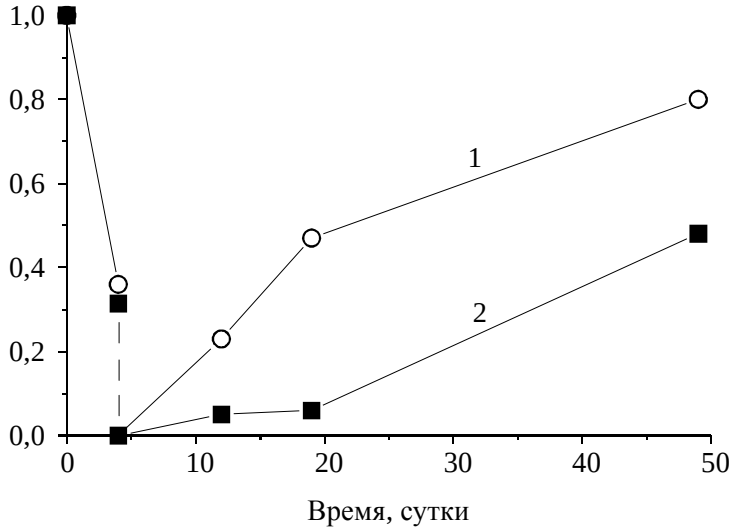


Рис.3. Временная динамика отношения количества выросших после обработки (кривая 1 – без облучения светом галогеновой лампы, кривая 2 – с облучением) волос *in vivo* к общему их количеству до обработки

На графике видно, что использование излучения галогеновой лампы с вышеприведенными параметрами позволяет существенно замедлить рост волос. При этом количество вновь выросших волос спустя 45 дней после одноимпульсного однократного облучения снижается на 30 % по отношению к их количеству, выросшему после традиционной обработки. Этот результат очень близок к результату, наблюдаемому после однократной обработки импульсом излучения $Al_2O_3:Cr^{3+}$ лазера на длине волны 0.694 мкм, довольно широко используемого в медицинской практике для эпиляции. Этот факт позволяет надеяться на успешное использование галогеновых источников света в косметологии.

ГЕНЕРАЦИЯ СУБПИКОСЕКУНДНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В.Г. Беспалов, Ю.Н. Ефимов, Э.В. Милоглядов

Введение

В последние десять лет терагерцовые (ТГц) излучающие системы в наиболее длинноволновом оптическом интервале частот ($3\cdot10^{11}$–$30\cdot10^{12}$ Гц) привлекают большой интерес вследствие широкого использования в научных целях, а также возможных применений для военной и гражданской техники. В настоящее время развиваются несколько параллельных направлений создания когерентных импульсных источников ТГц диапазона. В начале 90-х годов несколькими группами исследователей было показано, что при освещении некоторых фотополупроводников фемтосекундными импульсами света поверхность образцов излучает когерентные сверхкороткие широкополосные импульсы в дальнем ИК диапазоне (10 мкм–1 мм) (ссылки см. [1,2]). Наряду с возбуждением фотоносителей, ТГц излучение может генерироваться в процессе коллективного оптического возбуждения электронов в гетероструктурах и квантовых ямах. Ультракороткие ТГц оптические импульсы в настоящее время перспективны для внутренней и внешней связи в интегральных схемах, для целей спектроскопии дальнего ИК диапазона с разрешением во времени и химического определения состава сложных соединений, для создания ТГц радаров, для целей оптической ТГц томографии с разрешением во времени (T-ray imaging), поскольку охватывают актуальный спектральный диапазон колебательных, вращательных и трансляционных линий широкого класса органических и биологических молекул, имеют высокую проникающую способность сквозь дымы и туманы и обладают предельно высоким пространственно-временным разрешением вплоть до 01–1 мм. Следует отметить, что большинство сред, непрозрачных в видимом диапазоне, прозрачны в ТГц диапазоне спектра, что открывает возможности интравидения. Данные свойства создают широкие перспективы использования ТГц излучения во многих направлениях современного мониторинга окружающей среды.

Генерация терагерцового излучения и его усиление

Для возбуждения ТГц излучения использовались импульсы излучения Ti:S лазера (Фемос-1) с длительностью отдельного импульса 70 фс, энергией до 2 нДж, частотой повторения 80 МГц и средней мощностью лазерного излучения до 150 мВт. В качестве генератора излучения дальнего ИК диапазона использовался нелегированный кристалл арсенида индия InAs, вырезанный в плоскости [1 0 0] и представляющий собой пластину размерами 10×10 мм^2 и толщиной 100 мкм. Концентрация основных носителей в кристалле составляла ~$3\cdot10^{16}$ см$^{-3}$, подвижность электронов – $3\cdot10^4$ см^2/В·с.

Применение внешних электрического и магнитного поля вследствие квадратичной зависимости интенсивности ТГц излучения от напряженности позволяет достаточно эффективно увеличивать среднюю мощность ТГц импульсного излучения, генерируемую полупроводником. Развитие технологии производства сильных постоянных магнитов позволило создавать компактные схемы генерации ТГц импульсного излучения. Поэтому в качестве оптимального способа повышения средней выходной мощности ТГц импульсного излучения было выбрано увеличение коэрцитивной силы магнита. С этой целью на основе расчетов нами была разработана магнитная система специальной конфигурации на основе композита Nd:B:Fe. Чертеж магнитной системы приведен на рис.1. Она представляет собой вертикальный цилиндр с двумя горизонтальными клиновидными выемками, сообщающимися в центре магнитной системы, высотой 10.5

мм. Полупроводниковый кристалл размещался в центре цилиндра на его оси с таким расчетом, чтобы излучение накачки падало на него через одно отверстие, а отраженное и ТГц излучение выходило через другое.

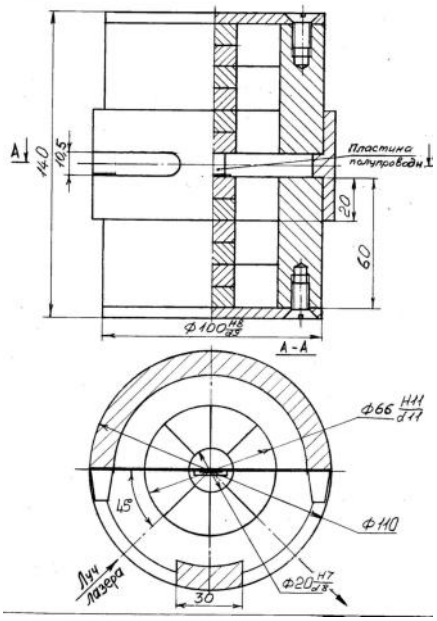


Рис. 1 Чертеж магнитной системы

Расчет конфигурации магнитной системы позволил увеличить однородность и напряженность магнитного поля в области размещения кристалла с 0.5 Т в использованном ранее магните до 1.8 Т. При фокусировке импульсов фемтосекундного лазера со средней мощностью 50 мВт на поверхность InAs без магнитного поля регистрировалось ТГц излучение со средней мощностью 2 нВт. Помещение InAs в магнитное поле тороидального магнита напряженностью 0.5 Т и направлением параллельно поверхности кристалла приводило к шестикратному увеличению мощности генерируемого излучения. Использование разработанной нами конфигурации системы магнитов с напряженностью магнитного поля 1.8 Т позволило увеличит среднюю мощность ТГц излучения еще в 10.5 раз по сравнению со схемой с тороидальным магнитом. Следует отметить, что при изменении направления магнитного поля интенсивность ТГц излучения уменьшалась и достигала минимума при перпендикулярной ориентации относительно поверхности кристалла. Таким образом, результаты исследования терагерцового излучения, генерируемого в кристалле InAs, помещённом в поле постоянного магнита, при возбуждении фемтосекундными импульсами Ti:S лазера показывают высокую эффективность, простоту и надежность использования постоянных магнитов с высокой коэрцитивной силой, что позволяет при оптимизации выходной мощности, широкополосности и временных параметров сверхкоротких импульсов ТГц излучения значительно снизить требования к мощности оптического возбуждения.

Широкополосный спектрометр дальней ИК области с использованием субпикосекундных импульсных ТГц систем

Для мониторинга и контроля загрязнения окружающей среды с использованием сверхкоротких импульсов ТГц излучения была разработана схема терагерцового спектрометра. Схема спектрометра представлена на рис.2. На входе пучок фемтосекундного излучения разделяется на возбуждающий и опорный. Возбуждающий импульс попадает на пластину полупроводника, помещенную в магнитное поле системы постоянных

магнитов. В направлении возбуждающего излучения генерируется ТГц излучение. Оно коллимируется и фокусируется двумя параболическими зеркалами на образец, спектр которого необходимо измерить. Прошедшее образец ТГц излучение фокусируется второй параболической системой на электрооптический кристалл, являющийся детектором ТГц излучения.

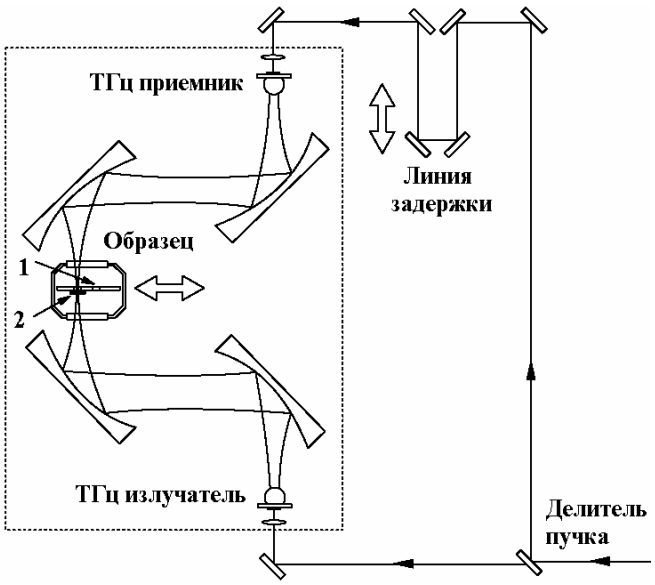


Рис. 2 Схема ТГц спектрометра

Опорный фемтосекундный пучок падает с пучком ТГц излучения на приемник после прохождения по системе зеркал линии задержки. При попадании одновременно ТГц импульса и светового импульса в приемнике возникает сигнал, пропорциональный амплитуде электрического поля ТГц излучения в данный момент времени.

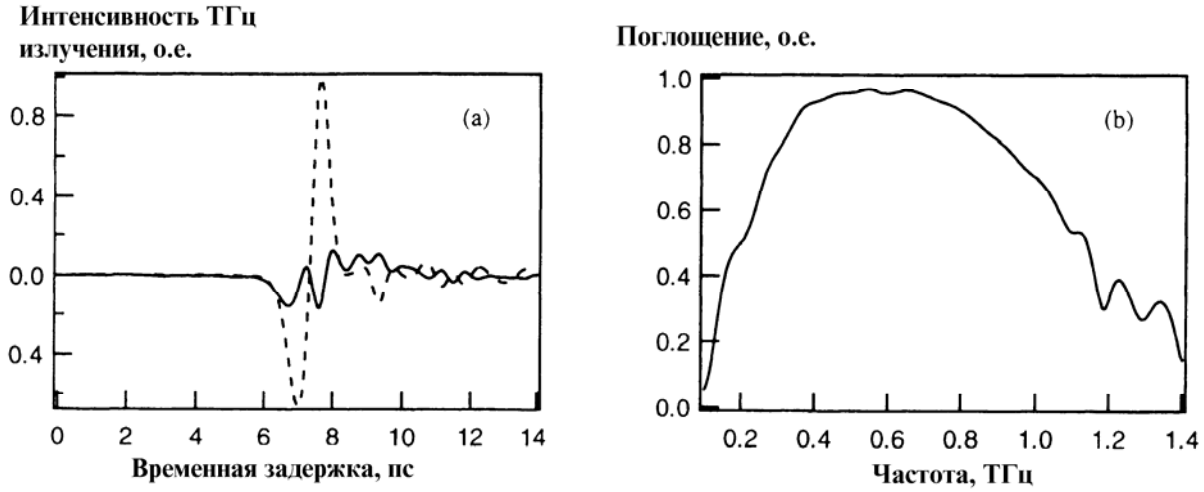


Рис. 3. Искажения формы ТГц сигнала (a) и спектр поглощения паров ацетона (b). Штриховая линия на (a) – неискаженный сигнал

Изменяя время прихода опорного импульса на приемник при помощи линии задержки и сигнал детектора, можно построить зависимость амплитуды электрического поля ТГц излучения от времени. Используя Фурье-преобразование данной временной

зависимости, можно получить спектр ТГц излучения. Помещая между параболическими зеркалами исследуемый образец, можно получить разностный сигнал, из которого извлекается информация о спектре поглощения. В качестве примера на рис. 3 приведены графики искажения формы ТГц сигнала (см. рис.3 a), обусловленные наличием паров ацетона в образце, и спектр поглощения паров (см. рис.3 b), определенный из первого графика.

Перечислим преимущества такого спектрометра.

- Вследствие широкополосности ТГц излучения возможно получение спектра сразу в диапазоне 50–600 мкм.
- Благодаря когерентному детектированию измеряется амплитуда, а не интенсивность электрического поля ТГц излучения, что позволяет извлечь информацию как об амплитуде, так и фазе регистрируемого ТГц сигнала.
- Спектрометр не чувствителен к тепловому излучению и не требует использования охлаждаемых до сверхнизких температур болометров.
- При использовании современного волоконного фемтосекундного лазера, имеющего габариты 20×10×5 см с питанием от аккумулятора, весь спектрометр может иметь размеры 40×20×5 см и вес не более 20 кг.

Можно указать следующие возможные применения спектрометра:

- измерения спектров загрязнения воздуха органическими и неорганическими молекулами, имеющими поглощение в данном диапазоне спектра;
- изучение спектров биологических молекул, включая ДНК;
- неразрушающий контроль изделий из керамики и пластмасс, которые практически прозрачны для ТГц излучения;
- контроль влажности различных веществ;
- контроль ценных бумаг.

Таким образом, использование предложенной схемы ТГц спектрометра позволит решить широкий круг научно-технических и производственных задач, в том числе задачу мониторинга загрязнения окружающей среды с помощью дистанционного зондирования атмосферы терагерцовыми импульсами.

Выводы

1. Определены пути повышения средней выходной мощности ТГц излучения, а также достигнуто значительное (десятикратное) увеличение эффективности преобразования субпикосекундных импульсов ТГц излучения, генерируемых полупроводниковым кристаллом InAs при использовании дополнительного магнитного поля.
2. На основе численного моделирования выбран оптимальный вариант модернизации существующей установки и разработана схема ТГц спектрометра для апробирования методик контроля загрязнения.

Литература

1. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Стаселько Д.И., Путилин С.Э., Лукомский Г.В. Генерация и детектирование дальнего ИК излучения при фемтосекундном оптическом возбуждении кристаллов InAs. / В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики., СПбГИТМО, 2000. с. 128-135.
2. Беспалов В.Г., Крылов В.Н., Путилин С.Э., Стаселько Д.И. Генерация излучения в дальнем ИК диапазоне спектра при фемтосекундном оптическом возбуждении полупроводника InAs в магнитном поле. // Опт. и спектр. 2002. Т 92. № 5

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ФОТОХРОМОТЕРАПИИ

А.Б. Веселовский, В.В. Кирьянова, А.С. Митрофанов, Г.Д. Фефилов

В настоящее время в фотохромотерапии наряду с низкоинтенсивными лазерами широко используются светодиодные излучательные элементы [1], как единичные, так и многоэлементные, излучающие в различных участках оптического спектра, в том числе и видимой его части.

Результаты светового воздействия (клинические эффекты) зависят от поглощенной тканями энергии излучения [2] на той или иной длине волны (энергетических доз). Ввиду этого при создании медицинской аппаратуры для фотохромотерапии необходимо знание энергетических параметров применяемых излучателей, например, таких как мощность излучения P [Вт], облученность E [Вт/м^2], энергетическая экспозиция H [Дж/м^2], как для одноэлементных, так и для многоэлементных излучателей (матриц). Однако выпускаемые промышленностью светодиоды видимого диапазона в различных его участках аттестуются только в светотехнических величинах, таких, например, как сила света, измеряемая в канделах, что требует перевода их в энергетические единицы.

Теоретический пересчет светотехнических параметров в энергетические требует точного знания спектральных характеристик излучателей, представляет значительные трудности даже для специалистов и не является достаточным аргументом при аттестации такой аппаратуры. Ввиду этого появляется необходимость в проведении абсолютных измерений энергетических параметров излучения светодиодов, предназначенных для работы в пределах видимого участка оптического спектра, широко используемых в фотохроомотерапии.

Решить указанную задачу можно, используя специально разработанные для этого абсолютные измерители мощности излучения в видимом участке спектра, например, такие как Mohectron Laser Powermeter 3000 (США), однако они имеют высокую стоимость, и использование их весьма ограничено. Другие же широко распространенные и наиболее доступные измерители, такие, например, как неселективные абсолютные измерители мощности типа ИМО, предназначены для измерения энергетических параметров лазерного (направленного) излучения и по ряду причин не могут быть непосредственно использованы для измерения энергетических параметров излучения светодиодов. Причины эти заключаются в следующем.

Светодиоды обладают большой угловой расходимостью излучения, что означает необходимость их размещения в процессе измерения непосредственно при входе в приемный конус измерителя ИМО, что приводит к нарушению теплообмена конуса с окружающей средой и значительной погрешности измерения. При этом приемный конус излучения дополнительно нагревается за счет конвективной передачи тепла от нагревающегося в процессе работы светодиода, особенно если учесть, что процесс измерения ввиду инерционности измерителя занимает достаточное для нагрева светодиода время. При этом погрешность измерения может достигать ста и более процентов, что недопустимо, и производить измерение энергетических параметров светодиодов таким образом нельзя.

Для решения этой проблемы нужно отдалить светодиод от приемного конуса измерителя, чтобы не нарушать нормального теплообмена конуса с окружающей средой и устранить конвективный нагрев конуса нагретым светодиодом. Однако при удалении светодиода от входного отверстия конуса из-за большой расходимости излучения в приемный конус будет попадать только незначительная часть излучения светодиода.

Решить указанную проблему можно с помощью метода измерения, рассматриваемого ниже.

На рис.1 приведена схема, с помощью которой можно производить измерение мощности излучения светодиодов, пользуясь измерителем мощности типа ИМО.

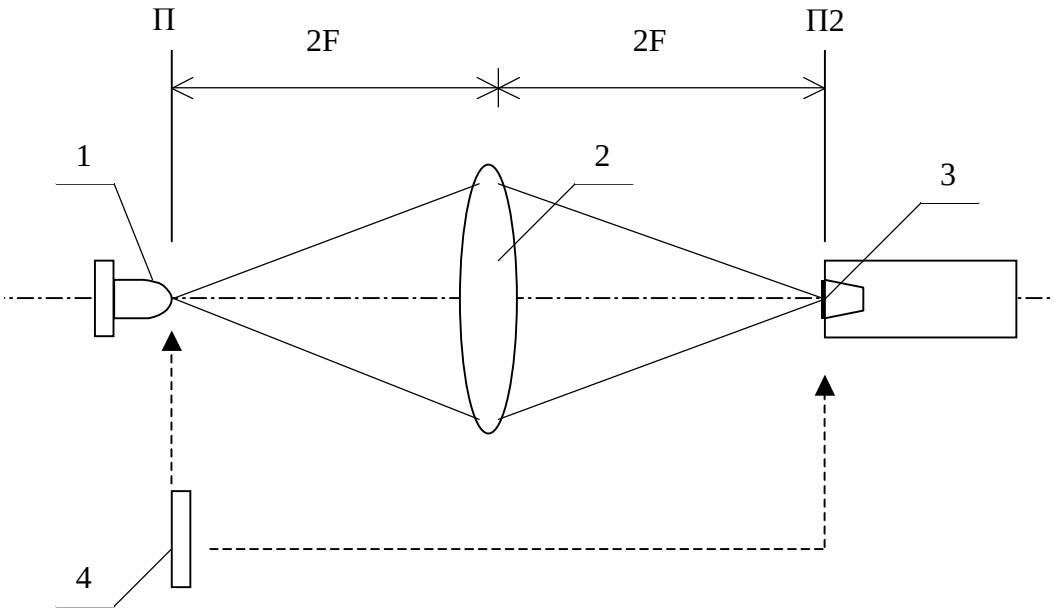


Рис. 1. Схема измерения мощности излучения светодиода: 1 - светодиод; 2 - линза; 3 -входное отверстие измерителя ИМО; 4 - фотодиод.

Светодиод располагается перед линзой на расстоянии 2*F*, и излучение в пределах угла α поступает на вход измерителя мощности. Угол α равен:

α=2arctg *D*/4*F*,

где *D* – диаметр линзы; *F* – фокусное расстояние. При этом отношение *D*/*F* выбирается максимальным (около единицы), чтобы угол захвата излучения линзой был максимальным:

α_{max}≈2arctg(1|4).

Так как входное отверстие измерителя расположено на расстоянии от линзы, равном 2*F*, таком же, на котором расположен источник излучения перед линзой, размер области, занимаемой излучением в плоскости $П_2$, будет равен размеру излучающей поверхности светодиода в плоскости $П_1$, и она должна быть меньше размера входного отверстия измерителя, чтобы все излучение, падающее на линзу, попало бы в измеритель. При этом будет измерена мощность излучения, излучаемая светодиодом в пределах угла α. Обозначим ее P_1. Однако при этом не будут учтены потери излучения за счет поглощения в линзе, френелевские потери на линзе и виньетирование излучения (часть излучения светодиода, распространяющаяся в пределах углов, превышающих угол α).

Чтобы учесть эти потери и скорректировать результат измерения, можно поступить следующим образом. В плоскость $П_1$ поместим приемную площадку фотодиода, позволяющего производить относительное измерение мощности излучения. При этом приемная площадка фотодиода должна быть по возможности большой, так как она определяет предельный угол φ_{max} излучения светодиода, регистрируемого фотодиодным измерителем, и должна быть не меньше размера области, занимаемой излучением в плоскости $П_2$. Производим отсчет показания фотодиодного измерителя. Обозначим этот отсчет P_2.

Затем фотодиодный измеритель перемещаем в плоскость $П_2$ и производим отсчет его показания. Обозначим его P_3.

Тогда истинный результат измерения может быть определен следующим образом:

$$P=P_1\cdot P_2/P_3 = P\cdot K_{23}. \quad (1)$$

Расстояния $2F$ между линзой и плоскостями $П_1$ и $П_2$, в которых производятся измерения, выбираются из нижеследующих соображений.

Одной из составляющих погрешности измерений описываемым методом является погрешность, определяемая разницей френелевских потерь излучения на входе фотодиодного измерителя при размещении его в плоскостях $П_1$ и $П_2$. В случае, когда измеряемый излучатель близок к модели точечного источника, как, например, некоторые типы полупроводниковых лазеров, при его расположении на оптической оси в плоскости $П_1$ разница френелевских потерь на входе фотодиода в плоскостях $П_1$ и $П_2$ будет близка к нулю, так как при этом будет одинаковым распределение излучения по углам падения на приемную площадку фотодиода в плоскостях $П_1$ и $П_2$, и, следовательно, погрешность измерения из-за указанного фактора будет минимальной и близкой к нулю.

В случае же, когда излучатель не может быть представлен моделью точечного источника, как, например, светодиод, разница френелевских потерь может оказаться весьма заметной и внести значительную погрешность при определении коэффициента K_{23} формулы (1). В этом случае описанная схема измерений с расстояниями $2F$ между линзой и плоскостями $П_1$ и $П_2$ может обеспечить наименьшую разницу френелевских потерь (а, следовательно, и наименьшую погрешность определения коэффициента K_{23} формулы (1)) по сравнению со всеми другими случаями расположения плоскостей $П_1$ и $П_2$. В частности, это объясняется тем, что в случае расстояний $2F$ разница френелевских потерь равна нулю не только для лучей, проходящих через центр линзы (как и во всех других случаях), но и для лучей, исходящих из области излучения, находящейся на оптической оси в плоскости $П_1$.

Кроме того при таком расположении плоскостей $П_1$ и $П_2$ появляется возможность сведения к минимуму погрешности измерений, связанной с неравномерностью чувствительности приемной площадки фотодиода по ее площади. Эта возможность объясняется тем, что распределение поля излучения и его масштаб в плоскостях $П_1$ и $П_2$ совпадают и отличаются лишь тем, что развернуты друг относительно друга на 180°. Поэтому, если после измерения величины P_2 в плоскости $П_1$ приемную площадку фотодиода повернуть вокруг оси на 180° и производить измерения величины P_3 в плоскости $П_2$, погрешность определения коэффициента K_{23} за счет неравномерности чувствительности приемной площадки фотодиода может быть сведена к минимуму.

Рассматриваемый метод позволяет измерять мощность излучения светодиодов в любом угле, не превышающем угол φ_{max}, что имеет большое практическое значение в тех случаях, когда необходимо измерить мощность излучения в заданном телесном угле. Отличие от вышеизложенного при этом заключается в следующем.

При измерениях мощности излучения в пределах углов φ, величины которых заключены между значениями α и φ_{max}, приемную площадку фотодиода отдаляют от светодиода в сторону линзы на расстояние L. При этом угол φ будет равен:

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} d/4L,$$

где d – диаметр приемной площадки фотодиода. Если при этом приемную площадку диафрагмировать, то угол φ будет определяться так:

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} d_п/4L,$$

где $d_п$ – диаметр диафрагмы.

Варьируя L и (или) $d_п$, можно измерять мощность излучения в пределах углов φ от максимального φ_{max} до угла α. Показания P_2 получают на выбранном расстоянии L. Разумеется, что для произведения отсчета показаний P_3 при указанных измерениях приемная площадка фотодиода с используемой диафрагмой (если она использовалась) помещается также на расстоянии L от плоскости $П_2$ (в сторону линзы).

При измерениях мощности излучения в пределах углов φ, меньших угла α, отличие от вышесказанного будет в том, что для получения величины P_1 необходимо между

плоскостью $П_1$ и линзой устанавливать диафрагму, имеющую диаметр $d_л$, определяющий угол φ, в котором будет производиться измерение мощности:

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} d_л/2l,$$

где l – расстояние диафрагмы от плоскости $П_1$. При установке диафрагмы в плоскости линзы, угол φ, в котором будет производиться измерение мощности, равен

$$\varphi = 2 \operatorname{arctg} d_л/4F.$$

Относительные измерения величин P_2 и P_3 с помощью фотодиода производят при этом в том же угле φ. Расчет мощности в выбранном телесном угле также производят по формуле (1).

Для проверки предложенного метода абсолютного измерения мощности излучения светодиодов были проведены сравнительные измерения описанным выше методом и калиброванным в широкой спектральной области абсолютным измерителем Mohectron Laser Powermeter 3000 (США) мощности излучения светодиодов, излучающих в различных участках спектра видимого диапазона. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Тип светодиода	Длина волны излучения $\lambda_{ср}$ нм	Спектральная ширина излучения $\Delta\lambda$ нм	Результат измерения предлагаемым методом мВт	Результат измерения контрольным измерителем мВт
АЛ172Б	870	19	8,7	9,4
КИПД21 Б1-К	655	17,5	1,1	1,2
КИПД21 С2-Л	505	27	0,8	0,9
КИПД21 С2-Г	470	29	3,3	3,5

Таблица 1. Результаты измерений

Как видно из табл. 1, погрешность абсолютных измерений мощности предложенным методом не превышает 12%, что вполне достаточно для применения светодиодов в фотохромотерапии.

Таким образом, предлагаемый метод измерения позволяет получать достоверные результаты при измерении абсолютных энергетических параметров светодиодов, применяемых, в частности, в фотохромотерапии, при использовании широко распространенных, недорогих и доступных неселективных измерителей мощности типа ИМО.

Литература

1. Вилисов А.А.. Светодиоды как альтернатива лазерам в медицине и связи. // Laser Market. 1994. №5.
2. Илларионов В.Е. Основы лазерной терапии М.: Респект (ИНОТЕХ-ПРОГРЕСС), 1992.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

В.Б.Карасев, В.А.Гримм, В.В.Котов, К.Д.Лосев, С.А.Смирнов

В работе приведены результаты расчета интерферометра, выполненного по схеме интерферометра Физо, и предназначенного для контроля аберраций оптических систем ИК-диапазона, а также однородности оптических материалов, используемых для их производства. Проведен габаритно-аберрационный расчет оптической схемы и определены допуски на отклонения конструктивных параметров от расчетных значений. Выполнен расчет основных характеристик интерферометра. Исследованы возможные погрешности восстановления волнового фронта при обработке интерферограмм. Описаны принципы работы на интерферометре при различных типах контролируемых объектов. Работа выполнена в отделении лазерной физики, техники и медицины СПбГУ ИТМО при поддержке научно-технической программы Министерства образования Российской Федерации «Федерально-региональная политика в науке и образовании» (подпрограмма: Международное научно-образовательное сотрудничество).

В основу разработанного интерферометрического комплекса для контроля волновых аберраций оптических систем в инфракрасной области спектра ($\lambda_к$ = 10.6 мкм) положен метод измерения волновых аберраций оптических систем, основанный на получении интерференционной картины волнового фронта, прошедшего через испытуемую оптическую систему, с последующей регистрацией интерферограмм с помощью пироэлектрической матрицы и их обработкой для получения распределения волновых аберраций по зрачку (топографии деформаций волнового фронта относительно ближайшей поверхности сравнения). Метод предусматривает получение информации о полной топографии деформаций волнового фронта по зрачку, анализ составляющих (регулярных и нерегулярных) деформации волнового фронта, а также оценку среднеквадратического значения деформации волнового фронта.

ВЫБОР ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Рассмотрим особенности работы схемы интерферометра Физо (ИФ) и некоторые его отличия от схемы интерферометра по Твайману-Грину (ИТГ). Оба интерферометра могут быть выполнены одинаково по схемам каналов ввода и регистрации волновых фронтов. Отличия возникают при прохождении наклонного 50% светоделительного зеркала, роль которого в обоих интерферометрах различна, и наличии в схеме ИТГ канала опорного пучка. В ИФ на первом проходе оно работает как полупрозрачная пластина, а на втором, когда излучение идет в канал регистрации, и для объектного и для опорного волнового фронта как полупрозрачное зеркало. В ИТГ на первом проходе на 50% зеркальном покрытии пучок разделяется на объектный и опорный, так что для одного полупрозрачное зеркало выступает в роли полупрозрачной пластины, а на втором проходе, когда происходит сведение волновых фронтов, роль его для пучков меняется на обратную. Таким образом, в ИФ светоделитель используется при первом прохождении как наклонная пластина и при втором – 50% зеркало. В ИТГ его функция комплексная – как пластины и 50% зеркала при обоих прохождениях. Можно показать, что в ИТГ требования к качеству светоделительного зеркала выше, чем в ИФ, а также не безразлично то, на какой поверхности нанесено светоделительное покрытие.

На рис.1 показаны два варианта исполнения наклонного светоделителя.

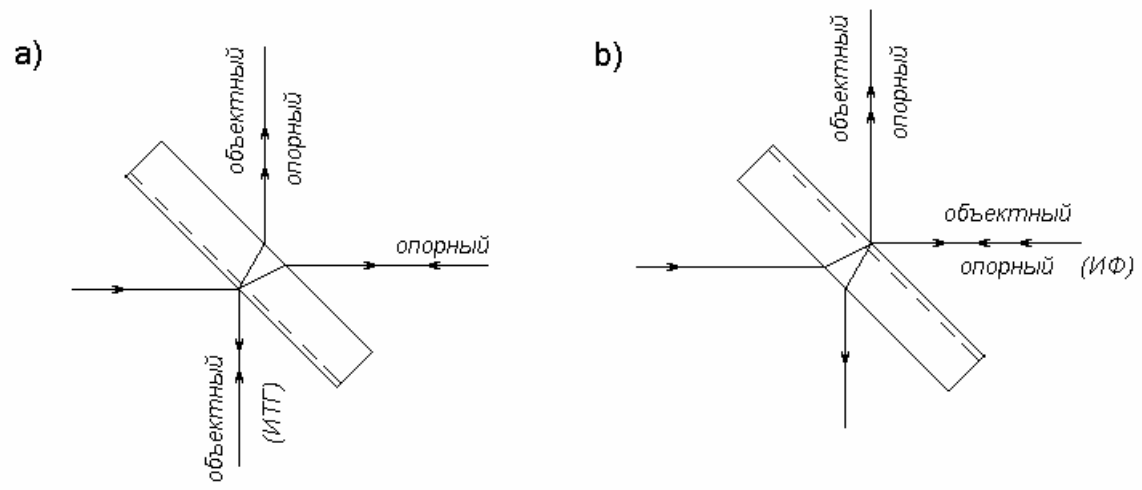


Рис.1. Работа светоделителя в ИТГ (a) и ИФ (b).

Светоделительное зеркало в схеме ИТГ может быть выполнено как в варианте светоделителя a) так и в варианте b). Оценим кривизны волновых фронтов объектного и опорного пучков для обоих случаев исполнения. Обозначим кривизну поверхности, определяемую общей ошибкой формы поверхности N, через ρ, а показатель преломления материала светоделителя - n. Угловой разворот светоделительного зеркала учитывать не будем. В случае a) при двойном прохождении будем иметь следующие кривизны объектного ρ(об) и опорного ρ(оп) фронтов:

$$\rho(\text{об}) = -2\rho + 2\rho(\text{n} - 1)$$

$$\rho(\text{оп}) = 4\rho(\text{n} - 1) + 2\rho\text{n}$$

В случае b) будем иметь:

$$\rho(\text{об}) = 4\rho(\text{n} - 1) + 2\rho\text{n}$$

$$\rho(\text{оп}) = -2\rho + 2\rho(\text{n} - 1)$$

Разница прогибов волновых фронтов одинакова и равна $2\rho\text{nm}^2$, но противоположна по знаку. Здесь m - это полуширина пучка. Погрешность измерения в длинах волн составляет величину $2\rho\text{nm}^2/\lambda$. Если допустить общую ошибку на поверхностях светоделителя N, то разностная ошибка составит $2\text{nN}/20$ (20 – приблизительное соотношение длины волны при контроле качества поверхности светоделителя пробным стеклом (λ=0.546 μm) и длины волны излучения в схеме интерферометра (λ=10.6 μm)). Если же рассмотреть работу светоделителя в схеме ИФ (вариант b), то можно видеть, что условия прохождения объектного и опорного волновых фронтов идентичны, а значит, одинаковы и кривизны фронтов. В данном случае ошибки формы поверхностей светоделителя не сказываются на результатах интерферометрического контроля. К недостаткам схемы ИФ можно отнести увеличенные потери излучения на светоделителе, в 2 раза превосходящие потери в ИТГ, и некоторые ограничения в части управления интенсивностями объектного и опорного пучков. В частности, интенсивность опорного пучка можно менять только за счет изменения коэффициента отражения поверхности эталонного зеркала (дискретно, за счет установки эталонного зеркала с другим покрытием) и установки поглощающих фильтров в объектном канале. В ИТГ динамический диапазон регулировки интенсивностей интерферирующих пучков несомненно выше, поскольку поглощающие фильтры можно устанавливать и в опорном канале. Компоновка схемы ИФ в принципе не исключает установку расширителя между светоделителем и эталонным зеркалом. Это обстоятельство позволяет исключить влияние термооптических аберраций расширителя на разностную волновую ошибку интерферометра. В схеме ИТГ данная возможность исключается, и требования к качеству расширителя повышаются. К несомненному достоинству схемы ИФ можно отнести наличие такого элемента схемы,

относительно которого можно обеспечить точную базировку прочих элементов схемы. В ИФ таким элементом является поверхность эталонного зеркала, которая в исходном положении ориентирована нормально к осям всех каналов интерферометра. Подобный элемент в ИТГ отсутствует, что приводит к работе канала регистрации в общем случае с внеосевыми объектным и опорным пучками и, как следствие, увеличивает собственную ошибку интерферометра. Подводя итог выполненному анализу можно объективно признать, что интерферометр по схеме Физо должен иметь меньшую инструментальную ошибку при интерферометрическом контроле объектов в сравнении с интерферометром по схеме Тваймана-Грина. На фоне увеличения точности контроля некоторые проблемы с соотношением интенсивностей опорного и объектного пучков выглядят менее значимыми и в принципе могут быть решены.

Разработанная оптическая схема ИК-интерферометра, за основу которой был принят интерферометр Физо, представлена на рис.2 и может быть представлена в виде трех взаимосвязанных частей: канала ввода излучения CO_2 лазера; канала регистрации (сведения) волновых фронтов и канала формирования объектного волнового фронта.

С целью унификации узлов интерферометра и в канале ввода излучения и в канале регистрации используются одинаковые зеркала (1, 3, 4). Светоделитель 5 и эталонное зеркало 6 выполнены в виде клиновидных пластин из селенида цинка. Клиновидность пластин обеспечивает увод рефлекса светоделителя на обратном проходе и рефлекса эталонного зеркала на прямом проходе за пределы полевой диафрагмы. Эталонное зеркало 6 на первом проходе дает опорный волновой фронт, интенсивность которого определяется коэффициентом отражения поверхности **B**. Поворот эталонного зеркала 6 вокруг координатных осей OX и OY, проходящих через точку P, на максимальный угол ±22.4’ обеспечивает получение интерференционной картины с числом полос 26 на поле приемника 13 диаметром 10 мм. Известно, что максимальный контраст интерференционная картина будет иметь при равных интенсивностях интерферирующих пучков. В интерферометре Физо на поверхности **B** возникает вторичная объектная волна, интенсивность которой определяется пропусканием объектного канала и тем же коэффициентом отражения поверхности **B**. Пространственно вторичная волна зеркальна опорной и приводит к уменьшению амплитуды опорной волны. Чтобы контраст интерференционной картины заметно не снижался, поверхность **B** должна иметь соотношение между коэффициентами отражения и пропускания не хуже, чем 1:10. Выравнивание же интенсивностей опорной и объектной волны обеспечивается подбором коэффициента отражения контрольного зеркала 9. Энергетические потери в объектном канале составляют около 80%. Двухкратный расширитель пучка галилеевского типа (7, 8) устанавливается в объектном канале. Теоретически он имеет в осевом пучке, с которым работает объектный канал, незначительные аберрации, существенно меньшие разностных аберраций канала сведения.

Канал сведения включает в себя параболическое зеркало 4, панкратический объектив 12 и дополнительную фокусирующую линзу 11. В объективе фокусное расстояние меняется от 85.5 мм до 299.1 мм. Изменение увеличения системы объектив+параболическое зеркало составляет $Г=7–2^X$, что позволяет без расширителя работать с объектами 70–20 мм в диаметре. Установка расширителя в объектном канале смещает диапазон в сторону больших размеров 140–40 мм. Дополнительная фокусирующая линза 11 используется при настройке интерферометра. При ее установке перед приемником 13 обеспечивается фокусировка объектного и опорного пучков в плоскости приемной площадки, совпадающей с ее задней фокальной плоскостью. Поворотом эталонного зеркала достигается сведение сфокусированных пятен и тем самым обеспечивается предварительная настройка интерферометра. Перед регистрацией интерферограммы линза 11 выводится из канала регистрации. В качестве дополнительной фокусирующей линзы используется линза 1 панкратического объектива, ориентированная выпуклой поверхностью к падающим на нее параллельным пучкам. Еще одна фокусирующая линза 2

используется в канале ввода излучения. Ее задний фокус совпадает с передним фокусом параболического зеркала 4. В этой же точке устанавливается диафрагма 14 для формирования однородной сферической волны. Диаметр d диафрагмы 14 определяется из условия пропускания системой ввода нулевой моды лазерного излучения $d=2\lambda/\pi\omega$. Входная апертура параболического зеркала ω равна (ω=0.05835). Отсюда следует, что размер диафрагмы 14 не должен превышать 115 μm. В канале ввода используется диафрагма с диаметром 100 μm, что обеспечивает незначительное перекрытие входной апертуры параболического зеркала. Можно рекомендовать также использование диафрагмы меньшего размера, например, 70 μm. Такая диафрагма обеспечит более высокое постоянство значений амплитуды светового поля на выходной апертуре канала ввода (в месте расположения эталонного зеркала), но увеличит рефлексные засветки и снизит интенсивность прошедшей через нее волны. Фокусное расстояние фокусирующей линзы определяется диаметром лазерного пучка (2m) и входной апертурой параболического зеркала $f'=m/\omega$. При диаметре пучка 7 мм f'=60 мм. В этом случае можно использовать для фокусировки линзу 1 панкратического объектива, установив ее выпуклой стороной к падающему излучению. Фокусировочной подвижкой в пределах ±2 мм обеспечивается совмещение перетяжки с фокусом параболического зеркала (чувствительность подвижки определяется требованиями к фокусировке дополнительной линзы 11 и составляет 0.03 мм). Точность установки диафрагмы 14 в месте совмещения составляет ±0.1 мм.

АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ

Основными характеристиками деформаций волнового фронта являются его полный размах (PV_W) и среднеквадратическая деформация волнового фронта (RMS_W). Полный размах волнового фронта равен

$$PV_W = \Delta W_{max} - \Delta W_{min} \tag{1}$$

где ΔW_{max} - максимальное значение деформаций волнового фронта; ΔW_{min} - минимальное значение деформаций волнового фронта. Среднеквадратическая деформация волнового фронта равна:

$$RMS_W = \sqrt{\frac{1}{\Omega}\iint_{\Omega}(\Delta W(x,y) - \Delta W)^2 dxdy} \tag{2}$$

$$\text{где } \Delta W = \frac{1}{\Omega}\iint_{\Omega}\Delta W(x,y)dxdy$$

Если размах относится к экстремальным характеристикам деформации волнового фронта, то среднеквадратическое значение относится к средневзвешенным по площади характеристикам. Для описания регулярных составляющих волнового фронта введем полярную систему координат на интерферограмме. Центр полярной системы координат совпадает с началом нормированной системы координат, а нормированные координаты точки (X,Y) равны

$$\begin{aligned} X &= -\rho \cdot \sin\varphi \\ Y &= \rho \cdot \cos\varphi \end{aligned} \tag{2}$$

где ρ - полярный радиус ($\rho \le 1$); φ - полярный угол, который отсчитывается от оси Y (направление против часовой стрелки считается положительным). Деформация волнового фронта $\Delta W(x,y)$ может быть разложена на следующие составляющие:

$$\Delta W = W_A + W_C + W_Z + W_M \tag{3}$$

где W_A - астигматическая ошибка волнового фронта; W_C - ошибка типа комы; W_Z - зональная ошибка волнового фронта; W_M - остаточные местные ошибки.

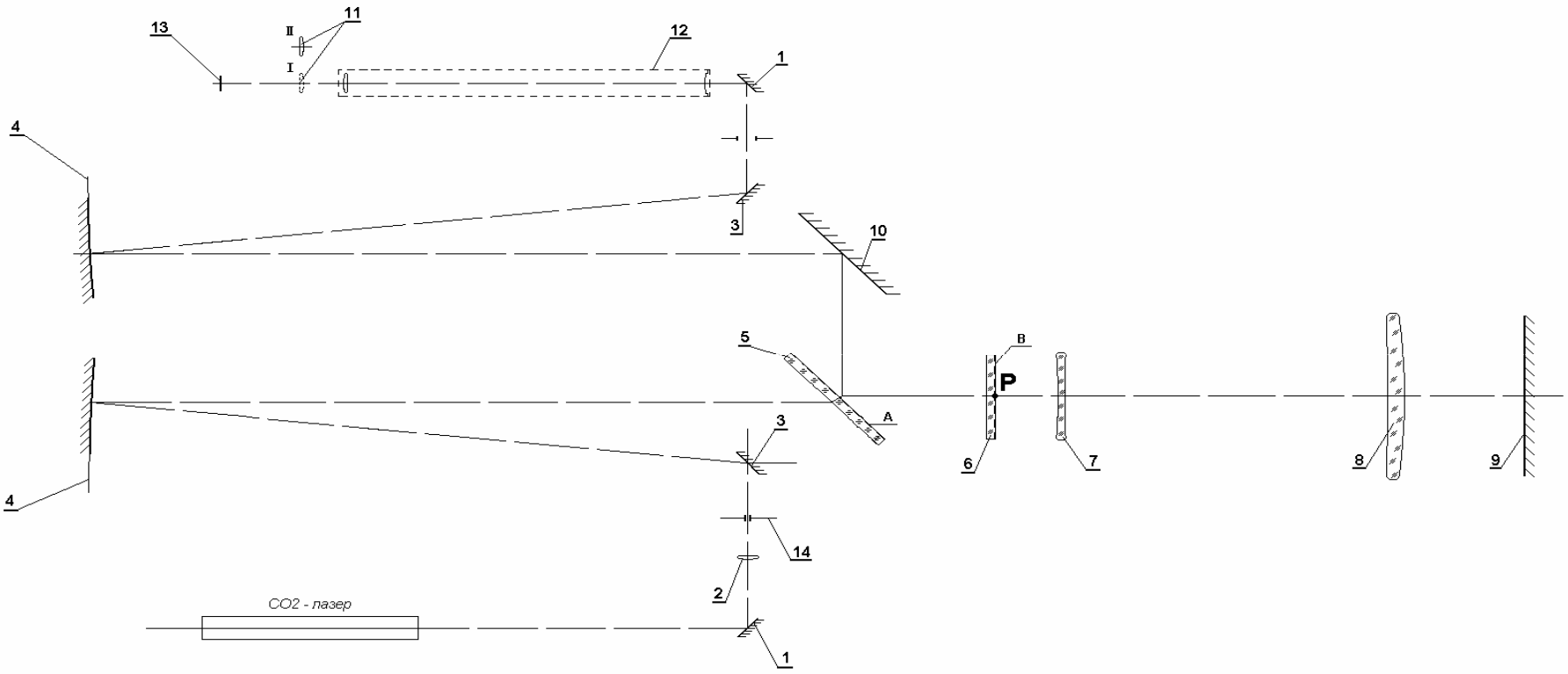


Рис.2. Оптическая схема ИК-интерферометра (по схеме Физо).

Ограничимся обобщенными выражениями для аберраций комы и астигматизма, которые соответствуют основным аберрациям четвертого порядка, поскольку они наиболее важны для оценки качества изготовления поверхности или оптической системы. Обобщенные выражения отличаются от общепринятых тем, что в них учитываются углы ориентации комы и астигматизма.

В общем случае астигматизм можно выразить следующим уравнением

$$W_A = A \cdot \rho^2 \cdot \cos 2(\varphi - \varphi_A) \quad (4)$$

где: A - коэффициент астигматизма; φ_A - угол ориентации главной оси астигматизма, т.е. азимутальное сечение, в котором астигматическая ошибка достигает положительного наибольшего значения. Вектором астигматизма $\vec{A}$ называется вектор с модулем A и развернутый на угол $2\varphi_A$. Обобщенная кома описывается уравнением

$$W_C = C \cdot (\rho^2 - 2/3) \cdot \rho \cdot \cos(\varphi - \varphi_C) \quad (5)$$

где: C - коэффициент комы; φ_C - угол ориентации главной оси комы, т.е. азимутальное сечение, в котором ошибка типа комы достигает положительного наибольшего значения. Под вектором комы будем понимать вектор с модулем C и развернутый на угол φ_C. Из (5-6) непосредственно следует, что при наличии нескольких ошибок данного типа вектор результирующей ошибки равен сумме векторов составляющих ошибок. Зональная ошибка может быть представлена либо в виде разложения по степеням ρ

$$W_Z = b_0 + b_2 \cdot \rho^2 + b_4 \cdot \rho^4 + b_6 \cdot \rho^6 + \ldots \quad (6)$$

либо в виде разложения по осесимметричным полиномам Цернике

$$W_Z = b_0 + b_2 \cdot R_2^0(\rho) + b_4 \cdot R_4^0(\rho) + b_6 \cdot R_6^0(\rho) + \ldots \quad (7)$$

Представление зональной ошибки в виде степенного разложения удобно для описания погрешностей изготовления поверхностей оптической системы. Представление зональной ошибки в виде полиномов Цернике удобно для анализа аберраций оптической системы. Местные ошибки характеризуют нерегулярные ошибки волнового фронта и аберраций высших порядков. Они определяются как разность между полной деформацией волнового фронта $\Delta W(x,y)$ и ее регулярными составляющими. Эффективный вклад каждой ошибки в среднеквадратическую ошибку волнового фронта оценивается по формуле:

$$F_t = 1 - \frac{RMS_{W-t}^2}{RMS_W^2} \quad (8)$$

где: t - тип ошибки (A,C,Z,M); RMS_{W-t} - среднеквадратическая деформация волнового фронта после выделения t-ой регулярной составляющей; RMS_W - среднеквадратическая деформация волнового фронта $\Delta W(x,y)$. Если $F_t < 0.2$, то t-я регулярная составляющая с 95% вероятностью неотличима от нуля случайными флуктуациями волнового фронта или, например, погрешностями измерения.

ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ОДНОРОДНОСТИ ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК

Определение оптической однородности материала проводится в оптических деталях, имеющих форму плоскопараллельной пластины. Форма светового отверстия образцов не имеет значения. Неплоскостность полированных рабочих поверхностей представленных образцов контролируемого материала не должна быть более 3 интерференционных полос при допуске на местные ошибки до 0.5 полосы (допускается контроль под пробное стекло при λк = 0.55 мкм). Интерферометр приводится в рабочее состояние в соответствии инструкцией по эксплуатации. На выходе автоколлимационного прибора АКП-10.6 устанавливается измерительная пропускающая пластина (эталонное зеркало), имеющая коэффициент отражения от рабочей поверхности не более 0.04. С пульта управления приводами АКП-10.6 в канале регистрации вводится дополнительная линза, и интерферометр переводится в юстировочный режим. Угловыми юстировочными подвижками рабочая поверхность пропускающей пластины устанавливается перпендикулярно оптической оси. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально и с указанием

координат центра тяжести автоколлимационного блика относительно центрального (нулевого) пикселя. Погрешность установки составляет ± 1 пиксель (± 15″). На минимальном расстоянии от пропускающей пластины достаточном для установки держателя контролируемой пластины устанавливается отражающая измерительная пластина (контрольное зеркало). Формально коэффициент отражения пластины выбирается исходя из пропускания контролируемой детали для достижения равенства интенсивностей опорного и измерительного волновых фронтов. На практике, как правило, используют отражающую пластину с зеркальным покрытием. Угловыми юстировочными подвижками рабочая поверхность отражающей пластины устанавливается перпендикулярно оптической оси. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально. Между измерительными пластинами вводится контролируемая деталь, закрепленная в держателе. Проводится дополнительная юстировка отражающей измерительной пластины. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально и с указанием координат центра тяжести автоколлимационного блика относительно центрального (нулевого) пикселя. Погрешность установки составляет ± 1 пиксель (± 15″). С пульта управления приводами АКП-10.6 в канале регистрации выводится дополнительная линза, и интерферометр переводится в измерительный режим. С помощью юстировочных подвижек пропускающей пластины достигается интерференционная картина с требуемым ребром клина (справа, слева, вверху, внизу) и числом полос (10 ÷ 15). Если в поле интерференции наблюдается паразитная интерференционная картина от поверхностей контролируемой детали, то с помощью юстировочных подвижек держателя образца производится незначительный наклон детали до исчезновения паразитной интерференционной картины.

Если размер контролируемой детали явно меньше диаметра входного люка интерферометра, то с пульта управления приводами АКП-10.6 увеличивается размер изображения интерференционной картины с целью полного заполнения пироэлектрической матрицы фотоприемника. Производится регистрация интерференционной картины в видеопамять интерферометра с последующей записью ее в компьютер. Регистрация повторяется 4 ÷ 6 раза для различного положения ребра клина. На компьютере производится обработка изображения интерференционной картины, определение координат центров полос, глобальная или локальная аппроксимация и анализ отдельных интерферограмм. Далее производится усреднение отдельных полиномов (матриц) и вычисляется случайная погрешность восстановления топографии деформации волнового фронта. Если при контроле рабочих поверхностей среднеквадратическая деформация волнового фронта относительно ближайшей плоскости сравнения (RMS_F) превышает 0.07 λ_r , (λ_r = 0.633 мкм), то вычисляется суммарная топография деформаций волнового фронта от рабочих поверхностей (W_r) и по формуле $W_t = \lambda_r / \lambda_t \cdot (1 - n)/2 \cdot W_r$ определяется поправка на величину деформации волнового фронта, прошедшего через контролируемый образец, вызванная ошибками поверхностей.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Измерение волновых аберраций телескопических систем производится как в центре поля, так и по полю. Подготовка интерферометра к работе аналогична описанной выше. Основное отличие заключается в проведении окончательной юстировки отражающей пластины до установки в схему контроля проверяемой телескопической системы. Если коэффициент пропускания телескопической системы составляет 0.7 ÷ 0.8, то желательно использовать отражающую пластину с френелевским отражением (непросветленную). Контролируемая телескопическая система вводится между измерительными пластинами и с помощью юстировочных подвижек устанавливается на ось интерферометра. Контроль установки телескопической системы проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально и с указанием координат центра тяжести автоколлимационного блика относительно центрального (нулевого) пикселя. При установке телескопической системы в схему контроля желательно, чтобы пропускающая пластина находилась вблизи ее входного зрачка, а отражающая пластина вблизи выходного зрачка или наоборот. Если контролируемая оптическая система имеет изломанную оптическую ось, то базовую плоскость

телескопической системы устанавливают перпендикулярно оптической оси интерферометра, а отражающую пластину выставляют по автоколлимационному блику. Возможна предварительная пространственная ориентация отражающей пластины с помощью автоколлимационного теодолита. В этом случае контроль установки телескопической системы на ось интерферометра проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ). С пульта управления приводами АКП-10.6 в канале регистрации выводится дополнительная линза, и интерферометр переводится в измерительный режим. Если входной зрачок контролируемой телескопической системы явно меньше диаметра входного люка интерферометра, то с пульта управления приводами АКП-10.6 увеличивается размер изображения интерференционной картины с целью полного заполнения пироэлектрической матрицы фотоприемника. С помощью юстировочных подвижек пропускающей пластины достигается интерференционная картина с требуемым ребром клина (справа, слева, вверху, внизу) и числом полос (10 ÷ 15). Производится регистрация интерференционной картины в видеопамять интерферометра с последующей записью ее в ПК. Регистрация повторяется 4 ÷ 6 раз для различного положения ребра клина. На персональном компьютере производится обработка изображения интерференционной картины, определение координат центров полос, глобальная или локальная аппроксимация и анализ отдельных интерферограмм. Далее производится усреднение отдельных полиномов (матриц) и вычисляется случайная погрешность восстановления топографии деформации волнового фронта. В случае необходимости проводится расчет оптико-физических критериев качества изображения. Для контроля волновых аберраций по полю, телескопическая система разворачивается на заданный полевой угол в пространстве предметов (пространстве изображений при контроле в обратном ходе). Желательно, чтобы ось разворота проходила через входной зрачок контролируемой телескопической системы. Это особенно важно, если входной зрачок телескопической системы соизмерим с входным люком интерферометра. Отражающая пластина разворачивается на угол, соответствующий полевому углу в пространстве изображений. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально и с указанием координат центра тяжести автоколлимационного блика относительно центрального (нулевого) пикселя. В дальнейшем последовательность работы аналогична контролю аберраций в центре поля. Контроль волновых аберраций телескопической системы проводится для нескольких ориентировок, как правило, с разворотом вокруг оптической оси через 90°.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ОБЪЕКТИВОВ

Контроль ИК-объективов или оптико-механических блоков тепловизионных систем проводится аналогично контролю телескопических систем, только вместо отражающей пластины используют измерительную вогнутую сферу с достаточно высоким относительным отверстием. Интерферометр приводится в рабочее состояние в соответствии инструкцией по эксплуатации. На выходе автоколлимационного прибора АКП-10.6 устанавливается измерительная пропускающая пластина (эталонное зеркало), имеющая коэффициент отражения от рабочей поверхности не более 0.04. С пульта управления приводами АКП-10.6 в канале регистрации вводится дополнительная линза, и интерферометр переводится в юстировочный режим. Угловыми юстировочными подвижками рабочая поверхность пропускающей пластины устанавливается перпендикулярно оптической оси. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально и с указанием координат центра тяжести автоколлимационного блика относительно центрального (нулевого) пикселя. Погрешность установки составляет ± 1 пиксель (± 15″). Контролируемый объектив устанавливается в объективодержателе входным зрачком к пропускающей пластине таким образом, чтобы базовая плоскость контролируемого объектива была перпендикулярна оптической оси интерферометра, а ось объектива совпадала в оптической осью интерферометра. Вблизи фокальной плоскости объектива устанавливается измерительная сфера, закрепленная в держателе с пятью степенями свободы. С помощь юстировочных подвижек центр кривизны измерительной сферы устанавливают на ось объектива и совмещают с фокальной плоскостью. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному

устройству (ВКУ) визуально. Если коэффициент пропускания контролируемого объектива составляет $0.7 \div 0.8$, то желательно использовать измерительную сферу с френелевским отражением (непросветленную) В дальнейшем последовательность работы аналогична контролю аберраций телескопической системы в центре поля. Контроль волновых аберраций по полю может быть реализован по двум принципиальным схемам. При контроле по схеме «А» объективодержатель устанавливается на поворотный рычаг, по которому перемещаются поперечные направляющие. Поперечные направляющие должны быть прямолинейны и параллельны опорному торцу объективодержателя. По поперечным направляющим перемещается каретка, на которой устанавливается измерительная сфера, закрепленная в держателе с пятью степенями свободы. Поворотный рычаг фиксируется в положении, при котором опорный торец объективодержателя перпендикулярен оптической оси интерферометра. Контролируемый объектив закрепляется в объективодержателе так, чтобы входной зрачок находился вблизи оси поворотного рычага. Поперечные направляющие устанавливаются вблизи фокальной плоскости объектива. С помощь юстировочных подвижек центр кривизны измерительной сферы устанавливают на ось объектива и совмещают с фокальной плоскостью. Контроль юстировки проводится по видеоконтрольному устройству (ВКУ) визуально. При контроле по схеме «Б» не требуются поворотный рычаг и поперечные направляющие. В этом случае объективодержатель устанавливается на поворотный стол. Контролируемый объектив закрепляется в объективодержателе так, чтобы его задняя узловая точка совпадала с осью вращения поворотного стола. При повороте объектива на угол ω измерительная сфера смещается от объектива на расстояние ($\Delta S'$) вычисляемое по формуле

$$\Delta S' = F'_{об} \cdot \left(\frac{1}{\cos\omega} - 1 \right) \qquad (10)$$

Возможно применение механического Т-образного устройства для автоматического смещения измерительной сферы.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

Погрешность восстановления волнового фронта при обработке интерферограмм ограничивается набором ошибок, вызванных погрешностью измерительной схемы, непостоянством внешних условий, погрешностью определения центров координат полос, а также погрешностью используемого метода аппроксимации.

Погрешность измерительной схемы носит систематический характер и обусловлена остаточными аберрациями оптической схемы интерферометра и технологическими потерями при изготовлении оптических элементов интерферометра и его сборки. Погрешность измерительной схемы, обусловленная остаточными аберрациями оптической схемы интерферометра, зависит от разности аберраций опорного и измерительного волновых фронтов. При нулевом клине (опорный и измерительный волновые фронты распространяются вдоль оптической оси интерферометра) разность аберраций равна нулю. При клине, соответствующем 13 интерференционным полосам, разность аберраций (PV) составляет 0.02 интерференционной полосы, среднеквадратическая деформация волнового фронта (RMS) не превышает 0.004 интерференционной полосы. При максимальном клине, соответствующем 26 интерференционным полосам, разность аберраций (PV) составляет 0.06 интерференционной полосы, среднеквадратическая деформация волнового фронта (RMS) не превышает 0.012 интерференционной полосы.

Погрешности измерительной схемы, вызванные технологическими потерями при изготовлении оптических элементов интерферометра и его сборки, должны быть максимально минимизированы за счет жестких допусков на оптические элементы и обеспечения контроля, по возможности, в видимой области спектра.

Погрешности, связанные с непостоянством внешних условий, могут быть вызваны турбулентностью атмосферы, воздушными потоками, градиентами температур, вибрациями в процессе регистрации интерферограммы. При обеспечении оптимальных условий контроля эти ошибки малы, изменяются во времени случайным образом и могут рассматриваться как случайные ошибки с нормальным законом распределения и математическим ожиданием,

равным нулю. Погрешности измерений обусловлены неравномерностью распределения точек на интерферограмме, погрешностью измерения координат центров полос интерферограммы, а также интерференционными шумами паразитной засветки и пониженным контрастом интерферограммы. По своей природе эти ошибки имеют случайный характер с нормальным законом распределения. Для восстановления топографии волнового фронта по всему зрачку контролируемой оптической системы необходимо проводить аппроксимацию значений волнового фронта по нерегулярной системе опорных точек. Как показывает практика контроля оптических систем и их элементов, в большинстве случаев применяются глобальные методы описания деформаций волновых фронтов. При глобальной аппроксимации волновой фронт представляется в виде двумерных степенных полиномов или полиномов Цернике. Коэффициенты при полиномах находятся методом наименьших квадратов (МНК).

Пусть N - число измеренных точек на интерферограмме, W_r, $r=1,N$ - значения деформаций волнового фронта в точках с координатами $(x,y)_r$, а $\varphi_1(x,y)$, $\varphi_2(x,y)$, … , $\varphi_m(x,y)$ - система линейно независимых полиномов. Тогда задача аппроксимации W_r системой функций $\varphi_l(x,y)$, $l=1,m$ сводится к решению МНК системы линейных уравнений вида:

$$\mathrm{W_r} = \omega_1 \cdot \varphi_{\mathrm{r,1}} + \omega_2 \cdot \varphi_{\mathrm{r,2}} + \ldots + \omega_{\mathrm{m}} \cdot \varphi_{\mathrm{r,m}} \left(\mathrm{r} = 1, \mathrm{N}\right) \tag{11}$$

где ω_1, ω_2, … ω_m, - искомые постоянные коэффициенты; $\varphi_{r,l}$ - значение l-го полинома в r-ой точке.

Статистический анализ системы нормальных уравнений МНК производится по оценке дисперсии (σ_a^2)

$$\sigma_{\mathrm{a}}^2 = \mathrm{R_m} / \left(\mathrm{N} - \mathrm{m}\right) \tag{12}$$

где $\mathrm{R_m} = \sum_{\mathrm{r=1}}^{\mathrm{N}} \left(\mathrm{W_r} - \sum_{\mathrm{l=1}}^{\mathrm{m}} \omega_{\mathrm{l}} \cdot \varphi_{\mathrm{r,l}} \right)^2$ - остаточная сумма квадратов.

Оценка дисперсии (σ_a^2) характеризует дисперсию экспериментальных данных относительно аппроксимирующего полинома и является показателем точности восстановления волнового фронта по отдельной интерферограмме. При обеспечении оптимальных условий контроля и отсутствия резких изломов волнового фронта и мелкоструктурных ошибок, погрешность восстановления волнового фронта по результатам обработки отдельной интерферограммы, как правило, составляет $0.01 \div 0.02$ интерференционной полосы. Для дальнейшего уменьшения погрешности восстановления волнового фронта необходимо использовать регулярную систему опорных точек, т.е. переходить от полосовых к фазоизмерительным методам контроля. Топография волнового фронта, восстановленная в результате обработки одной интерферограммы, является реализацией случайной функции. Мерой погрешности этой функции является средняя дисперсия ($\overline{\sigma}_W^2$) восстановления волнового фронта, которая равна

$$\overline{\sigma}_{\mathrm{W}}^2 = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{N}} \cdot \sigma_{\mathrm{a}}^2 \tag{13}$$

Положим, что в результате интерферометрического контроля зарегистрировано и измерено n интерферограмм. Значения деформаций волнового фронта, измеренные на дискретном множестве точек на интерферограмме, образуют выборку из нормальной генеральной совокупности. Поэтому в статистическом смысле измерения нескольких интерферограмм представляют собой неравномерные выборки из нормальной генеральной совокупности. В соответствии с правилами обработки неравноточных измерений каждой топографии (W_i), полученной по отдельной интерферограмме, припишем вес P_i, равный

$$P_i = \frac{1}{\overline{\sigma}_{W_i}^2} \tag{14}$$

Среднее значение деформаций волнового фронта равно

$$\overline{W} = \frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot W_i \;\; ; \qquad P = \sum_{i=1}^{n} P_i \tag{15}$$

В качестве случайной погрешности восстановления среднего волнового фронта по результатам обработки *n* интерферограмм примем среднюю дисперсию по зрачку ($\overline{\sigma}^2_{\overline{W}}$), которая равна

$$\overline{\sigma}^2_{\overline{W}} = \frac{1}{P \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot RMS^2_{(W_i - \overline{W})} \tag{16}$$

В качестве систематической погрешности восстановления среднего волнового фронта по результатам обработки *n* интерферограмм примем среднее значение дисперсий отдельных измерений ($\overline{\sigma}^2_a$), которая равна

$$\overline{\sigma}^2_a = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot \sigma^2_{ai} \tag{17}$$

Случайная погрешность восстановления среднего волнового фронта зависит от числа обработанных интерферограмм и при увеличении числа кадров уменьшается. Поэтому рекомендуется выбирать такое количество интерферограмм, чтобы случайная погрешность восстановления средней топографии была меньше систематической. В случае резких изломов волнового фронта или наличия мелкоструктурных ошибок для уменьшения систематической погрешности следует применять локальные методы аппроксимации.

Из приведенных выше расчетов следует, что суммарная погрешность восстановления волнового фронта в основном определяется погрешностями методики измерения и алгоритма обработки. Ее величина при самых благоприятных условиях измерения составляет 0.01 ÷ 0.02 интерференционной полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы, связанные с выбором и обоснованием оптической и функциональной схем построения лазерного интерферометрического комплекса, предназначенного для контроля качества оптических систем, работающих в ИК-диапазоне, а также оптических материалов, используемых при их изготовлении. Проведен сравнительный анализ двух возможных зеркально-линзовых оптических схем интерферометра – схема Тваймана-Грина и схема Физо. Вследствие меньшей инструментальной ошибки, большей компактности схемы, позволяющей реализовать модульный принцип построения прибора, и ряда конструктивных преимуществ, окончательный выбор оптической схемы был сделан в пользу схемы интерферометра Физо. Анализ погрешности измерительной схемы, обусловленной остаточными аберрациями, показал, что при контроле объектов диаметром от 10 мм до 140 мм и угле клина между опорным и предметным пучками, соответствующем 13 интерференционным полосам, размах ошибки волнового фронта (PV) не превосходит 0.02λ, а среднеквадратическая деформация (RMS) не превышает 0.004λ. При тех же условиях, но угле клина, соответствующем 26 интерференционным полосам, размах ошибки (PV) – достигает величины 0.06λ, а RMS – 0.012λ. При контроле объектов, имеющих диаметр 150 мм, PV – 0.025λ, RMS – 0.005λ (при 13 интерференционных полосах). В этом случае необходима замена телескопической насадки. В работе приведено описание функциональной схемы прибора и сформулирован ряд необходимых требований, предъявляемых к отдельным узлам, элементам и комплектующим изделиям. Описаны принципы работы и юстировка интерферометра при измерении оптической однородности плоских заготовок, измерении волновых аберраций телескопических систем и объективов, сформулированы требования к метрологической аатестации прибора и условиям его эксплуатации.

АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОПИСАНИЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. Майорова, И.Е. Скалецкая, Е.Е. Орлова

Введение

Методы поляризационно-оптического анализа современных нанотехнологических материалов приобретают особую значимость благодаря развитой теоретической и экспериментальной базе. Поляризационно-оптические методы исследования материалов, по сравнению со спектрофотометрическими, обладают более высокой экспериментальной точностью измерений. Это связано с тем, что при поляризационно-оптической диагностике исследуются амплитудно-фазовые соотношения поля световой волны, а не ее энергетика.

Поляризационно-оптические параметры (ПОП) Ψ и Δ являются параметрами модуля и аргумента комплексной функции отношения обобщенных комплексных коэффициентов Френеля исследуемой оптической системы. Они входят в основное уравнение эллипсометрии (ОУЭ) Друде [1]:

$$\mathrm{tg}(\Psi)e^{i\Delta} = \frac{\dfrac{E^{p}_{отр}}{E^{p}_{пад}}}{\dfrac{E^{s}_{отр}}{E^{s}_{пад}}} = \frac{\left|\dfrac{E^{p}_{отр}}{E^{p}_{пад}}\right|}{\left|\dfrac{E^{s}_{отр}}{E^{s}_{пад}}\right|}\exp\{i[\Delta^{p}_{отр} - \Delta^{s}_{пад} + \Delta^{s}_{пад} - \Delta^{s}_{отр}]\}. \qquad (1)$$

Основные проблемы прикладной эллипсометрии, предназначенной для нахождения значений ПОП (1) по экспериментальным данным $\Psi(\varphi) = \Psi_{эксп}$ и $\Delta(\varphi) = \Delta_{эксп}$ при разных углах падения света φ, состоят в корректности выбора оптической модели отражающей системы, адекватно описывающей ее материальные оптические параметры (МОП).

В качестве критерия корректности можно рассмотреть многоугловую *G*-функцию правдоподобия:

$$G = \sum_{j=1}^{\max} a_j\left(\Psi_{экс}(\varphi_j) - \Psi_{теор}(\varphi_j)\right)^2 + b_j\left(\Delta_{экс}(\varphi_j) - \Delta_{теор}(\varphi_j)\right)^2. \qquad (2)$$

Варианты методологических подходов

На рис. 1 представлена алгоритмическая схема автоматизированной обработки эллипсометрических данных ПОП с целью нахождения подходящих по критерию (2) МОП для прикладных производственных задач.

На первом этапе этого алгоритма по данным ПОП, получаемых с помощью лазерного эллипсофотометра (ЛЭФ), производится выбор стартовой модели из банка процедур частных моделей. На следующем этапе выбирается пара конкурирующих моделей. По соответствующим значениям конкурирующих критериев (2) выбирается наиболее статистически значимая из них модель (по наименьшей величине невязок *G*).

При значении выбранного параметра правдоподобия G, удовлетворяющего наперед заданной точности (ε), т.е. $G < \varepsilon$, алгоритм выдает рабочий документ о найденных расчетных значениях МОП (n_j, k_j, d_j) и выходит на завершение работы. При невыполнении критерия G производится корректировка параметров или выбранной текущей оптической модели с повторением уже рассмотренной части алгоритма.

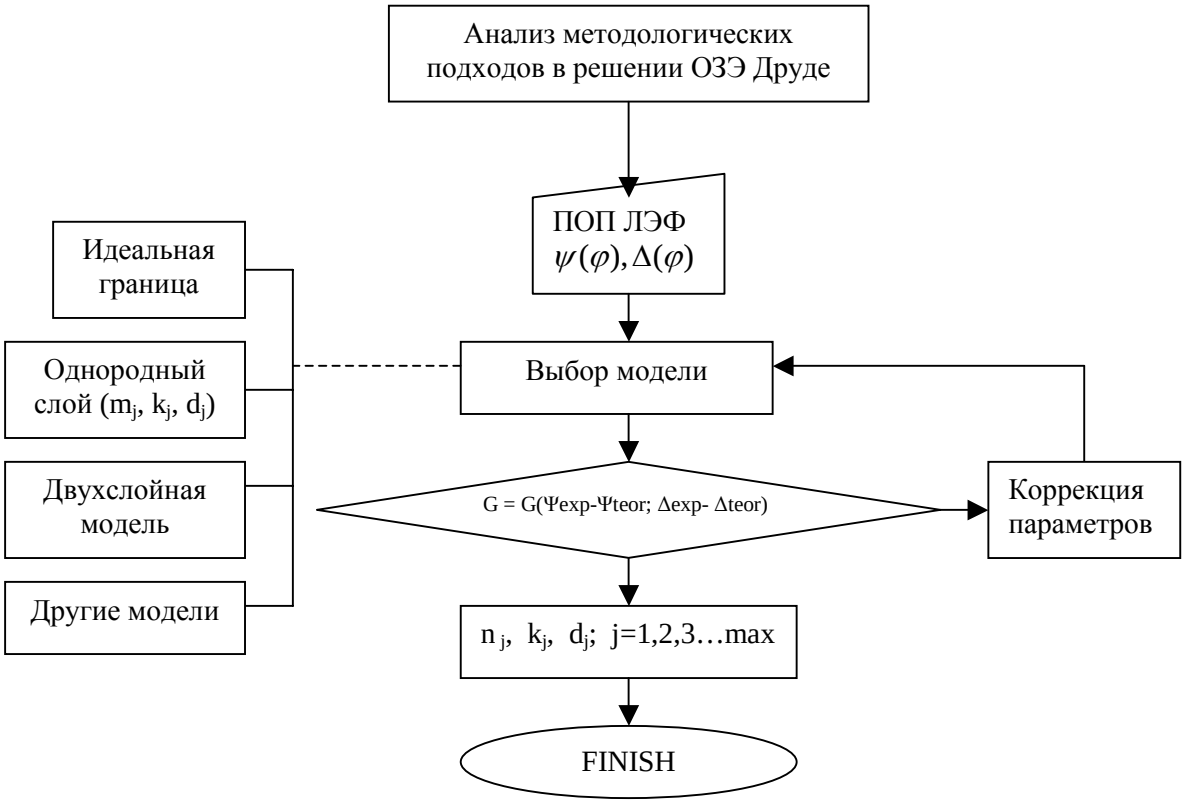


Рис.1. Блок-схема алгоритма обработки эллипсометрических данных

В банке процедур аналитических моделей могут быть оптимальным образом представлены четыре основополагающих алгоритма решения ОУЭ Друде (1).

1. Оптическая модель идеальной границы Френеля:

$$\mathrm{tg}(\Psi)\exp\{i\Delta\} = R_p / R_s,$$

$$m = n - ik; \quad N_j = m_j / m_{j-1},$$

$$R_p = \frac{N_m Cos(\varphi_{m-1}) - N_{m-1} Cos(\varphi_m)}{N_m Cos(\varphi_{m-1}) + N_{m-1} Cos(\varphi_m)},$$

$$R_s = \frac{N_{m-1} Cos(\varphi_{m-1}) - N_m Cos(\varphi_m)}{N_{m-1} Cos(\varphi_{m-1}) + N_m Cos(\varphi_m)}.$$

2. Модель однородного слоя:

$$\delta_m = d_m \frac{2\pi}{\lambda} N_m Cos(\varphi_m),$$

$$R_p = \frac{R^p_{m-1,m} + R^p_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\}}{1 + R^p_{m-1,m} R^p_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\}},$$

$$R_s = \frac{R^s_{m-1,m} + R^s_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\}}{1 + R^s_{m-1,m} R^s_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\}}.$$

3. Модель двухслойной оптической системы.

$$R_p = \frac{R^p_{m-1,m} + R^p_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^p_{m-1,m}R^p_{m,m+1}R^p_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^p_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}{1 + R^p_{m-1,m}R^p_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^p_{m-1,m}R^p_{m,m+1}R^p_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^p_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}},$$

$$R_s = \frac{R^s_{m-1,m} + R^s_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^s_{m-1,m}R^s_{m,m+1}R^s_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^s_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}{1 + R^s_{m-1,m}R^s_{m,m+1}\exp\{-2i\delta_m\} + R^s_{m-1,m}R^s_{m,m+1}R^s_{m+1,m+2}\exp\{-2i\delta_{m+1}\} + R^s_{m,m+1}\exp\{-(\delta_{m-1}+\delta_m)\}}.$$

4. Модель градиентно-неоднородных по глубине структур. Моделирование неоднородных по глубине оптических систем многослойной структурой с обобщенными комплексными коэффициентами Френеля для ортогональных компонент (ν) в форме цепных дробей $R^\nu(\lambda,\varphi)$:

$R^\nu(\lambda,\varphi) =$

$$= r^\nu_{1,2} + \cfrac{1-(r^\nu_{1,2})^2}{r^\nu_{1,2} + \cfrac{\exp\{\delta_2\}}{r^\nu_{2,3} + \cfrac{1-(r^\nu_{2,3})^2}{r^\nu_{2,3} + \cfrac{\exp\{\delta_3\}}{----}}}}$$

$$\ldots\ldots\ldots----\ldots + \cfrac{\exp\{\delta_j\}}{r^\nu_{j,j+1} + \cfrac{1-(r^\nu_{j,j+1})^2}{r^\nu_{j,j+1} + \cfrac{\exp\{\delta_{j+1}\}}{----}}}$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots------\ldots + \frac{\exp\{\delta_{l-1}\}}{r^\nu_{l-1,l}}$$

Здесь связь углов между слоями описывается инвариантным законом Снеллиуса:

$m_j \operatorname{Sin}(\varphi_j) = \operatorname{Const}(j)$.

Эллипсометрические параметры ОУЭ (1) $\operatorname{tg}(\Psi)\exp\{i\Delta\} = a + ib$ можно представить в виде

$$\Delta = \begin{cases} arctg\left(\dfrac{b}{a}\right) & если \quad a,b>0 \\ arctg\left(\dfrac{b}{a}\right)+\pi & если \quad a<0 \\ arctg\left(\dfrac{b}{a}\right)+2\pi & если \quad a>0, b<0 \end{cases};$$

$$\Psi = arctg\sqrt{a^2+b^2}.$$

Апробация рассмотренных алгоритмов при составлении контрольных примеров показала некоторое несоответствие между экспериментальными значениями экстинкции (k) для диэлектриков с соответствующими линейными коэффициентами поглощения (α) [2] исследуемых материалов, описываемой формулой $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda}k$ (при λ=6328 Å).

Контрольные примеры

Для начала выявим проблемы простейшей задачи Друде (1) для диэлектриков с идеальными границами Френеля на примере эллипсометрического анализа оптических констант стекол марки НС.

Оптические стекла марки НС являются монохромными светофильтрами. Их спектры, представленные на рис. 2, существенно отличаются друг от друга по параметру поглощения (α) и обладают индифферентным ходом в видимом диапазоне спектра.

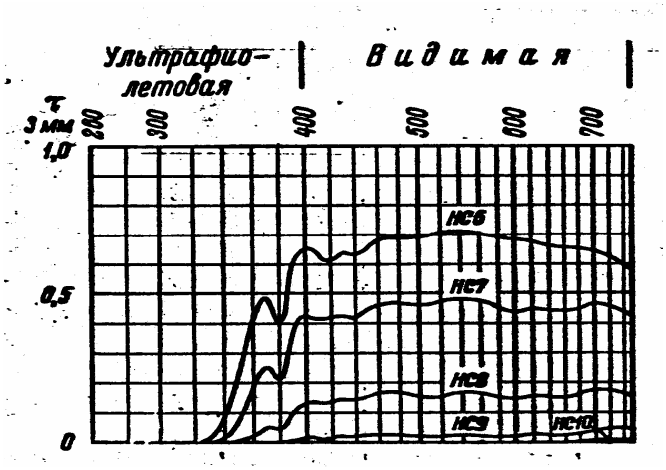


Рис. 2. Типовые спектры пропускания оптических стекол марки НС.

Типовой спектр пробного определения показателя преломления одного из стекол этой марки, аппаратно полученный на ЛЭФ фирмы К.Цейса, представлен на рис. 3. Эти данные характеризуют недостаточную калибровочную настройку спектроэллипсометра.

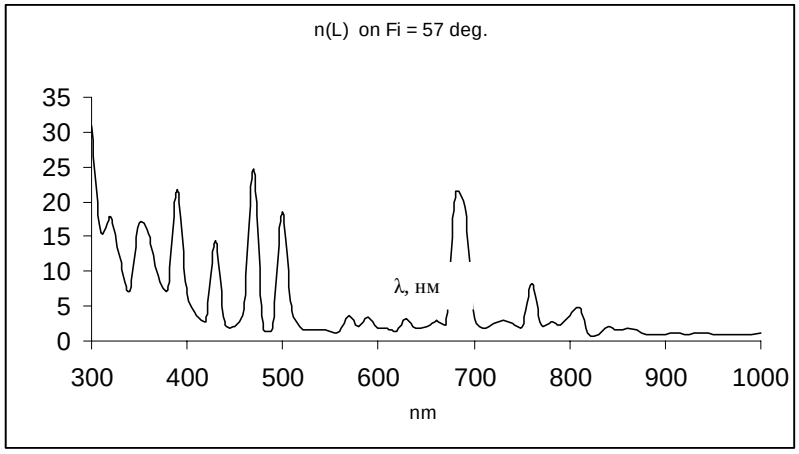
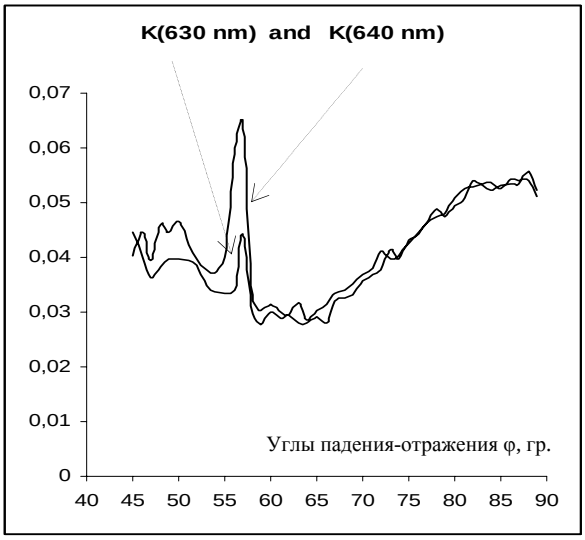


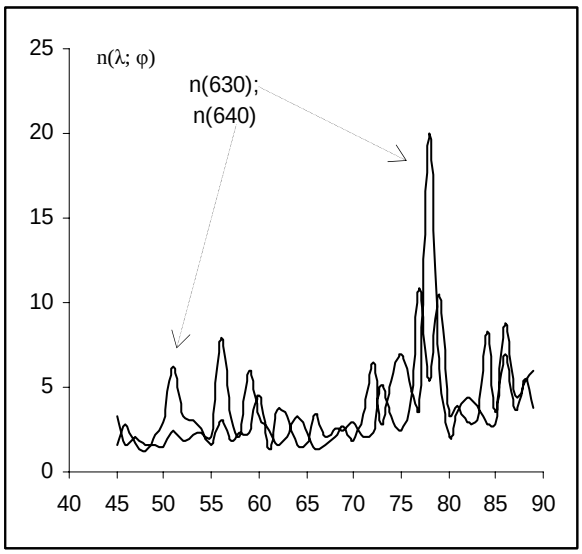
Рис. 3. Аппаратный спектр показателя преломления стекла НС на ЛЭФ (К.Цейса)

Для определения компонент комплексного (m) показателя преломления n и k этого стекла на длине волны He-Ne лазера (632.8нм) рассмотрим спектры наиболее близких длин волн 630 нм и 640 нм, представленные на рис. 4.

Представленные на рис.3 и 4, а, в данные демонстрируют далеко не индифферентный характер ни по длинам волн λ, ни по углам падения φ. Видно, что монотонное поведение угловых разверток искомых констант материала приходится на диапазон от 60° до 70°. Подобные осцилляции могут иметь природу приборных артефактов из-за не совсем качественной юстировки и метрологической проработки его программного обеспечения.

Контрольный пересчет первичной информации (рис. 5) представлен на рис.6. На рис. 5 представлены экспериментальные значения амплитудно-фазовых Ψ-Δ параметров поля линейно поляризованной монохроматической световой волны при двух выбранных длинах волн и всевозможных углах падения-отражения на воздухе.





а в

Рис. 4. Эмпирическая функция k(λ,φ) (а) и эмпирическая функция n(λ,φ) (в)

Расчеты констант материала, представленные на рис.6 а, в, выполнены по первой модели из пакета алгоритмов по формулам решения обратной задачи эллипсометрии:

$$\begin{cases} n^2 - k^2 = a \\ 2nk = в \end{cases}, \qquad (3)$$

где

$$а = Sin^2(\varphi)\left\{1 + \frac{tg^2(\varphi)\left[Cos^2(2\psi) - Sin^2(2\psi)Sin^2(\Delta)\right]}{\left(1 + Sin(2\psi)Cos(\Delta)\right)^2}\right\}, \quad в = Sin^2(\varphi)\left\{\frac{tg^2(\varphi)Sin(4\psi)Sin(\Delta)}{\left(1 + Sin(2\psi)Cos(\Delta)\right)^2}\right\}.$$

При замене переменных $x = n^2$ и $y = k^2$ система (3) принимает эквивалентный вид:

$$\begin{cases} x - y = a \\ (y + a)y = c \end{cases},$$

где, при введении обозначений $c = в^2/4$ и $\tau = в/a$, единственные решения принимают вид

$$\begin{cases} k = \sqrt{y} = \sqrt{\frac{a}{2}}\sqrt{\sqrt{1+\tau^2} - 1} \\ n = \sqrt{x} = \sqrt{\frac{a}{2}}\sqrt{\sqrt{1+\tau^2} + 1} \end{cases}. \qquad (4)$$

Применяя к решениям (4) формулы сложного радикала, можно записать их в эквивалентном комплексном виде:

$$\begin{cases} k = \frac{\sqrt{a}}{2}\left[\sqrt{i - \tau} - \sqrt{i - \tau}\right] \\ n = \frac{\sqrt{a}}{2}\left[\sqrt{1 + i\tau} + \sqrt{1 - i\tau}\right] \end{cases}. \qquad (5)$$

Разложение решений (4) по малому параметру ($\tau \to 0$) оказывается справедливым при условии, что $n = tg(\varphi)$ и при пренебрежении $tg(\psi) \to 0$, что справедливо в области минимума амплитудной функции $\psi(\varphi_{кб})$ или квазибрюстеровских углах падения $\varphi_{кб}$. В этом случае аналитический алгоритм оценки коэффициента экстинкции имеет вид

$$k = \frac{b}{2n} = \frac{4n^3}{n^2+1}\left\{\frac{\psi\delta}{1+\vartheta}\right\}, \qquad (6)$$

где при $\varphi < \varphi_{кб}$ $\begin{cases}\delta = |\pi - \Delta| \\ \vartheta = -4\psi\end{cases}$; при $\varphi = \varphi_{кб}$ $\begin{cases}\delta = 1 \\ \vartheta = 0\end{cases}$, а при $\varphi > \varphi_{кб}$ $\begin{cases}\delta = \left[\begin{array}{c}|2\pi - \Delta| \to 0 \\ \Delta \to 0\end{array}\right. \\ \vartheta = 4\psi\end{cases}$.

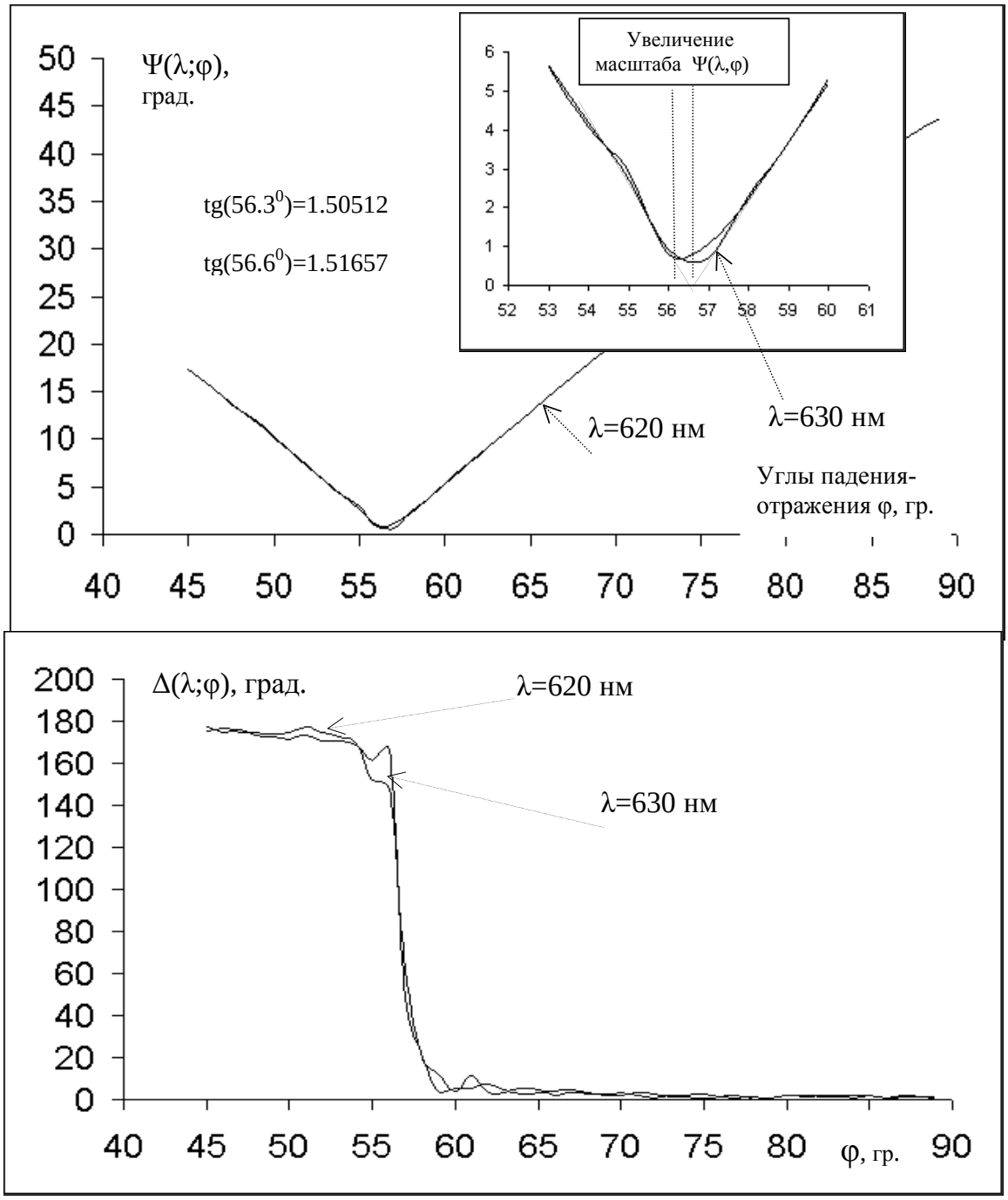


Рис. 5. Первичные данные амплитудно-фазовых функций Ψ(λ,φ)-Δ(λ,φ) для стекла марки НС от углов падения света в воздухе на двух длинах волн (630 нм и 640 нм).

Таким образом, из (6) видно, что угловое поведение экстинкции *k* квадратично мало, при малых значениях ψδ обладает тенденцией роста в области до углов квазибрюстера из-за знака θ вплоть до сильного роста при $\psi \to 15^0$ и дробно-линейно возраста-

ет с ростом ψ после углов квазибрюстера при недостаточно сильном по каким-либо причинам спаде фазовой функции Δ(φ). Все эти аналитические свойства видны как на ярко выраженных аппаратных решениях (см. данные рис. 4.а), так и на значительно улучшенных точных решениях по модели Френеля, представленных на рис. 6.а. Здесь до 51° проявляется тенденция завышения экстинкции, после 60° до 70° – оправданный по формуле (6) подъем, но на скользящих углах падения (за 80°) он становится неоправданно высоким.

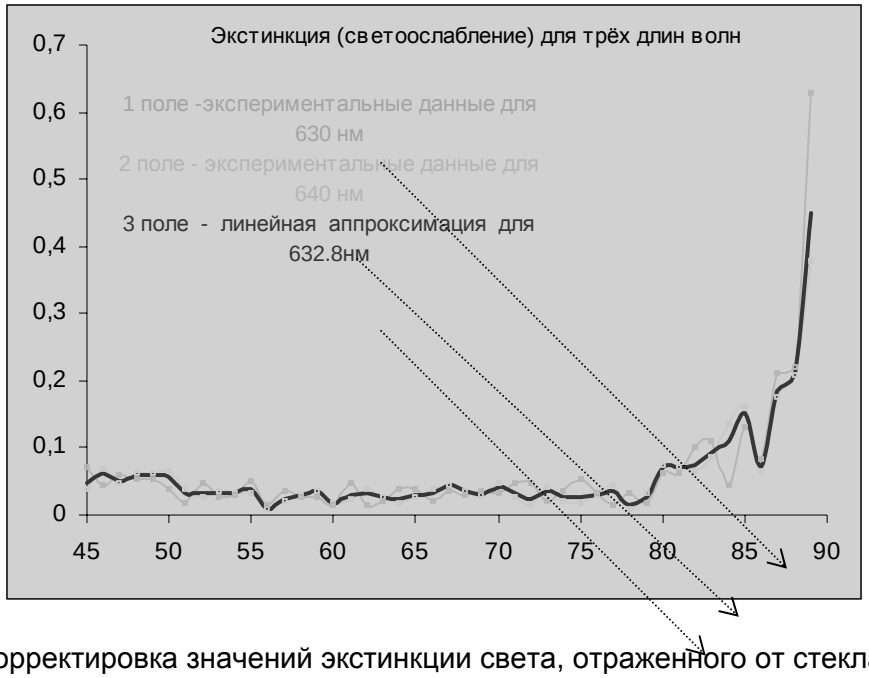


Рис.6.а. Корректировка значений экстинкции света, отраженного от стекла марки НС по формулам (4). Среднее значение k = 0.024 ± 0.004; размах ±0.011 (N=45, α=0.01)

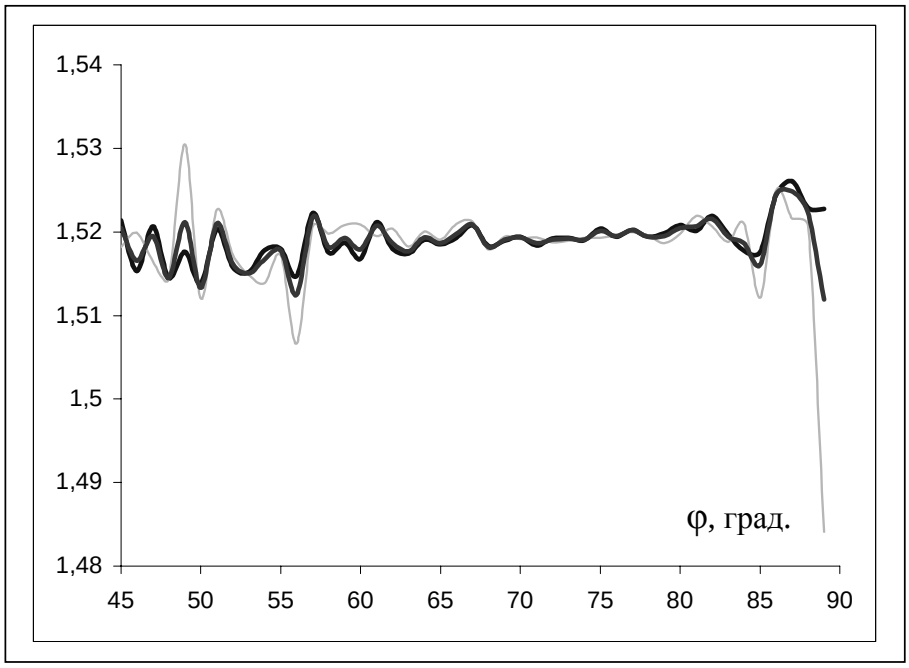


Рис. 6.в. Расчетные значения показателя преломления света, отраженного от стекла марки НС при углах падения от 45^0 до 89^0. Среднее статистическое значение n = 1.5175 ± 0.0008 с размахом ±0.0025 при уровне значимости 0.001 (объем выборки N=45).

Следовательно, алгоритм (3)–(6) хорошо корректирует аппаратные решения (см. рис. 4), они существенно сглаживаются, слабо воспроизводясь в точных решениях. Это легко объяснить погрешностями, связанными с потерей синхронности определения первичных эллипсометрических параметров Ψ–Δ, особо значимыми для автоматических эллипсометров с вращающимися поляризационными элементами.

Из формул (5) при $\tau = 0$, естественно, получаются параметры идеального непоглощающего диэлектрика: k=0 и $n^2 = a$, подчиняющиеся при угле $\varphi_{кб}$ закону Брюстера.

Оценка среднего значения показателя преломления контрольного образца НС по методу брюстеровских углов (см. рис. 5) дает значение $n_{632.8}$=1.5136 с размахом 0.0023. Это значение стыкуется с его средним угловым значением 1.5175 (см. рис. 6.в) на границах размахов: 1.5175 – 0.0025 ≈ 1.5136 + 0.0023 ≡ 1.516 (ГОСТ НС-11).

При оценке из графика рис.5 (вставка) значения минимума амплитудной функции ψ_0=0.5° с помощью формулы (6) получаем оценку значения k=0.0397. Эквивалентное ему значение погонного поглощения равно $\alpha = 4\pi k/\lambda = (800\pm8)$ мм$^{-1}$, что на четыре порядка выше коэффициента поглощения стекла НС-1 и в сотни раз выше, чем для стекла НС-11.

Учитывая то обстоятельство, что эллипсометы при углах Брюстера не могут работать (измерения вырождаются из-за неопределенности отсчета азимутов одного из поляризаторов), следует использовать численные методы аппроксимации хода амплитудной функции по способу пересечения касательных в точках перегиба слева и справа от его неизвестного минимума (см. рис. 5).Такая процедура хорошо работает.

В таблице приводятся известные значения констант для стекол НС-№ 1,2,9,11. Контрольный образец подходит к стеклу НС-11.

НС№	α, мм$^{-1}$	k_α (633нм)	k_{exp}	n_α (633нм)	n_{exp}
НС-1	0,08	$4*10^{-7}$	0,02126	1,5210	1,5200
НС-2	0,26	$1,2*10^{-6}$	0,01998	1,5230	1,5220
НС-9	0,55	$2,5*10^{-6}$	0,01797	1,5050	1,5052
НС-11	1,80	$2*10^{-5}$	0,0094	1,514	1,5160

Выводы

Представленный анализ простейшей оптической модели в пакете возможных аналитических алгоритмов современной прикладной эллипсометрии позволяет сказать, что простые методы:

- способны расширить диапазон устойчивости приборных решений;
- снижают погрешность осцилляционных шумов в решениях обратной задачи ОУЭ;
- показывают хорошую работу метода Брюстера для оценки показателя преломления;
- дают алгоритм идентификации нормальных спектров k(φ) и n(φ) эмпирических функций оптических констант от углов падения света в модели идеальных границ;
- допускают алгоритмы оценки показателя истинного поглощения вдали от центра линий поглощения в зоне квазибрюстеровских углов изменения функций Ψ-Δ(φ);
- дают способ выявления углового спектра АО на скользящих траекториях;

Фирмам-изготовителям ЛЭФ рекомендуется усилить метрологическую проработку методик и алгоритмов прямых и косвенных измерений с привлечением ведущих специалистов прикладной оптики.

Обнаруженный на скользящих углах падения феномен АО (рентгенооптический аналог эффекта Ионеды) нельзя объяснить методами традиционной эллипсометрии.

Литература

1. Горшков М.М. Эллипсометрия. М.: Советское радио, 1977.
2. Основы эллипсометрии. / Под ред. акад. Ржанова А.В.. Новосибирск: ИФПП СОАНСССР, 1986.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА

В.А. Трофимов

Глаз человека представляет собой сложную медико-биологическую систему, в которой согласованно осуществляются механические, оптические и физиологические процессы [1]. Клинически установлено, что напряженное состояние биотканей глаза в значительной степени определяет его функциональные возможности [2,3]. Анализ и количественная оценка присутствующих напряжений могут быть использованы для целей диагностики целого ряда опасных заболеваний. Однако разработка эффективных методик диагностики на этой основе затруднена из-за интегрального воздействия рассматриваемых факторов. Так, наблюдаемая в роговице с помощью полярископа наведенная анизотропия является результатом интегрального воздействия целого ряда факторов, таких как внутриглазное давление, напряженное состояние глазодвигательного аппарата, возможные анатомические патологии и т.д., раздельный поэлементный анализ которых невозможен.

В реальном живом объекте обеспечить экспериментальное исследование независимого воздействия одного какого-либо фактора практически невозможно, а измерения, выполненные на энуклеированном (удаленном) глазном яблоке, дают искаженную картину из-за отсутствия реально существующих причинных связей, например, влияния глазодвигательных мышц.

Указанные трудности устраняются при численном моделировании интегрального воздействия механических напряжений в глазном яблоке и установлении зависимости наблюдаемых изменений от конкретных раздельных, не связанных с другими факторов В работе выполнено математическое моделирование напряженного состояния фиброзной оболочки глаза. Рассмотрена методика построения модели с равнотолщинной изотропной оболочкой, которая основана на пошаговом уточнении геометрических, механических и иных особенностей строения глаза.

Совершенствование разрабатываемой модели основано на изучении четырех приближений к реальному объекту исследования. Последовательно введены в рассмотрение внутриглазное давление, краевые эффекты, связанные с составным характером фиброзной оболочки, и схематическое действие прямых глазодвигательных мышц. В качестве примера возможной патологии проанализирован случай аномального напряжения одной из мышц.

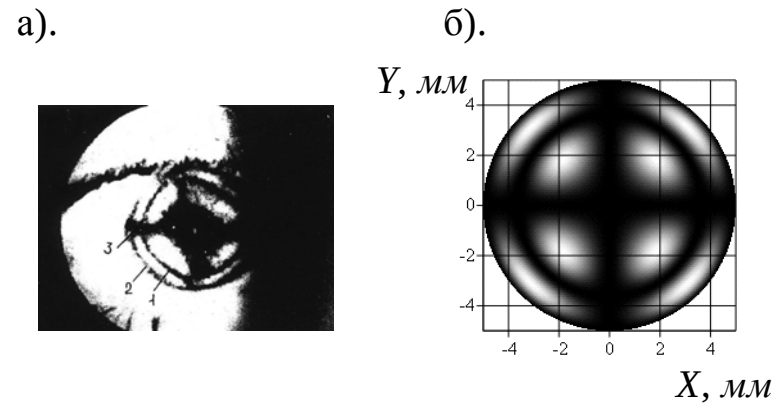


Рис. 1. Фото (а) и расчетная картина (б) интерференции поляризованного света. Модель фиброзной оболочки – сфера под действием внутриглазного давления

Характер расчетных картин (рис. 1), выполненных в соответствие с рассматриваемой математической моделью для интерференции света, дважды прошедшего исследуемую среду, дает результаты, которые хорошо согласовываются с экспериментальными

Литература

1. Волков В. В., Вязьменский С. А., Малышев Л. К. и др. Исследования напряженного состояния роговицы живого глаза методом фотоупругости // Известия АН ЭССР. Физика, математика. 1988. Т. 37. № 1. С. 76–84.
2. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. 2-е изд., перераб. и доп. .Л.: Судостроение, 1962. 431 с.
3. Линейная теория тонких оболочек / В. В. Новожилов, К. Ф. Черных, Е. И. Михайловский. Л.: Политехника, 1991. 656 с.: ил.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

И.Р. Котов, Е.Е. Майоров, В.В. Хопов

Нет необходимости доказывать, сколь важное значение с возрастом приобретают медленно, но неумолимо проявляющиеся внешние признаки старения кожи. Однако в настоящее время отсутствуют какие-либо технические системы для объективного количественного экспресс-анализа таких параметров кожи, как микрорельеф поверхности (глубина морщин). В лучшем случае оценка параметров кожи производится с помощью слепков из пластического материала с последующим поточечным сканированием контактным механическим щупом, в худшем случае – по анализу фотографий. Используемая методика, во-первых, представляет собой двухэтапный процесс измерений; во-вторых, исключает возможность получения информации в реальном масштабе времени, что в значительной степени ограничивает сферу ее применения; в-третьих, контакт пластического материала с поверхностью кожи с необходимостью приводит к дополнительной погрешности измерений [1].

В настоящей работе предлагается оптико-электронная система для измерения и контроля в реальном времени микрорельефа поверхности кожи для объективной оценки ее возрастных изменений. Работа системы основана на использовании оптического щупа. Последний представляет собой оптико-электронный прибор. С его помощью можно измерять рельеф поверхности бесконтактным способом. Такое свойство основано на том, что прибор сканирует исследуемую поверхность оптическим излучением. В качестве источника излучения в оптических щупах, как правило, используется точечный источник света (лазер, полупроводниковый диод). Известные оптические щупы (в частности, выпускаемый фирмой Renishaw) не могут быть использованы для изучения поверхности кожи вследствие неудовлетворительных точностных характеристик. Поэтому для решения поставленной задачи в предлагаемой работе был разработан специальный оптический щуп [2]. Работа щупа основана на использовании явления интерференции света от источника с малой временной когерентностью. В интерферометре анализируется контраст полос при одновременной модуляции оптической разности хода в плечах интерферометра. Таким образом, измеряя длину одного из плеч в момент максимального контраста интерференционных полос, можно судить о длине второго плеча, которая является искомым параметром.

Схема оптического щупа представлена на рис.1. Щуп построен на основе интерферометра Майкельсона. В качестве источника излучения использован полупроводниковый суперлюминесцентный диод 1 с длиной волны излучения $\lambda = 0{,}83$мкм и длиной когерентности $l = 30$мкм. В одно из плеч интерферометра помещен исследуемый объект 4, рельеф поверхности которого подлежит измерению. Оптическая схема другого плеча модулируется во времени по периодическому закону сканированием зеркала 8. Последнее жестко связано с модулятором 9. Момент равенства оптических длин OM и ON соответствует максимуму контраста интерференционных полос и, соответственно, максимуму сигнала фотоприемника 6. Изменение оптической длины опорного плеча интерферометра определяется с помощью пары голографических интерференционных решеток 10, одна из которых неподвижна, а другая жестко связана со сканирующим зеркалом 8. Шаг решеток равен 1,5 мкм. Решетки освещаются полупроводниковым диодом 11, сигнал регистрируется фотоприемником 12. Электрические сигналы фотоприемников 6,12 подвергаются аналоговой и цифровой обработке.

Информация об искомом параметре – расстоянии до анализируемой точки объекта – содержится во временном интервале между моментами регистрации максимальных сигналов фотоприемников 6 и 12. Указанный временной интервал находится путем подсчета импульсов фотоприемника 12. Точное определение моментов максимального

контраста интерференционных сигналов объектного и опорного каналов находится дифференцированием огибающих сигналов фотоприемников 6 и 12 соответственно.

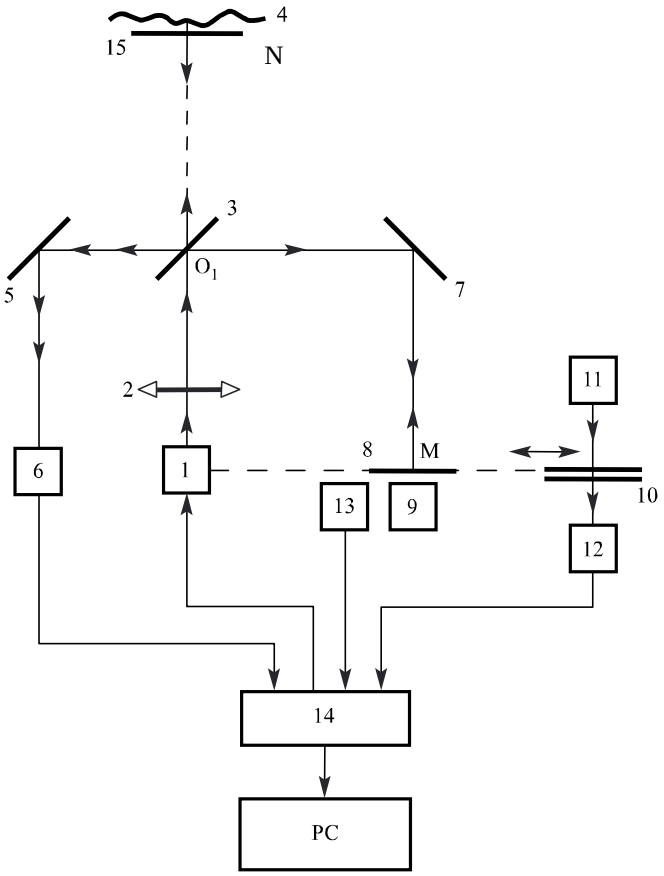


Рис. 1 Система контроля микрорельефа поверхности кожного покрова:
1, 11 – суперлюминесцентные диоды; 2 – микрообъектив; 3 – светоделитель;
4 – объект; 5, 7, 8 – зеркала; 6, 12 – фотоприемники; 9 – модулятор; 10 – дифракционные решетки; 13 – датчик скорости; 14 – блок электронной обработки сигналов;
15 – плоскопараллельная пластина; PC – компьютер

Съем информации о рельефе поверхности исследуемого участка кожи осуществляется поточечно (с частотой 120 Гц) посредством механического сканирования: линейно – по одной координате и по синусоидальному закону – по другой.

Поскольку измерения проводятся в реальном времени, за время сканирования неизбежны всевозможные движения поверхности объекта. Чтобы исключить влияние отмеченного факта на точность измерений, практически предусмотрено следующее решение. На анализируемый участок кожи крепится (например, пластырем) плоскопараллельная пластина 17 (рис.1), и измеряется зазор между поверхностями кожи и плоскопараллельной пластины, который не зависит от взаимного положения объекта и щупа.

Практическая реализация устройства, его аттестация и проведенные метрологические исследования позволили сделать следующие выводы о его технических характеристиках:

- точность измерений……не хуже 3мкм;
- диапазон измерений глубины рельефа……4мм;
- расстояние до объекта……80мм;
- частота измерений (точек поверхности/сек)…….....120;
- размеры анализируемого участка кожи .....2мм × 6мм;
- время измерений..... 3сек;

-габариты оптического щупа..... 35мм×60мм×135мм;
-потребляемая мощность.....5Вт.

Разработанное устройство апробировано при определении возрастных изменений кожи у пациентов различных возрастных групп. Для графической визуализации измерений был использован пакет программ Golden Soft Wear.

Результаты измерений обследования представителей различных возрастных групп позволили сделать следующий вывод. Характерная средняя величина градиента рельефа поверхности кожи колеблется в пределах от 10 до 30 мкм, по двум координатам: как вдоль морщины, так и поперек.

Настоящая разработка – действующий оптоэлектронный прибор.

Предполагаемые области применения данного устройства следующие: антропология – исследования расовых и возрастных изменений кожи; анатомия и физиология – индивидуальные морфофункциональные особенности; дерматология – диагностика начальных патологических изменений; косметология – объективный контроль качества лечения.

Литература

1. Соломатин В.А., Шилин В.А. Фазовые оптико-электронные преобразователи М.: Машиностроение, 1986. 144с.
2. V.V. Khopov. Method anddevece for determing of a surface profile of diffusion-reflecting objects / European Patent Application, publ.numb. 0 480 028 Al in Bulletin 92/16(15.04.92)

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

А.А. Новиков, В. Т. Прокопенко, И. А. Храмцовский

В настоящей работе дано теоретическое обоснование применения теорий Друде-Борна и Релея-Райса для определения оптических характеристик шероховатой поверхности на неоднородной подложке. Показано, что методом эллипсометрии можно различать поляризационно-оптические свойства окисной пленки от микрорельефа поверхности. Экспериментально подтверждено, что метод эллипсометрии позволяет оценивать среднеквадратическую высоту микрорельефа в области 5–180 Å при шаге микронеровностей 0,3–2 мкм.

Ранее в работах [1, 2] были изложены эллипсометрические методы определения параметров однослойных покрытий оптических элементов, но без учета влияния микрорельефа подложки на изменение поляризации отраженного светового пучка. Как показывает практика, это приводит к ошибкам в определении оптических постоянных пленки [3]. Для объективной оценки качества наносимых покрытий необходимо учитывать поляризационно-оптические свойства поверхности, включая как шероховатости подложки, так и влияние неоднородного поверхностного слоя (ПС) на поляризацию отраженного светового пучка.

Цель настоящей работы состояла в разработке нового методологического подхода к эллипсометрическим исследованиям микрорельефной поверхности полупроводниковых элементов, имеющих нарушенный слой на поверхности или границе раздела фаз. Рассматривается эллипсометрический метод определения оптических характеристик шероховатой поверхности, учитывающий влияние на изменение состояния поляризации отраженного светового пучка оптических свойств неоднородной подложки.

Для решения поставленной задачи воспользуемся теориями отражения поляризованного света от шероховатой поверхности и неоднородного слоя, изложенными ранее в работах [3, 4].

Как показал анализ приведенных в данных работах соотношений, поправку $\delta R_{ш,о}^{(p,s)}$ к коэффициенту отражения поляризованного света $R_{ш,о}^{(p,s)}$ и поправку $\delta Y_{ш,о}$ к адмиттансу однородной изотропной подложки $U_o^{(p,s)}$, обусловленную наличием на поверхности подложки шероховатого слоя, можно представить в виде:

$$\delta R_{ш,о}^{(p,s)} = k_о^2 \sigma^2 \Phi_{s,p}(\gamma), \tag{1}$$

$$\delta Y_{ш,о} = \left(U_1^{(p,s)} + U_o^{(p,s)}\right)^2 \left(2U_1^{(p,s)}\right)^{-1} \delta R_{ш,o}^{(p,s)} \tag{2}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение высоты микрорельефа от средней линии геометрического профиля; $U_1^{(p,s)}$ - адмиттанс внешней среды; $\Phi_{s,p}(\gamma)$ – параметр, зависящий от вида корреляционной функции шероховатой поверхности, корреляционного расстояния γ и условий проведения эксперимента. Знак «плюс» берется для *p*-компоненты, знак «минус» – для *s*-компоненты поляризованного света.

Для случая отражения света от неоднородного изотропного слоя, находящегося на однородной подложке, поправки $\delta Y_{н,о}^{(s)}$ к адмиттансам $U_o^{(p,s)}$ можно записать следующим образом.

в приближении Друде-Борна

$$\delta Y_{н,о}^{(s)} = ik_o \int_0^\infty \left(\varepsilon(z) - \varepsilon_0\right) \exp\left(-i2k_0 U_0^{(s)} z\right) dz, \tag{3}$$

$$\delta Y_{н,о}^{(p)} = ik_o \frac{\varepsilon_0}{\left(U_0^s\right)^2}\left(\delta Y_{н,о}^{(s)} - \upsilon^2 \int_0^\infty \frac{\varepsilon^2(z-\varepsilon_0^2)}{\varepsilon(z)\varepsilon_0}\exp\left(-i2k_0 U_0^{(s)} z\right)dz\right); \quad (4)$$

в приближении Борна

$$\delta Y_{н,о}^{(p)} = \delta Y_{н,о}^{(s)}\left(\left(U_0^{(s)}\right)^2 - \upsilon^2\right)\left(U_o^{(s)}\right)^{-2}. \quad (5)$$

Для вывода уравнения эллипсометрии для шероховатого слоя градиентного элемента воспользуемся известным на практике *W*-преобразованием

$$W(R) = (1+R)/(R-1). \quad (6)$$

В работе [5] показано, что в общем случае, если покрытие, разделявшее *j*-ю и *к*-ю среды и обладавшее коэффициентами отражения $R_{j,k}$ и $R_{k,j}$ перенесено на другую подстилающую среду, коэффициент отражения которой с *k*-ой средой равен R_c, то коэффициент отражения перенесенного покрытия будет равен :

$$R_{j,c} = (R_{j,k} + R_c\xi)(1 - R_c R_{k,j})^{-1}. \quad (7)$$

Если исследуемая отражающая система в некоторых измерительных ситуациях эквивалентна по своим поляризационно-оптическим свойствам однородной среде с эффективными оптическими параметрами $\varepsilon_{эфф}$ и $Y_{эфф}$, которые рассчитываются по формулам:

$$Y_{эфф}^{(s)} = \left(U_0^{(s)} tg^2\varphi\right)\left(W(p)\right)^{-1},\ \varepsilon_{эфф} = Y_{'эфф}^{(p)} Y_{'эфф}^{(s)}, \quad (8)$$

то параметр $\xi = 1$, и соотношение (7) можно записать как

$$W(R_{j,c}) = -W(R_{j,k})W(R_{k,c}). \quad (9)$$

Подход, основанный на моделировании исследуемой отражающей системы однородной средой с адмиттансами $Y_{эфф}$ для *p*- и *s*-поляризаций, носит название «метод эффективной подложки» [1], а корректность его применения для ряда неоднородных отражающих систем рассматривалась в работе [3]. Воспользуемся этим методом математического моделирования поляризационно-оптических свойств шероховатого слоя, находящегося на неоднородной подложке.

Предположим, что в некоторых измерительных ситуациях адмиттансы шероховатого слоя ($Y_{ш,о}$) и неоднородной подложки ($Y_{н,о}$) удовлетворяют соотношению (8). Тогда выражения для $W(R)$-преобразования коэффициента отражения ($R_{ш,о}$) от шероховатого слоя, находящегося на однородной подложке, и коэффициента отражения ($R_{н,о}$) от границы раздела однородная подложка–неоднородная среда с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(z)$ будут иметь вид

$$\begin{aligned} W(R_{ш,о}^{(s)}) &= -(U_1^{(s)})(U_0^{(s)} + \delta Y_{ш,о}^{(s)})^{-1}, \\ W(R_{н,о}^{(s)}) &= -(U_0^{(s)})(U_0^{(s)} + \delta Y_{н,о}^{(s)})^{-1}, \\ W(R_{ш,о}^{(p)}) &= -(U_0^{(p)} + \delta Y_{ш,о}^{(p)})(U_1^{(p)})^{-1}, \\ W(R_{н,о}^{(p)}) &= -(U_0^{(p)} + \delta Y_{н,о}^{(p)})(U_0^{(p)})^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где поправки к адмиттансу $U_o^{s,p}$ для шероховатого слоя ($\delta Y_{ш,о}$) определяются соотношениями (2), а для неоднородного слоя ($\delta Y_{н,о}$) – формулами (3),(4). Используя соотношение (9) и инверсное *W*-преобразование, несложно получить формулы для расчета коэффициентов отражения от шероховатой поверхности неоднородной подложки $R_{ш,н}$, после подстановки которых в основное уравнение эллипсометрии

$\rho = R^{(p)} / R^{(s)} = tg\Psi \exp i\Delta$ получаем уравнение для шероховатой поверхности оптической детали при наличии на ней неоднородного ПС:

$$\rho = \rho_0 (1 + A\delta Y_н + k_0^2 \delta^2 \Phi(\gamma)), \tag{11}$$

где

$$\rho_0 = (tg^2 \varphi U_1^{(s)} - U_o^{(s)})(tg^2 \varphi U_1^{(s)} + U_o^{(s)})^{-1}, \tag{12}$$

$$\Phi(\gamma) = (\Phi_p(\gamma) R_0^{(S)} - \Phi_s(\gamma) R_0^{(p)})(R_0^{(s)} R_0^{(p)})^{-1}, \tag{13}$$

$$A = 2\varepsilon_0 tg^2 \varphi U_1^{(s)} \left((tg^4 \varphi U_1^{(s)})^2 - (U_0^{(s)})^2 (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)\right)^{-1}, \tag{14}$$

$$\delta Y_н = ik_o \int_0^\infty (\varepsilon(z) - \varepsilon_0)(\varepsilon(z) - \varepsilon_1)\varepsilon(z)^{-1} \exp(-i2k_0 U_0^{(s)} z) dz \ . \tag{15}$$

Здесь ε_1, ε_0 - диэлектрическая проницаемость внешней среды и объема материала подложки. При $\varepsilon_р = \varepsilon_1 = 1$ выражение для функции $\Phi(\gamma)$ при использовании соотношений [3, 4] можно преобразовать к следующему виду:

$$\Phi(\gamma) = A_1 A(\gamma), \tag{16}$$

$$A(\gamma) = -(1 + \varepsilon_0) U_0^{(s)} + \frac{(1 - \varepsilon_0) F_1(\gamma)}{\sin^2 \varphi} + \frac{2(U_0^{(s)})^2 F_1(\gamma)}{\sin \varphi}, \tag{17}$$

$$F_1(\gamma) = \sum_{m,n} \frac{a^2 (m^2 - n^2)(U_0^{(s)})^2 + (a^2 n^2 \varepsilon_0 - C_1 C_2) \sin^2 \varphi}{C_1 + C_2 \varepsilon_0} \left| P(m_1, n) \right|^2, \tag{18}$$

$$F_2(\gamma) = \sum_{m,n} am \frac{C_1 + C_2}{C_1 + C_2 \varepsilon_0} \left| P(m_1, n) \right|^2, \tag{19}$$

$$C_1 = \sqrt{\varepsilon_0 - a^2 (m^2 + n^2)}, \ C_1 = \sqrt{1 - a^2 (m^2 + n^2)}, \ a = \lambda / L.$$

Следует отметить, что уравнение (12) получено в предположении о правомерности модели однородной среды с некоторым эффективным адмиттансом $Y_{эфф}$ (формулы (8)) неоднородному и шероховатому слоям, находящихся на однородной подложке. Оценим корректность такой замены. Из формул Френеля [1] несложно получить функционал

$$\Phi = (R^{(p)} (R^{(s)})^{-1} + \cos 2\varphi)(R^{(s)} + R^{(p)} \cos 2\varphi)^{-1}, \tag{20}$$

на основании которого в [3] был предложен критерий корректности замены неоднородной подложки однородной. Действительно, если Ф =1, то подложка является однородной, и любое отличие Ф от единицы будет свидетельствовать об отличии исследуемой отражающей системы от модели однородной среды с эффективными параметрами $Y_{эфф}^{(s,p)}$). Однако такой критерий не совсем удачен, так как на практике корректность той или иной модели ПС необходимо оценивать с учетом вероятных ошибок эксперимента. Для этого целесообразно использовать метод последовательного усеченного анализа [2], из которого следует, что, если *j*-ая и *k*-ая модели ПС в некоторой совокупности измерительных ситуаций адекватны по своим поляризационным свойствам, то должны выполнятся условия

$$\delta\Delta_{ik} = \left| \Delta_{i,j}^{(T)} - \Delta_{k,j}^{(T)} \right| < S_{j,\delta}, \quad \delta\Psi_{ik} = \left| \Psi_{i,j}^{(T)} - \Psi_{k,j}^{(T)} \right| < S_{j,\psi}, \tag{21}$$

где $S_{j,\delta}$, $S_{j,\psi}$ – ошибки основных эллипсометрических параметров. При выполнении условия $\delta Y^{(s)} = (Y_{эфф} - U_0^{(s)}) << U_0^{(s)}$ область применимости уравнения можно определить из решения системы следующих неравенств:

$$\begin{cases} \delta\rho = tg\Psi\sqrt{\left\{\mathrm{Re}^2(2A_1\delta Y/\sin 2\Psi) + \mathrm{Im}^2(A\delta Y)\right.} \le S_{j,\rho} \\ \delta\Delta = \mathrm{Im}(A_1\delta Y) \le S_{j,\delta} \\ \delta\Psi = \mathrm{Re}(2A_1\delta Y/\sin 2\Psi) \le S_{j,\psi} \end{cases}, \qquad (22)$$

где

$$\delta Y = Y_{эфф} - U_0^{(s)} - (\delta Y_н \varepsilon_0(\varepsilon_0 - 1)^{-1} + k_0^2\delta^2 A(\gamma)), \qquad (23)$$

$$S_{j,\rho} = \delta S_0(\left|R^{(s)}\right|\cos\Psi)^{-1},\ S_{j,\rho}^{сист} = \sqrt{2S_{j,\rho}}\ , \qquad (24)$$

$$\left|R^{(s)}\right| = \left|(\rho + \cos 2\varphi)(1 + \rho\cos 2\varphi)^{-1}\right|\ . \qquad (25)$$

Для проведения конкретных расчетов, используя формулы (12), (14), (16), целесообразно неравенства (22) привести к более удобному виду :

$$\mathrm{Im}(A_2\delta Y) \le \delta S_0,\ \mathrm{Re}(A_2\delta Y) \le \delta S_0,\ \left|(A_2\delta Y/2)\right| \le \delta S_0 \qquad (26)$$

где

$$A_2 = \frac{2tg^2\varphi U_1^{(s)}\left|R^{(s)}\right|}{(tg^2\varphi U_1^{(s)} + U_0^s)\sqrt{tg^4\varphi(U_1^{(s)})^2 + (U_0^{(s)})^2}}\ . \qquad (27)$$

Номограмма, позволяющая определять величину микронеровностей на поверхности кремниевой подложки при наличии на ней окисного слоя, представлена на рис. 1.

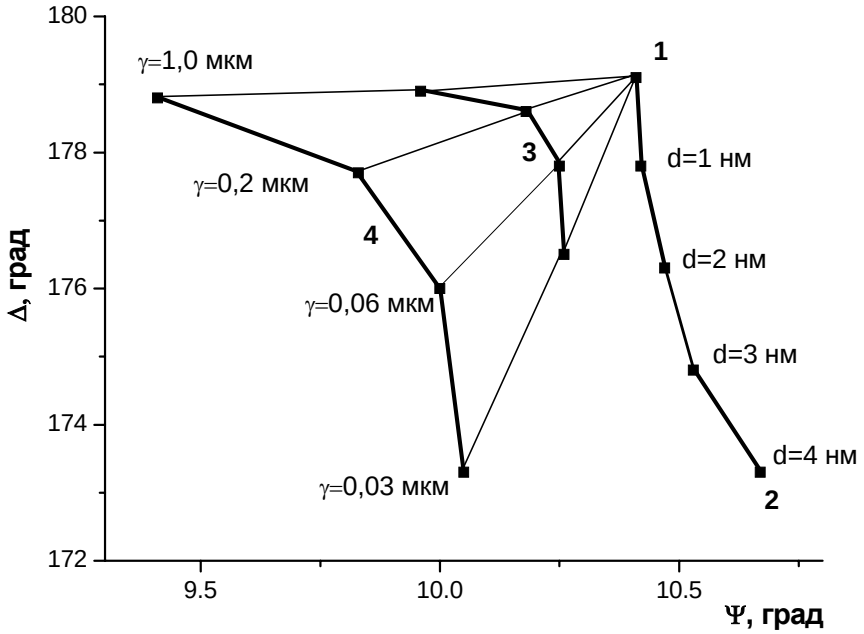


Рис. 1. Номограмма для определения параметров шероховатости поверхности кремния в системе Si/SiO_2. 1- атомарно-гладкая без окисного слоя. Кривая 2 – окисный слой на гладкой поверхности, кривые 3,4

Рис. 1 отражает принципиальную возможность отличать поляризационные эффекты, связанные с микрорельефом поверхности, от изменений состояния поляризации волны, вызванных наличием диэлектрической пленки или поглощением излучения в неоднородном поверхностном слое диэлектрика. Так, увеличение толщины окисной пленки дает сдвиг азимута поляризации в положительном направлении, и наличие микрорельефа на границе раздела фаз – в отрицательном [6].

На рис. 2 показаны границы применимости уравнения (11) для шероховатого слоя, находящегося на неоднородной подложке кварцевого стекла, которые были рас-

считаны при углах падения светового пучка $\varphi = 50^o$ и $\varphi = 60^o$ и длине волны излучения λ=0,6328 мкм при $\delta S_0 = 3 \cdot 10^4$, при различных величинах отклонения показателя преломления поверхностного слоя от объема материала.

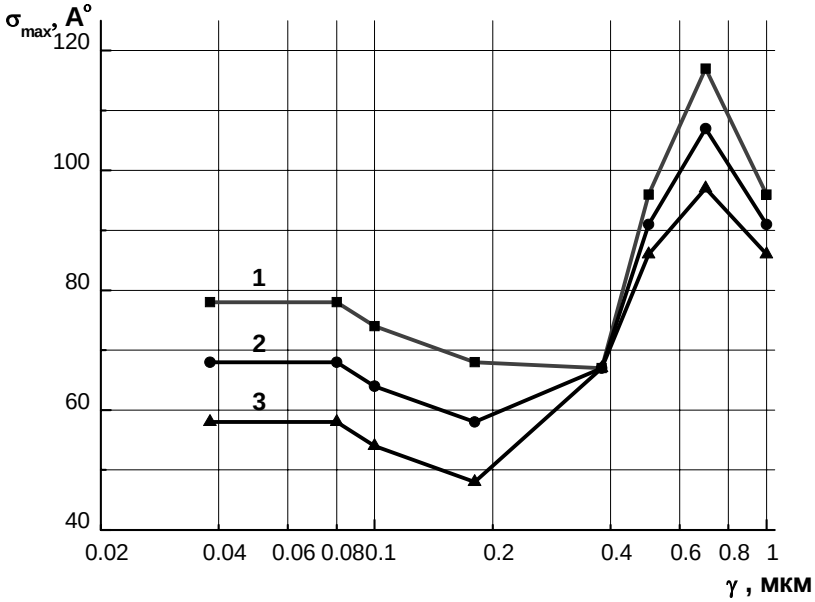


Рис. 2. Границы области применимости теории для SiO_2.
Кривые 1-3 – при δn=0,02; δn=0; δn=-0,02, соотвественно.

При тех же условиях численного эксперимента была проведена оценка пороговой чувствительности метода эллипсометрии к среднеквадратичной высоте шероховатой поверхности кремния (n_0=3,865 и k_0=0,023) (рис. 3).

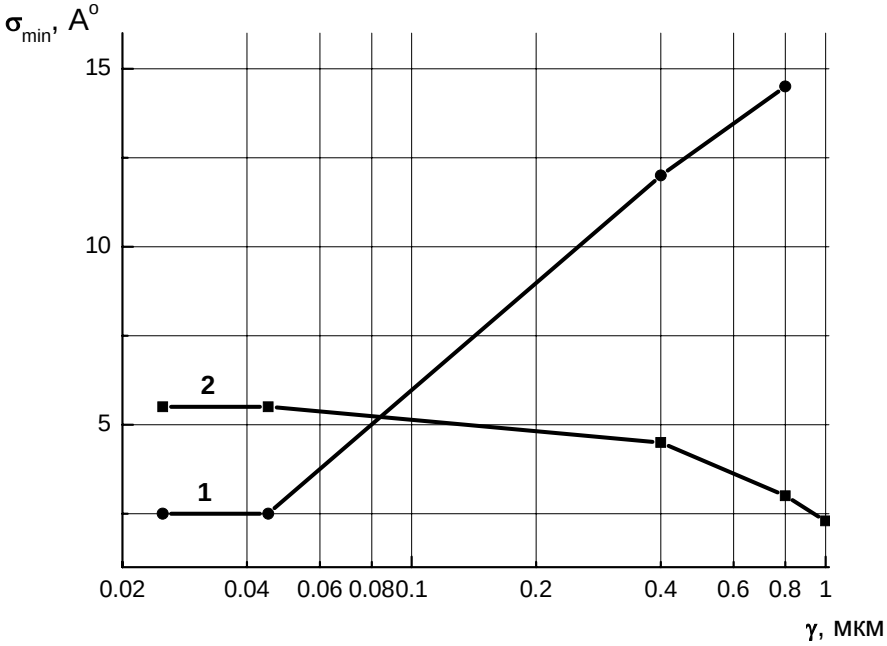


Рис. 3. Пороговая чувствительность метода эллипсометрии к среднеквадратической высоте шероховатости поверхности. Кривая 1 – по параметру Δ, кривая 2 – по параметру Ψ.

Чтобы установить влияние шероховатой поверхности неоднородной подложки на погрешность расчета оптических характеристик поглощающей пленки, был проведен следующий численный эксперимент. Предполагалось, что поглощающая пленка нахо-

дится на неоднородной подложке, которая была представлена следующими видами моделей отражающих систем

- модель 1 - однородный тонкий ПС–однородная подложка;
- модель 2 - шероховатый слой–однородная подложка;
- модель 3 - шероховатый слой–неоднородный ПС–однородная подложка.

Путем решения прямой задачи эллипсометрии были рассчитаны поляризационные параметры Δ и Ψ для этих моделей. При этом значения параметров поглощающей пленки и однородной подложки принимались одинаковыми, которые соответствуют параметрам модели 4, представленной в табл.1. На основе полученных значений Δ и Ψ путем решения обратной задачи эллипсометрии в предположении, что подложка является однородной, были рассчитаны оптические параметры пленки.

Модель ПС	Параметры неоднородной подложки	Угол падения	Поляризационные параметры		Параметры пленки		
		φ	Δ	Ψ	n	$k \cdot 10^2$	d, нм
1	n_q=1,42 d_q=100 A°	φ = 50° φ = 60°	165°31' 144°38'	21°59' 11°16'	2,0	2,15	119,6
2	δ=20 A° γ=0,1 мкм	φ = 50° φ = 60°	165°23' 144°15'	21°58' 11°18'	2,0	1,06	120,7
3	δ=12 A° γ=0,03 мкм n_q=1,469	φ = 50° φ = 60°	165°10' 144°38'	21°54' 11°14'	1,96	-6,9	128
4	n_q=1,457	φ = 50°	165°23'	21°58'	2,0	2,0	120

Таблица 1. Влияние оптических свойств неоднородной подложки при определении параметров поглощающей пленки

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что неучет поверхностного слоя с показателем преломления $n_q<n_o$ может приводить к завышенным значениям показателя поглощения (модель 1), хотя наличие такого ПС приводит на практике к увеличению прозрачности оптической детали. С другой стороны, наличие шероховатой поверхности подложки может влиять на состояние поляризации отраженного светового пучка так, что при эллипсометрических измерениях и расчете параметров поглощающей пленки значение показателя поглощения *k* могут быть занижены (модель 2), а в ряде случаев (при наличии неоднородного ПС) можно получить значения *k*, не укладывающиеся в физически допустимые рамки (модель 3).

Для объективной оценки возможностей эллипсометрии при определении параметров шероховатой поверхности оптических элементов сопоставим результаты измерений, полученные различными методами: методом профилометрии на приборе «Talistep», методом спекл-интерферометрии, по результатам измерений диффузной составляющей отраженного светового пучка на приборе STR-V1.

Из представленных в табл. 2 результатов измерений следует, что значения среднеквадратической высоты микрорельефа σ, полученные методом эллипсометрии на основе уравнения (11), хорошо согласуются с данными других физических методов. Необходимо подчеркнуть, что столь малый геометрический рельеф поверхности, высота которого сопоставима с молекулярными размерами кремнекислородных образований, может оставлять при полировании детали кристалл полирующего оксида, а не всю частицу полирующего зерна, размер которой обычно составляет 0,25–3 мкм. Это подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о механохимической природе процесса образования поверхностного слоя на оптической детали при ее полировании [7].

Контроль ный метод	№ об-раз-ца	Угол паде-ния	Поляризацион ные углы		Параметры ПС и шероховатости поверхности				
					Метод эллипсометрии				Конт роль-ный метод
			Δ	Ψ	n^*	d^*, мкм	γ, мкм	σ, A°	σ, A°
Профило-метрия	1	φ = 50° φ = 60°	180°01' 359°57'	8°38' 7°00'	1,4572	0,73	0,3	6,2	4
	2	φ = 50° φ = 60°	180°36' 358°54'	8°44' 6°55'	1,4588	0,54	0,2	16	13
	3	φ = 50° φ = 60°	180°55' 358°53'	8°50' 6°52'	1,4597	0,56	0,06	22	20
Спекл-интерферо метрия	4	φ = 50° φ = 60°	180°07' 359°08'	8°38' 7°01'	1,4576	0,20	0,03	11	10
	5	φ = 50° φ = 60°	180°10' 359°58'	8°35' 7°00'	1,4600	0,07	0,03	23	20
По диф-фузной со-ставляю щей свето-вого пучка	6	φ = 50° φ = 60°	180°08' 358°46'	8°38' 7°00'	1,4576	0,34	0,03	8,8	8,6
	7	φ = 50° φ = 60°	179°56' 0°10'	8°37' 7°01'	1,4578	0,45	0,40	12	11
	8	φ = 50° φ = 60°	182°38' 356°43'	8°42' 6°48'	1,4690	0,11	0,03	12	13

Таблица 2. Параметры шероховатости поверхности кварцевого стекла, определенные различными методами

Таким образом, полученные теоретические соотношения обобщают основные закономерности изменения поляризации отраженного светового пучка от шероховатой поверхности, описываемого в рамках феноменологического подхода Кирхгоффа и Рэлея-Райса, при наличии неоднородного поверхностного слоя, оптические свойства которого определяются в рамках теорий Друде и Борна. Показано, что оптимальными условиями эллипсометрического эксперимента являются углы падения светового пучка, близкие главному углу падения (или углу Брюстера). При углах падения светового пучка, близких к скользящему, т.е. φ = 75°–85°, обнаружить влияние микрорельефной поверхности на состояние поляризации отраженного светового пучка в рамках метода эллипсометрии не представляется возможным. Но при применении методов поляриметрии или дифракционной эллипсометрии данные условия являются оптимальными, что ранее было показано в цитируемой литературе.

Литература

1. Эллипсометрия в науке и технике. // Под ред. К.К. Свиташева и А.С. Мардежева. Новосибирск: ИФП СО АН СССР, 1987. 205с.
2. Эллипсометрия, теория, методы, приложение. // Под ред. К.К. Свиташева. Новосибирск: ИФП СО АН, 1991, 200с.
3. Акользин П.Г., Колосов С.В., Голоднов Д.В., Турбоев А., Храмцовский И.А. Особенности измерения параметров шероховатой поверхности диэлектриков и полупроводниковых материалов. // Вопросы материаловедения. 2000. Т. 21. №1. С. 66-69
4. Антонов В.А., Пшеницын В.И., Храмцовский И.А. Уравнение эллипсометрии для неоднородных и анизотропных поверхностных слоев вприближении Друде-Борна // Оптика и спектроскопия. 1987. Т .62. В. 4. С. 828-83.
5. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз,1958. 256 с.
6. Плотников В.В., Прокопенко В.Т, Тимошенко А.М., Храмцовский И.А. Диагностика шероховатой поверхности элементов оптоэлектроники методом эллипсометрии. // Тез. докл. Межд. конф. “Прикладная Оптика 2002”, Санкт-Петербург, 2002, с. 84.
7. Ходаков Г.С., Кудрявцева Н.Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. М.: Машиностроение,1985. 220 с.

АТОМНО-ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗАТОР ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Ю.Т. Нагибин, А.А. Суров

Общее обострение экологических проблем стимулирует объем и количество исследовательских работ, направленных на создание приборов, позволяющих определять токсичные вещества на уровне предельно допустимых концентраций (ПДК) и ниже. При этом аналитическое приборостроение развивается по двум направлениям:

- создание универсальной аппаратуры с предельной чувствительностью по многим компонентам (масс–спектрометры, хроматографы и т.д);
- разработка узкоспециализированных приборов, ориентированных на определение одного или немногих химических элементов одновременно.

Современная универсальная аппаратура сложна по устройству и обслуживанию, обладает высокой стоимостью, предъявляет повышенные требования к квалификации персонала. В связи с этим создание приборов, относящихся ко второму направлению, обладающих высокой чувствительностью и одновременно относительной простотой и невысокой стоимостью, является весьма актуальной задачей.

Существующие в настоящее время приборы, основанные на атомно-абсорбционном и атомно-флуоресцентном методах анализа [1-4] (Флюорат - 02 (Россия), приборы фирм Tekram Inc, Nic) обладают необходимой чувствительностью для выполнения анализа содержания этих элементов на уровнях ПДК. Однако стоимость этих приборов высока, так как высокие пределы обнаружения в них достигаются за счет использования зеемановской коррекции неселективного излучения [5, 6] и дорогостоящих монохроматоров, а также проведения измерений в атмосфере инертного газа, чаще всего аргона [1, 4, 7].

Данная работа была предпринята с целью изучения возможностей создания современного простого и экономичного атомно-флуоресцентного анализатора (АФА) микроколичеств кадмия, цинка и свинца. В приборе используется метод возбуждения резонансной атомной флуоресценции при облучении аналитической зоны излучением безэлектродных высокочастотных шариковых ламп типа ВСБ-2 на длинах волн 228,8 нм для кадмия; 213,9 нм для цинка и 405,8 нм для свинца. Атомная флуоресценция регистрируется бездисперсионным методом под прямым углом к возбуждающему излучению. Подобная схема использовалась ранее для измерения микроколичеств ртути в различных средах. [8, 9]. Электронный блок регистрации позволяет определить максимум сигнала флуоресценции и его интегральное значение. Для защиты от внешних засветок, а также от рассеянного излучения шариковых ламп использовались диафрагмы, экраны и светозащитные кожухи.

Атомизация кадмия, цинка, свинца требует достижения высокой температуры, что реализуется с непламенными или пламенными атомизаторами [1, 2, 4]. В данной работе был использован наиболее простой и экономичный метод электротермической атомизации в воздушной атмосфере, для чего был разработан электротермический атомизатор. Атомизатор представляет собой стержень из графита МПГ-8 сечением 2×2 мм и длиной 50 мм. Стержень устанавливается в контакты электропитания атомизатора. Отличием конструкции атомизатора является наличие кварцевого экрана в виде полуцилиндра, расположенного снизу атомизатора. Экран предохраняет графитовый стержень от окисления кислородом воздуха при электротермическом нагреве стержня, что позволяет проводить до 200 циклов нагрева стержня и более 100 измерений элемента. Питание стержня осуществляется через реле времени от понижающего трансформатора с вторичным напряжением до 20 В. Время нагрева и подаваемое на стержень напряжение определяют конечную температуру стержня. Для исследованных элементов эта температура составляет порядка 2000 ^{o}C и выше. Атомизатор со стержнем устанавли-

ваются под аналитической зоной АФС. Проба объемом 1–100 мкл наносится сверху на поверхность стержня. Процесс измерения включает обычные режимы нагрева стержня (просушивание до 100 ^{o}C, отжиг до 400–600 ^{o}C и атомизацию – 2000–2200 ^{o}C). Для снижения влияния фоновой засветки от стержня на длине волны регистрации на торце атомизатора был установлен дополнительный защитный экран.

Абсолютный предел обнаружения кадмия по линии 228,8 нм составил $1 \cdot 10^{-12}$ г, относительный предел обнаружения в водах составил 10^{-4} мг/л. Были исследованы возможности анализа кадмия в сточных водах сложного состава, содержащих органику, в зерне и картофеле.

Основной проблемой анализа сложных проб является влияние неселективных спектральных помех от основы пробы. Для снижения спектральных помех проводили предварительное высушивание и отжиг пробы на стержне перед атомизацией. Отжиг позволяет только частично снизить влияние неселективных помех за счет сжигания органики. Более труднолетучие компоненты пробы испаряются при более высоких температурах и создают сильные помехи определению кадмия. Для их устранения был применен метод селективного испарения кадмия путем подбора условий нагрева атомизатора и испарения пробы. При снижении скорости нагрева стержня и конечной температуры кадмий испаряется при более низких температурах, чем основные компоненты пробы. Это позволяет проводить определение микроколичеств кадмия в присутствии больших количеств мешающих элементов основы.

Были изучены пределы обнаружения цинка по линии 213.8 нм и свинца по линии 405.8 нм. Для цинка абсолютный предел обнаружения составил $1 \cdot 10^{-12}$ г, а относительный предел обнаружения – 10^{-4} мг/л. Абсолютный предел обнаружения свинца составил $1 \cdot 10^{-10}$ г.

По достигаемым пределам обнаружения разработанный прибор не уступает литературным данным. В то же время прибор дает возможность проводить измерения в воздушной атмосфере без привлечения дорогостоящего аргона, что упрощает схему измерений и снижает стоимость анализов.

Можно указать большие возможности для дальнейшего совершенствования прибора. Прежде всего, это привлечение различных схем автоматического учета спектральных помех с модуляцией излучения источника света или регистрируемого сигнала флуоресценции. Здесь возможно снижение влияния рассеянного света от атомизатора, а также от возбуждающего флуоресценцию источника. Чувствительность измерений может быть повышена за счет более высокоинтенсивных источников света, возбуждающего флуоресценцию.

Таким образом, в работе предложен простой и экономичный атомно-флуоресцентный анализатор кадмия, цинка и свинца, который имеет высокую чувствительность измерений элементов и может быть использован для целей анализа экологических и других объектов.

Литература

1. Зайдель А.Н. Атомно-флуоресцентный анализ. Физические основы метода. М.: Наука, 1980. 126 с.
2. Спектральный анализ чистых веществ. / Под ред. Зильберштейна Х.И. СПб: Химия, 1994. 336 с.
3. Прайс В. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия. М.: Наука, 1986.
4. Дробышев А.И. Основы атомного спектрального анализа. СПб: Из-во СПбГУ, 1997. 200 с.
5. Разумов В.А. // ЖАХ. 1977. Т.32. № 3. С.596.
6. Альтман Э.А. и др. // ЖПС. 1982. Т.37. № 7. С.709.
7. Smith B.W., Glick M.R., Spears K.N., Winefordner J.R. // Apll. Spectrosc. 1989. V. 43. № 3. P. 376.
8. Stroganov A.A., Ilyukhin F.V., Nagibin Yu.T., Prudnikov E.D. // Proceed. of CANAS’99 (Colloquium Anal. Atomspektrosk.). Konstanz. Germany. 1999.
9. Ильина Н.Р., Нагибин Ю.Т., Прудников Е.Д., Строганов А.А. // Тезисы докладов 30-й научно-практической конференции проф.-препод. состава СПбИТМО (ТУ). СПб. 1999. С. 33.

ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ В ВОЛОКОННОМ СВЕТОВОДЕ В БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА

М.С. Казакевич (Ерофеева), А.Л. Дмитриев

Описана экспериментальная установка для исследования фарадеевского вращения плоскости поляризации ИК-излучения на длине волны 0.85 мкм в двулучепреломляющем волоконном световоде длиной 800 м. Угол вращения плоскости поляризации измеряется посредством поляризационного балансного фотодетектора. Установлена нелинейная зависимость азимута плоскости поляризации света на выходе оптического волокна от величины и направления магнитного поля. Предложено объяснение наблюдаемой нелинейности как следствие изменения эллиптичности ИК-излучения в световоде.

В настоящее время известно сравнительно мало работ, посвященных анализу магнитооптического эффекта Фарадея в одно- и многомодовых волоконных световодах. Так, в [1] исследовался поворот спекл-картины в маломодовом оптическом волокне на длине волны 0,633 мкм в продольном магнитном поле. В [2, 4, 6] рассмотрены возможности использования эффекта Фарадея в волоконных световодах при разработках оптических датчиков электрического тока и измерителей сильных магнитных полей. Экспериментальные и теоретические работы по исследованиям эффекта Фарадея в протяженных (длиной сотни метров) маломодовых волоконных световодах при относительно небольших напряженностях магнитного поля практически отсутствуют. Эффект Фарадея в оптическом волокне представляет большой практический интерес для разработок оптических датчиков магнитных полей, а также волоконно-оптических гироскопов, при определении условий достижения их предельной чувствительности.

В настоящей работе исследовался эффект Фарадея в маломодовом (до 20 мод) двулучепреломляющем оптическом волокне длиной 800 м на длине волны 0.85 мкм. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

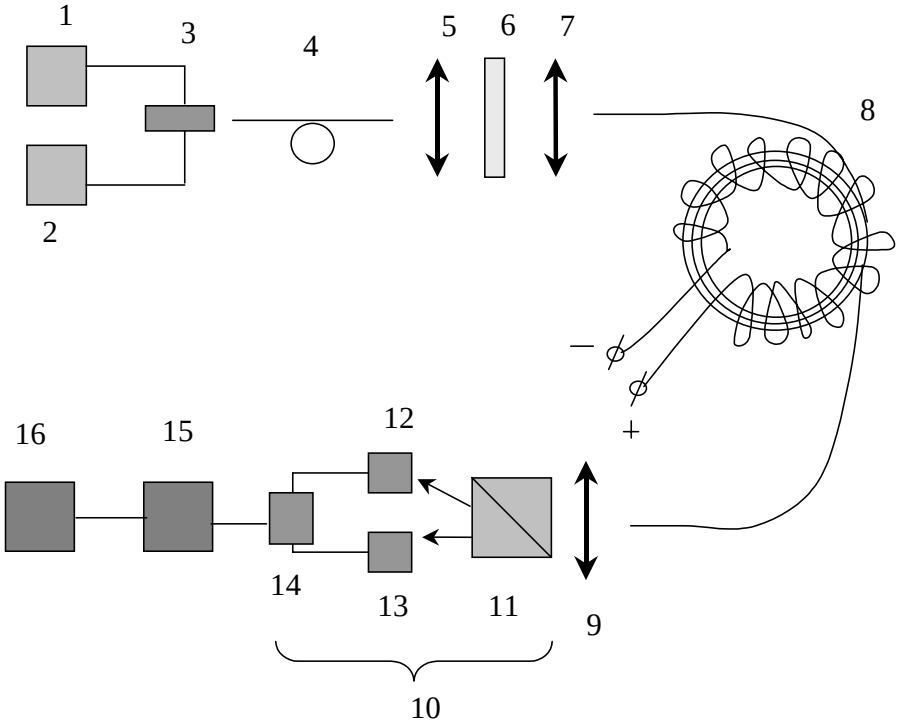


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – генератор импульсов Г5-54, 2 – блок питания лазера, 3 – полупроводниковый лазер, 4 – волоконный кабель, 5, 7, 9 – микрообъективы, 6 – линейный поляризатор (призма Глана), 8 – катушка оптического волокна с тороидальной электрической обмоткой, 10 – балансный фотосмеситель (включает расщепитель поляризации 11 и полупроводниковые фотоприемники 12, 13 марки ФД9-К), 14 – сопротивление нагрузки, 15 – селективный усилитель У2-8, 16 – осциллограф С1-49

Амплитудно-модулированное излучение инжекционного лазера (полупроводниковый модуль типа МПД-1-1А, длина волны 0.85 мкм, мощность излучения 1 мВт, частота модуляции 20 кГц) коллимируется, проходит через линейный поляризатор 6 и посредством микрообъектива 7 вводится в исследуемое оптическое волокно 8. Входной и выходной торцы волоконных световодов (ВС) закреплены на трехкоординатных микропозиционерах с вращающимися держателями, позволяющими изменять азимуты поляризации вводимого оптического излучения относительно осей большой и малой скорости двулучепреломляющего оптоволокна. Внешний и внутренний диаметр катушки оптического волокна равны соответственно 180 и 90 мм, высота катушки 45 мм. Диаметр сердцевины волокна 9 мкм, диаметр оболочки ВС 125 мкм. Тороидальная электрическая катушка для создания магнитного поля, ориентированного вдоль оси световода, содержит 2000 витков провода диаметром 0,35 мм, сопротивление обмотки 85 Ом. Выходное излучение коллимируется и направляется на входную грань расщепителя поляризации 11 (призмы Рошона), разделяющего падающий луч света на компоненты с ортогональными (0º и 90º) плоскостями линейной поляризации. Оптические сигналы фотодетектируются, регистрируемые электрические сигналы вычитаются на сопротивлении нагрузки 14. Выходной сигнал поляризационного балансного фотодетектора (ПБФ) прямо пропорционален величине угла ориентации плоскости поляризации падающего света относительно поперечной оси (45º) призмы Рошона 11 (принцип действия ПБФ с предельной чувствительностью описан в [5]). Выходной сигнал фотодетектора на частоте следования импульсов усиливается избирательным усилителем 15 типа У2-8 и контролируется на экране осциллографа 16. Уровень сигнала определяется по шкале индикатора прибора У2-8.

Калибровка выходного сигнала (Вольт/градус) производилась при отсчетах углов вращения призмы 11 по лимбу угломерного устройства, связанного с призмой. При этом на балансный фотодетектор направлялся линейно-поляризованный свет. Погрешность отсчетов изменений углов азимута поляризации света по шкале индикатора У2-8 не превышала 0,3º.

Типичная экспериментальная зависимость изменения азимута поляризации излучения на выходе ВС от величины и направления магнитного поля в волокне приведена на рис. 2.

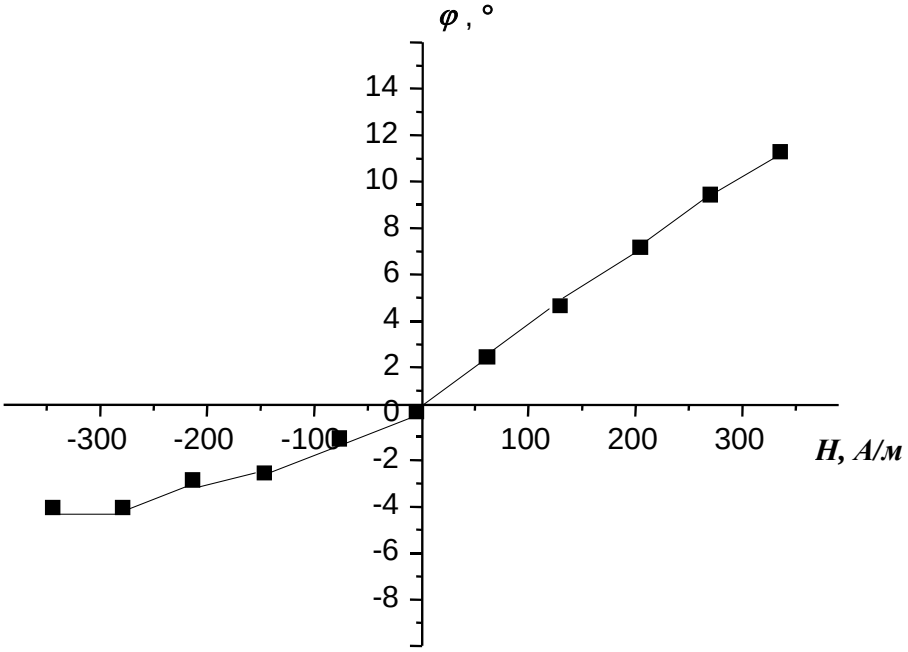


Рис. 2. Экспериментальная зависимость величины угла *φ* поворота плоскости поляризации от напряженности *H* магнитного поля в волокне.

Видно, что в области положительных значений магнитного поля H выполняется почти линейная зависимость $\varphi \propto H$, однако при отрицательных значениях H величина угла вращения заметно уменьшается.

Угол φ фарадеевского вращения плоскости поляризации света в среде равен

$$\varphi = VHL, \qquad (1)$$

где H – напряженность магнитного поля, L – длина образца, V – постоянная Верде. Постоянная Верде для плавленого кварца на длине волны $\lambda = 0{,}63$ мкм равна $V \approx 2{,}7 \cdot 10^{-4}$ град/А [2], с учетом спектральной зависимости ее значение на длине волны 0.85 мкм примерно в 1.35 раза меньше. Согласно (1), при напряженности магнитного поля 300 А/м величина угла поворота плоскости поляризации излучения, прошедшего через оптическое волокно длиной 800 м, равна 48°. Экспериментальное значение угла вращения при тех же условиях равно 10°.

Столь значительное расхождение расчетных и экспериментальных данных, по-видимому, объясняется неточностями оценки величины постоянной Верде и особенностями действия балансного фотодетектора при регистрации эллиптически-поляризованного света. Известно, что выходной сигнал ПБФ прямо пропорционален мощности полностью линейно-поляризованной составляющей падающего пучка света. Если на ПБФ падает эллиптически-поляризованное излучение, его можно представить суперпозицией линейно-поляризованного и циркулярно-поляризованного световых пучков. Отношение Υ мощности линейно поляризованной компоненты к полной мощности света равно

$$\Upsilon = (1 - e^2)/(1 + e^2), \qquad (2)$$

где e – эллиптичность (отношение малой и большой полуосей эллипса поляризации). При увеличении эллиптичности величина Υ уменьшается, что и приводит к уменьшению амплитуды регистрируемого ПБФ электрического сигнала. Циркулярно-поляризованная компонента излучения влияет лишь на уровень дробовых шумов фотодетектора. Кажущееся уменьшение угла фарадеевского вращения в области отрицательных значений магнитного поля на рис. 2, по-видимому, является следствием указанного увеличения эллиптичности регистрируемого света при отрицательных значениях магнитного поля.

Вместе с тем необходимо принимать во внимание, вообще говоря, сложный характер векторной структуры электромагнитного поля в сечении двулучепреломляющего маломодового волоконного световода, которое лишь в грубом приближении может быть представлено, например, суперпозицией неполяризованной и полностью эллиптически-поляризованной компонент. Кроме этого, существенное влияние на преобразование поляризации света в волоконном световоде оказывают его изгибы и скрутки. Изгиб световода вследствие явления фотоупругости приводит к двулучепреломлению в волокне, при этом у кварцевых световодов величина двулучепреломления $\Delta n = n_x - n_y$ равна $\Delta n \approx -0{,}133(r/R)^2$ [2], где r – радиус световода, R – радиус изгиба волокна. В условиях описываемого эксперимента (радиус сердцевины световода около 5 мкм, радиус катушки 50 мм) величина двулучепреломления, вызванная изгибом волокна, равна $1{,}33 \cdot 10^{-9}$. При длине световода 800 м разность фаз ортогонально поляризованных световых волн, обусловленная наведенным двулучепреломлением, на длине волны 0,85 мкм равна около 7,4 рад. Полная картина преобразования поляризации излучения в изогнутом двулучепреломляющем световоде под влиянием эффекта Фарадея носит сложный характер даже в одномодовом режиме распространения света. Эта картина существенно усложняется в мало- и многомодовых режимах распространения излучения в волокне. В связи с отмеченным окончательное объяснение экспериментально найденных в данной работе зависимостей составит предмет последующих исследований.

Литература

1. Ардашева Л. И. и др. Поворот спекл-картины в маломодовом оптическом волокне в продольном магнитном поле // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 7.
2. Гуляев Ю. В. и др. Модуляционные эффекты в волоконных световодах и их применение. М.: Радио и связь, 1991. 152 с.
3. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 656 с.
4. Papp A. and Harms H. Magnitooptical current transformer 1: Principles// Appl. Opt. 1980. Vol. 19. № 22. P. 3729–3734.
5. Александров Е. Б., Запасский В. С. Миллисекундная чувствительность поляриметрических измерений // Оптика и спектроскопия. 1976. Т. 41. В. 5. С. 855–858.
6. Smith A. M. Polarization and magnetooptic properties of single-mode optical fiber // Appl. Opt. 1978. Vol. 17. P. 2301–2307

РАСПОЗНАВАНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПО ОТРАЖЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

С.А. Алексеев, А.В. Пасяда

Среди главных нерешенных проблем при создании интеллектуальных роботов стоит проблема машинного зрения и адекватного хранения и обработки трехмерной визуальной информации, в частности, определение формы объектов. Изменение поляризации при отражении содержит определенную дополнительную информацию об ориентации поверхности и поверхностном слое отражающего объекта. Рассмотрим метод определения наклона поверхности по затенению и поляризации отраженного излучения.

Ориентация поверхности и ее отражательная способность

Определение ориентации поверхности по данным об отраженной интенсивности является сложной задачей, так как яркость изображения (интенсивность излучения) зависит от характера освещения поверхности, ее функции отражения и ориентации поверхности.

На определение формы объектов по затенению сильно влияет функция отражательной способности [1]. Отраженная в сторону наблюдателя доля света зависит от структуры поверхности. Эту зависимость описывают функцией трех углов (рис.1): угла падения $\boldsymbol{i}$, угла наблюдения $\boldsymbol{e}$, и фазового угла $\boldsymbol{g}$, образованного падающим и рассеиваемым лучами. Функция отражательной способности $\boldsymbol{\phi}(i, e, g)$ – это отражаемая с единицы площади поверхности в сторону наблюдателя доля падающего света, приходящаяся на единицу телесного угла (т. е. количество отраженного в сторону фотоприемника света с участка поверхности зависит от площади освещенного участка, значения функции $\boldsymbol{\phi}$ (i, e, g)). Эта функция близка по смыслу коэффициенту отражения. Приведем пример функции отражательной способности идеальной матовой поверхности:

$$\phi\,(i, e, g) = \cos i \qquad (1)$$

Для определения формы предложим задание ориентации поверхности на гауссовой сфере [2]. Это видимая наблюдателем часть сферы (полусфера) в системе координат наблюдателя, где он находится над полусферой. Наклон в исследуемой точке поверхности описывается направлением нормали к поверхности (рис. 2). Это же направление радиуса-вектора на гауссовой сфере однозначно определит точку Р (Ψ,Ξ) с угловыми координатами: Ψ – угол наклона поверхности (азимутальный) и Ξ – угол направления наклона (полярный угол) – рис. 2.

Рассмотрим карту отражательной способности. Она устанавливает связь яркостей изображения и ориентации поверхности. Допустим, мы работаем с конкретным типом поверхности, и его функция отражательной способности $\boldsymbol{\phi}$ известна. Будем считать источник света и позиции наблюдения удаленными. Каждая ориентация поверхности будет порождать конкретную картину значений яркости изображения. Ее можно представить соответствующей картой на гауссовой сфере (Ξ, Ψ). На гауссовой сфере строятся значения функции $\boldsymbol{\phi}$ при постоянном фазовом угле $\boldsymbol{g}$ (рис. 3). Для простоты вычертим изолинии яркости, нормированной с помощью некоторого масштабного коэффициента, принимающего значения от 0 (нулевая освещенность) до 1 (максимальная яркость на изображении). Если в некоторой точке измеренная яркость составляет 0,8, это значит, что данной ориентации поверхности (Ξ,Ψ) на карте отражательной способности соответствует точка на изолинии 0,8, но еще не известно, где именно на ней. На рис. 4 представлен пример карты, полученной в [3] для матовой поверхности.

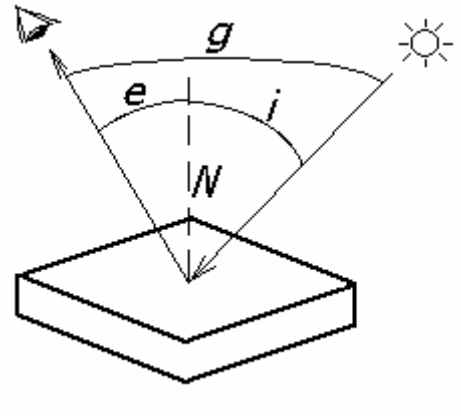


Рис. 1. Угол падения ***i***, наблюдения ***e*** и фазовый ***g***

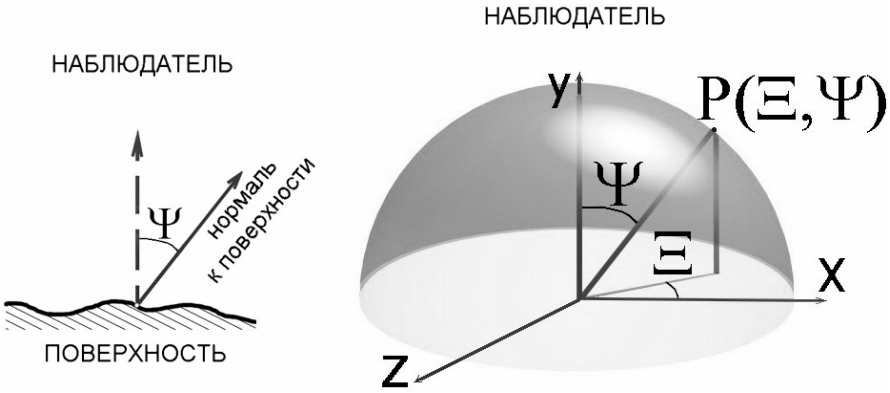


Рис. 2. Задание наклона поверхности на гауссовой сфере.

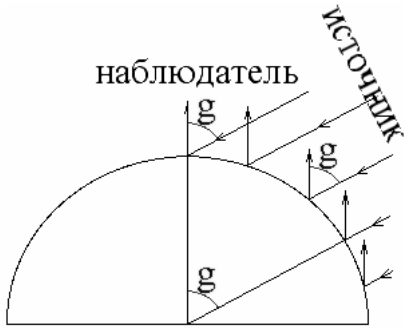
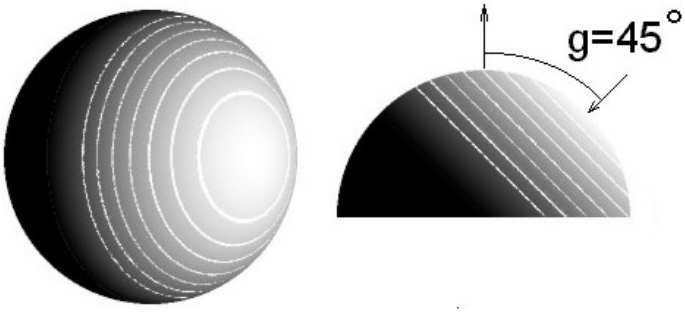


Рис. 3. Физический смысл карты отражательной способности на гауссовой сфере.
g – фазовый угол



а ***б***

Рис. 4. Карта отражательной способности матовой поверхности на гауссовой сфере с изолиниями яркости (белые) при фазовом угле ***g*** = 45°:
а – со стороны наблюдателя, ***б*** – вид под 90°

Привлечение поляризации к определению формы поверхности

Найти на изолинии конкретную точку поможет изменение поляризации при отражении. Рассматривая зеркальное отражение световой волны, целесообразно определять амплитуды отраженной волны только через амплитуды *p*- и *s*-компонент падающей волны, которые являются линейными колебаниями, параллельными (*p*) и перпендикулярными (*s*) плоскости падения (рис. 5). Коэффициент отражения *s*-волны R_s всегда больше (или равен) коэффициента отражения *p*-волны R_p. В отраженном свете преобладают колебания *s*-типа вектора напряженности электрического поля [4]. Подавление колебаний *p*-типа (рис. 5) при отражении способно показывать направление наклона поверхности, и коэффициенты отражения R_p и R_s зависят от углов падения и отражения.

Чтобы использовать зависимость $R_s(\phi)$ и $R_p(\phi)$ для изучения формы поверхностей из некоторого однородного материала, зависимость предварительно получим экспериментально. Так как R_s больше R_p (кроме нормального падения), то, даже если падающий свет естественно поляризован, отраженный и преломленный лучи частично поляризованы. С внешними источниками в сцене сложно обработать информацию. В схеме необходим осветитель, равномерно освещающий поле зрения поляризованным светом, а для большей поляризации отраженного света фазовый угол должен быть малым и постоянным, т.е. осветитель следует закрепить рядом с фотоприемником.

При отражении от идеально гладкой поверхности азимут эллипса поляризации будет ориентироваться ортогонально направлению наклона поверхности, а эллиптичность будет зависеть от наклона поверхности. Можно предположить, что при диффузном отражении на шероховатой поверхности будет проявляться та же тенденция.

Приведем сценарий определения формы объектов системой технического зрения.

На сцене определяется форма объектов из одного непрозрачного материала. Тогда для материала экспериментально получаем функцию отражательной способности и поляризации. С помощью калибровочного объекта мы сопоставим наклон поверхности с отраженной яркостью и поляризацией. Преимущества шара здесь в том, что на нем располагаются все наклоны поверхности, его легко распознать на изображении и смоделировать. Сцена освещается светом с заданной поляризацией и интенсивностью. Видеокамера фиксирует картину поляризации на калибровочном шаре, распознаются его границы, относительно них находится положение каждой точки (пикселя) и наклон поверхности в ней. Дальше экспериментальные значения интенсивности и поляризации сглаживаются и сопоставляются с наклоном. Составляется индексированная таблица по калибровочному объекту – таблица ориентации поверхности от яркости и поляризации (рис. 6). Затем на основе таблицы проводится обучение нейроподобной сети [5]. Задача сводится к тому, чтобы на каждый возможный входной сигнал (интенсивность, азимут, эллиптичность) формировался правильный выходной сигнал (наклон поверхности Ψ, направление наклона Ξ). Важным свойством таких сетей является способность к самоадаптации с улучшением качества функционирования.

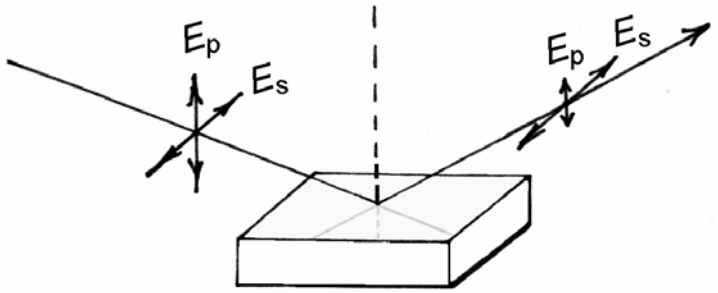


Рис. 5. В отраженном от идеально гладкой поверхности свете преобладают колебания **s**-типа вектора напряженности.

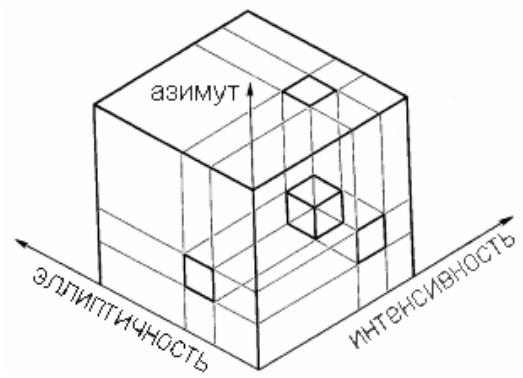


Рис. 6. Кодирование ориентации поверхности в виде таблицы, построенной для дискретных значений измерения интенсивности, азимута и эллиптичности поляризации

Определение поляризации фотометрическим методом

Поляризация и интенсивность измеряются фотометрическим методом. Перед фотоприемником установлен вращающийся линейный анализатор. Мы ищем интенсивность падающего на анализатор света $\mathbf{I}_0$ и его поляризацию χ_0. Интенсивность, прошедшую анализатор, обозначим $\mathbf{I}_{ФП}$, а поляризацию χ_A. Пусть зависимость интенсивности $\mathbf{I}_{ФП}(\alpha)$, проходящей анализатор и достигающей фотоприемник, измерена на интервале $0 \le \alpha < 2\cdot\pi$ в N точках

$$\alpha_k = k\cdot 2\pi / N, \text{ где } k = 0, 1, 2 \ldots N-1 \qquad (2)$$

Если при начальном положении анализатора ось пропускания совпадает с осью абсцисс, то зависимость следующая [4]:

$$I_{ФП} = K\, I_0 \tau_{макс}/2 + K\, I_0 \tau_{макс}/2 \cdot \frac{1-|\chi_0|^2}{1+|\chi_0|^2} \cdot \cos(2\alpha) + K\, I_0 \tau_{макс}/2 \cdot \frac{2\cdot \mathrm{Re}(\chi_0)}{1+|\chi_0|^2} \cdot \sin(2\alpha) \qquad (3)$$

где K – собственное поглощение анализатора, $\tau_{макс}$ – максимальное пропускание анализатора по интенсивности. Обозначим:

$$a_0 = K\, I_0 \tau_{макс}, \qquad (4a)$$

$$a_2 = K\, I_0 \tau_{макс} / 2 \cdot \frac{1-|\chi_0|^2}{1+|\chi_0|^2}, \qquad (4б)$$

$$b_2 = K\, I_0 \tau_{макс} / 2 \cdot \frac{2\cdot \mathrm{Re}(\chi_0)}{1+|\chi_0|^2}. \qquad (4в)$$

Чтобы определить I_0 и χ_0, достаточно вычислить коэффициенты Фурье $\boldsymbol{a_0}$, $\boldsymbol{a_2}$ и $\boldsymbol{b_2}$ на основе численного гармонического анализа [6]:

$$a_0 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} I_{ФП}(\alpha_k), \qquad (5a)$$

$$a_2 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} I_{ФП}(\alpha_k) \cdot \cos\frac{4\pi \cdot k}{N}, \qquad (5б)$$

$$b_2 = \frac{2}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} I_{ФП}(\alpha_k) \cdot \sin\frac{4\pi \cdot k}{N}. \qquad (5в)$$

После преобразований получим значения двух поляризационных параметров – угла эллиптичности

$$\varepsilon = \pm \arcsin\sqrt{1 - 4\cdot\left(a_2^{\,2} + b_2^{\,2}\right)/ a_0^{\,2}} \;/\; 2 \qquad (6)$$

и азимута

$$\theta = \mathrm{arctg}\,(b_2 / a_2) / 2. \qquad (7)$$

Фотометрический метод не дает определить только знак эллиптичности. Строго говоря, ε и θ – угол интегральной эллиптичности и азимут, так как отображаемая на одном пикселе изображения площадь неровной поверхности отражает лучи с разной поляризацией, т.е. мы имеем дело с частично поляризованным светом. Значит, ε – параметр, отражающий степень поляризации.

Так как. величины K и $\tau_{макс}$ – постоянные анализатора, вместо интенсивности можно использовать нормированную интенсивность

$$I_0 \cdot K \cdot \tau_{макс} = a_0. \qquad (8)$$

Определение ориентации поверхности на калибровочном объекте

Для эксперимента было выбрано освещение горизонтальным линейно поляризованным светом. Для снижения влияния шумов на изображение видеозахват проводился с усреднением изображения по 10 кадрам. Определение поляризации проводилось фотометрическим методом по четырем угловым положениям анализатора: $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \pi/4$, $\alpha_3 = \pi/2$, $\alpha_4 = 3/4 \cdot \pi$. Для точности эксперимента для каждого из четырех кадров получаем кадр при выключенной осветительной установке, когда освещают только внешние источники. Такой кадр вычитается из кадра с освещенной сценой, и из результирующей четверки кадров получаем картину поляризации и интенсивности.

Определим зависимость между ориентацией поверхности и отраженной интенсивностью и поляризацией. Из данных строится индексированная таблица. В качестве калибровочного объекта взят шар из исследуемого материала. Получая изображение с данными об изменении поляризации, распознаем границы шара. В программном обеспечении [7] для выделения границ был использован метод Собела [8]. Первая точка на границе изображения шара задается вручную. Затем выбираются точки с максимальным значением оператора контрастирования Собела, и с третьей точки дополнительно вводятся ограничения на кривизну контура. Алгоритм в [7] показывает хорошие результаты на изображениях калибровочных шаров при контрастном фоне; на рис. 7 показан пример выделения границы.

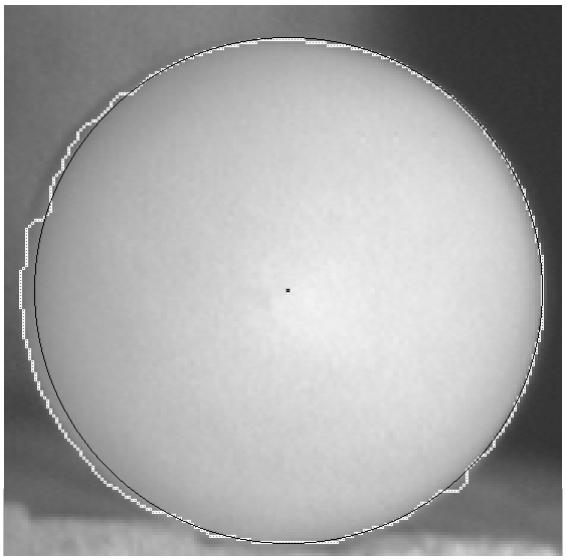


Рис. 7. Распознанная граница (белым), вероятный центр и окружность (черным), выбранная алгоритмом как наиболее близкая к границе (первой точкой выбрана крайняя нижняя).

Чтобы определить наиболее близкие к вычисленной границе центр и радиус, предложим поиск на полученном периметре от каждой точки другой точки, наиболее удаленной от нее. Считая это пробным диаметром, середина которого дает пробный центр, находим координаты его середины и радиус. От пробного центра замерим расстояния S до всех остальных точек на периметре и отличие расстояния ΔS от исходного пробного радиуса. Введем предельный разброс $\Delta S_{пред.}$ Пробный диаметр, у которого максимальное число отличий ΔS оказалось меньше предельного разброса, $\Delta S < \Delta S_{пред.}$, считается действительным диаметром, а его центр – действительным центром.

В эксперименте в [7] был взят $\Delta S_{пред.}$= 0,5 (пикселя). В результате получаем область на кадре с центром в ($x_{действ.}$, $y_{действ.}$) и диаметром $D_{действ.}$ как изображение калибровочного шара. На рис. 7 она обозначена черной окружностью.

Зададимся полярной системой координат на изображении в области шара: полюс в центре окружности, радиус R и угол Ξ. Направление наклона в точке на поверхности шара определяется углом Ξ (как на гауссовой сфере), а наклон – углом

$$\Psi = \arcsin(R : (D_{действ.}: 2)). \qquad (9)$$

Установка и экспериментальные данные

Общая схема установки показана на рис. 8. Излучение из лазерного источника преобразуется осветителем в пучок параллельных лучей, обеспечивая равномерное освещение. При этом сохраняется горизонтальная линейная поляризация лазерного излучения. Получение изображения производится видеокамерой VSC-541. На вращающейся основе в установлен линейный анализатор ПФ-52.

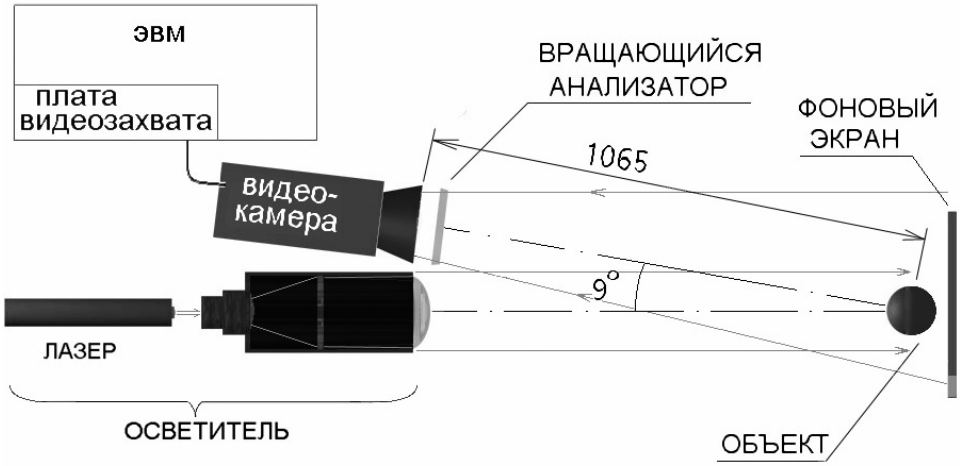
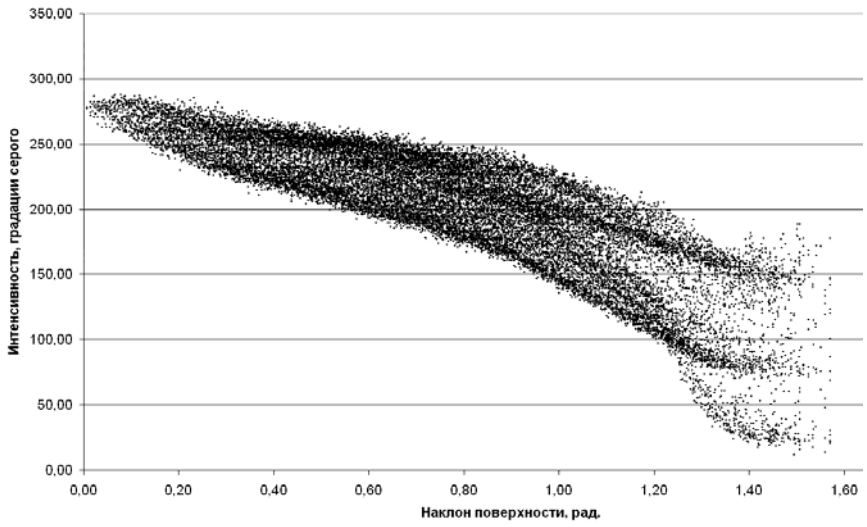


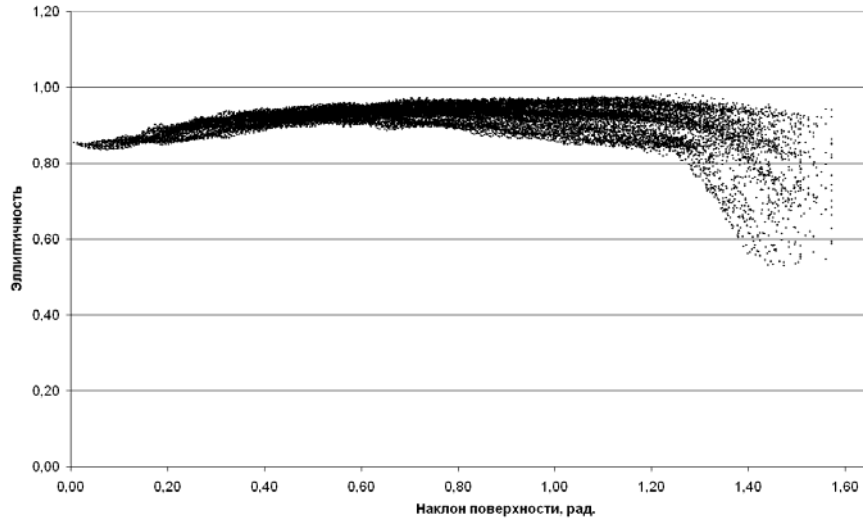
Рис. 8. Общая схема экспериментальной установки

Для определения поляризации по 4 кадрам ориентаций анализатора разработано программное обеспечение [7]. Оно обрабатывает предварительно оцифрованные кадры с 256 градациями серого, распознавая границы калибровочного шара и рассчитывая ориентацию поверхности в каждой точке. Результаты выводятся в индексированные таблицы в MS Excel в виде интенсивности, эллиптичности, азимута, сглаженной интенсивности, сглаженной эллиптичности, сглаженного азимута, угла наклона и угла направления наклона.

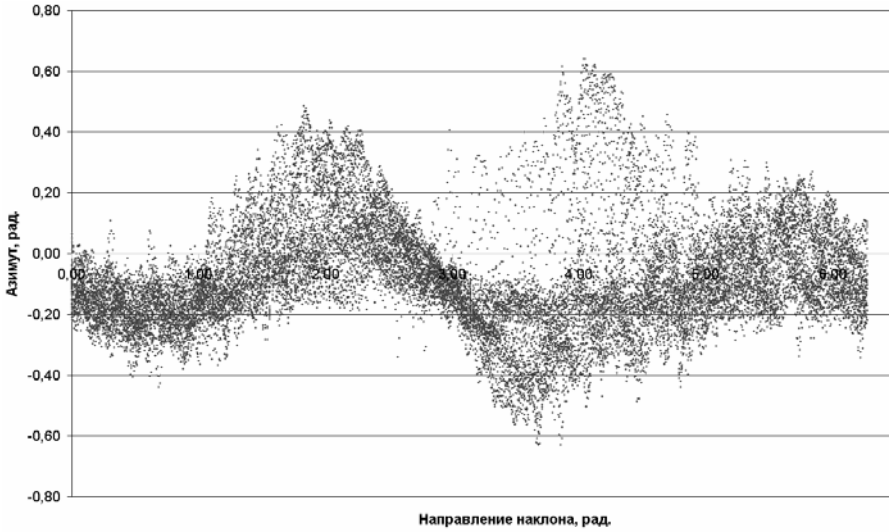
Сглаживание подавляет возмущения на микронеровностях шара и усиливает общую тенденцию зависимости ориентации поверхности от интенсивности и поляризации. Сглаживание проводилось усреднением по квадрату 5×5 точек с центром в этой точке и весовыми коэффициентами, распределенными по двумерному нормальному закону, так как он дает наиболее равномерное размывание изображения [5]. Закон распределения был взят с отклонениями $\sigma_1 = \sigma_2 = 1{,}302$.



а



б



в

Рис. 9. Поверхность из полиэтилена высокого давления при сглаживании: ***а*** - зависимость интенсивности от наклона при сглаживании, ***б*** - зависимость «интегральной» эллиптичности (см. п.3) от наклона, ***в*** - зависимость азимута поляризации (см. п.3) от направления наклона поверхности.

В экспериментах получены зависимости наклона от поляризации и интенсивности для нескольких типов поверхности. На рис. 9 приведены зависимости, полученные после сглаживания, для шара из полиэтилена высокого давления.

Заключение

Разработан метод определения ориентации поверхностей по калибровочным объектам на основе получения зависимостей интенсивности и параметров поляризации от наклона. Хотя метод требует увеличения автоматизации измерений и точности, результаты показывают существование зависимостей между ориентацией поверхности и изменением интенсивности и параметров поляризации отраженного света. По полученным выборкам предстоит обучать нейроподобные сети для определения наклона поверхности из известного материала (покрытия). Создано программное обеспечение [8], вычисляющее данные и строящее индексированную таблицу в MS Excel.

В итоге без стереоскопического зрения можно определять наклон поверхности. Кроме того, поляризация расширит возможности сегментации изображения в системах технического зрения. Это можно использовать для определения не обнаруживаемых по другим параметрам излучения изменений в объектах. Например, среди таких механизмов – явление фотоупругости.

Литература

1. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов / Под ред. И.Б. Гуревича. М.: Радио и связь, 1987.
2. Хорн Б.К.П. Зрение роботов / Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
3. Пасяда А.В. ПО Карта отражательной способности на гауссовой сфере / исх. код на MS Visual Basic 6: http://www.zhbi.h1.ru
4. Аззам Р. Башара Н., Эллипсометрия и поляризованный свет. М., Мир, 1981
5. Нейрокомпьютеры и интеллектуальные роботы / Под ред. Амосова Н.М. Киев, Наукова думка, 1991. С. 49–51, С. 160
6. Бронштейн И.Н, Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1980
7. Пасяда А.В., ПО Поляризация на калибровочном шаре / исх. код на MS Visual Basic 6: http://www.zhbi.h1.ru
8. Цифровая обработка изображений: http://ktf.krk.ru/courses/fulleren/g3.htm

5 ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.П. Смирнов

Введение

Система компьютерной математики MathCAD [1] известной фирмы MathSoft разрабатывалась как система автоматического проектирования (САПР). Многие трудоемкие и математически насыщенные численные методы, наиболее часто встречающиеся в физических исследованиях, нашли свое отражение в системе MathCAD. Для проектирования оптических приборов представляет интерес возможность построения и решения задач оптимизации. Нахождение локального экстремума целевой функции или решение системы нелинейных уравнений при наличии ограничений составляет основную задачу автоматического расчета оптических систем. Число ограничений в MathCAD2000/2001 доведено до 200. Формат числовых данных в MathCAD – как скалярный, так и матричный, поэтому задача оптимизации оптической системы может решаться в векторном виде.

Построение модели оптического прибора – неотъемлемая часть процесса проектирования и конструирования. Создание адекватной схемы функционирования, включающей объект наблюдения, оптический прибор и устройство считывания информации, принципиально невозможно в силу сложности реальных процессов. Минимизация возникающей методической погрешности решается наилучшим образом в рамках MathCAD путем создания имитационной модели объекта, оптической системы и окружающей среды.

Задавшись законом распределения плотности вероятности первичных погрешностей оптических элементов и схемы, мы определяем векторную сумму частичных погрешностей информативного выходного параметра и устанавливаем обобщенную передаточную функцию (функцию влияния) [2] от заданного уровня точности. Использование для этой цели имитационной модели имеет следующие преимущества. Во-первых, суммирование частичных погрешностей осуществляется естественно, по внутреннему закону системы. Во-вторых, моделирование не чувствительно к тем случаям, когда невозможно аналитически установить закон функционирования. В-третьих, имеется возможность проследить за изменением функции плотности распределения вероятности погрешности и тем самым более точно указать доверительную вероятность результата наблюдения. В-четвертых, она позволяет устранить имеющийся разрыв между расчетом оптических систем и конструированием оптических приборов с их применением. Рассчитанную оптическую подсистему вне среды MathCAD практически невозможно включить в модель проектируемой надсистемы. Этот разрыв усугублялся еще тем фактом, что создание эффективной программы расчета оптики и проектирование оптических приборов – это области вычислительной математики и оптического приборостроения, которые перекрываются в незначительной степени. Необходимо сотрудничество специалистов различного профиля. MathCAD удачно устраняет этот разрыв, предлагая широкий спектр программ вычислительной математики, причем программирование осуществляется на интуитивном уровне.

В качестве иллюстрации рассмотрим задачу определения обобщенной передаточной функции конденсора, связывающей первичные погрешности децентрировки и наклона линз, входящих в оптическую схему конденсора.

Трехлинзовый конденсор, проектирующий изображение источника на бесконечность, исследован в работе [3]. Целью работы было показать, что путем вариации начальных условий в случае, когда число корригируемых функций меньше числа коррекционных параметров, можно получить более высокое качество коррекции. Коррекционные параметры – это 6 радиусов кривизны линз, а корригируемые параметры – это фокусное расстояние и несколько зональных значений сферической аберрации. Когда корригируемых функций было столько же, сколько и коррекционных параметров, результаты коррекции при варьировании начальных значений коррекционных параметров оказались сравнимыми. При уменьшении корригируемых параметров на один получено значительное снижение сферической аберрации для крайней зоны. Расчеты проводились в ГОИ на ЭВМ БЭСМ-6.

Факт снижения уровня аберрации объясняется [3] особенностями математической основы программы расчета. Если число корригируемых функций и число параметров равны друг другу, то методика расчета моделирует “ручной” расчет, основанный на использовании таблиц влияния параметров. Если же такого равенства нет, то применяется методика использования “избыточных” параметров, позволяющая ускорить сходимость за счет уменьшения числа итераций.

Очевидно, что проблема оптимизации счета за счет ускорения сходимости алгоритма на современном этапе развития вычислительной техники потеряла экономический оттенок. Если тактовая частота процессора БЭСМ-6 составляла 1 Мгц, то процессоры седьмого и выше поколений на порядки превышают данную характеристику, она составляет гигагерцы. Та же тенденция отмечается и в отношении оперативной памяти.

О программе расчета оптических систем

Какие формулы положить в основу построения модели оптической системы? Это был важный вопрос, и ему посвящены многие исследования. По критериям точности и минимизации времени расчета оптических систем выбирались наиболее экономичные формулы. В монографии [4] предлагается использовать для расчета меридиональных лучей формулы Смита, имеющие преимущества в отношении точности, а для косых лучей – формулы Федера, исключающие использование тригонометрических функций, имеющие минимальное число квадратных корней на поверхность и не теряющие точности. Там же отмечается, что использование для расчета лучей методов аналитической геометрии, предложенных И.В. Лебедевым еще в 1937 г., не имеет опыта применения.

Использование методов аналитической геометрии наиболее органично в среде MathCAD. Можно сказать, что с появлением подобных программных продуктов начинает появляться и опыт матричного аналитического расчета оптических систем.

Во-первых, понятие входного луча заменяется обобщенным лучом, представляющим собой различные множества и комбинации лучей, например, пары меридиональных и сагиттальных лучей по апертуре (для расчета астигматизма), единственный параксиальный луч (при определении кардинальных точек) или система концентрических лучей (при расчете сферической аберрации).

Исходная информация задается также в матричном виде: например, матрица системы может иметь вид

$$System = \begin{pmatrix} r1 & r2 & r3 & D \\ k1 & k2 & k3 & \psi \\ d0 & d1 & d2 & S_0 \\ n1 & n2 & n3 & n4 \end{pmatrix},$$

где первая строка содержит исходные радиусы кривизны поверхностей (в последнем столбце указан диаметр входного зрачка), вторая – коэффициенты коникоида (в по-

следнем столбце указан полевой угол или линейный размер предмета), третья – толщины и осевые промежутки (в последнем столбце указано расстояние до предмета, причем может быть использован символ “бесконечность”), четвертая – показатели преломления. Текущий луч представлен двухстолбцовой матрицей

$$U = \begin{pmatrix} x_t & p_t \\ y_t & q_t \\ z_t & m_t \end{pmatrix},$$

где первый столбец – текущие пространственные координаты точки на луче, а второй столбец – направляющие косинусы луча.

Рис.1. Блок-схема программы расчета оптической системы

В основе программы лежат формулы аналитической геометрии в пространстве. Трассировка лучей происходит в локальной декартовой системе координат, связанной с полюсом поверхности, поэтому перед обращением к текущей поверхности происходит переход из глобальной системы координат в локальную, а после завершения всех операций на текущей поверхности – возврат в глобальную систему координат.

Поверхность коникоида записывается в виде

$$x^2 + y^2 + (1+K)z^2 - 2Rz = 0\,. \qquad (1)$$

где K – коэффициент коникоида, R – радиус кривизны полюса поверхности.

Матрица поворота при переходе в локальную систему координат имеет вид

$$\mathrm{M} = \begin{pmatrix} t(M + \frac{Q^2}{M}) & -tP\frac{Q}{M} & -tP \\ 0 & t & -t\frac{Q}{M} \\ P & Q & M \end{pmatrix}, \quad где \quad t = \frac{sign(Q)}{\sqrt{1+\left[\frac{Q}{M}\right]^2}}. \qquad (2)$$

В (2) вектор *(P,Q,M)* есть вектор наклона нормали к полюсу поверхности в глобальной системе координат.

Точка встречи находится из решения квадратного уравнения, из которого определяется алгебраическая длина луча S до точки встречи,

$$a \cdot S^2 + b \cdot S + c = 0, \quad где$$
$$a = 1 + K\,{m^2}/{n^2}, \quad b = \{x \cdot p + y \cdot q + [(1+K) \cdot z - R] \cdot m\}n \quad c = x^2 + y^2 + (1+K)z^2 - 2R \cdot z, \qquad (3)$$

а n – показатель преломления среды. Из двух решений (3) выбирается меньшее по модулю значение.

Вектор нормали в точке встречи *(x,y,z)* вычисляется по формуле

$$\begin{pmatrix} p_N \\ q_N \\ m_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ t \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + t^2}}, \quad где \quad t = (1+K)z - R \qquad (4)$$

Направление нормали ориентируется из первой среды во вторую.

Акт преломления или отражения луча осуществляется в соответствии с формулой

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ q_1 \\ m_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_0 \\ q_0 \\ m_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_N \\ q_N \\ m_N \end{pmatrix} \cdot \left\{sign(n2)\sqrt{t^2 + n2^2 - n1^2} - t\right\}, \quad где \quad t = (p_0 p_N + q_0 q_N + m_0 m_N). \qquad (5)$$

В случае отражения полагают $n2$=-1.

Результат расчета оформляется в виде функции коррекционных параметров. Оптимизация выходной функции осуществляется средствами MathCAD. Рассмотрим это на примере [3].

Коррекция конденсора

Конденсор проектирует изображение источника на бесконечность. Фокусное расстояние конденсора 30 мм, числовая апертура 0,6. В качестве материала линз используется стекло К8. Толщины линз в обратном ходе $d1$ = 4мм, $d3$ = $d5$ = 3мм, воздушные промежутки $d2$ = $d4$ = 0.1мм. С помощью программы автоматизированной коррекции на ЭВМ БЭСМ-6 конденсор рассчитан на минимум сферической аберрации. Наилучший из вариантов расчета представлен в таблице. Коррекционные параметры – радиусы кривизны: начальные R_0 и конечные R_1, корригируемые функции – фокусное расстояние и зональные сферические аберрации.

В качестве корригируемой функции, в отличие от работы [3], использовался максимум сферической аберрации в плоскости параксиального фокуса, оцениваемый по дисперсии пятна рассеяния.

Далее коррекционные параметры R_1 использовались для дальнейшей коррекции в рамках MathCAD по критерию минимума дисперсии сферически аберрированного пят-

на в плоскости параксиального фокуса. В результате получен вариант конденсора, улучшенного по уровню сферической аберрации по сравнению с приведенным в [3]: максимум аберрации по входному зрачку составил 0.014 мм против 0.156 мм. При коррекции были задействованы первые три радиуса. Результаты расчета представлены в таблице.

<table>
<tr><td colspan="3">Коррекционные параметры</td><td colspan="3">Корригируемые функции</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="2">[3]</td><td>MathCAD</td></tr>
<tr><td rowspan="2">R_0</td><td colspan="2">R_1</td><td rowspan="2">Фокусное расстояние</td><td rowspan="2">30,26</td><td rowspan="2">32,00</td></tr>
<tr><td>[3]</td><td>MathCAD</td></tr>
<tr><td>200</td><td>22.59</td><td>22.49</td><td rowspan="2">Сферическая аберрация при высоте: 18.000</td><td rowspan="2">0,007</td><td rowspan="6">Максимум аберрации по зрачку

0.014</td></tr>
<tr><td>-100</td><td>-281.52</td><td>-65.99</td></tr>
<tr><td>100</td><td>-53.55</td><td>-33.15</td><td>15.588</td><td>0,031</td></tr>
<tr><td>-100</td><td>-472.20</td><td>-472.20</td><td>12.728</td><td>-0,156</td></tr>
<tr><td>100</td><td>17.66</td><td>17.66</td><td rowspan="2">9.000</td><td rowspan="2">-0,081</td></tr>
<tr><td>-100</td><td>42.62</td><td>42.62</td></tr>
</table>

Таблица. Результаты коррекции сферической аберрации конденсора в работе [3] и в данной работе в среде MathCAD.

Определение функции влияния погрешностей положения оптических поверхностей линз конденсора

Децентрировка и наклон одной оптической поверхности вносит в изображение целый спектр волновых аберраций [5]: меридиональный и сагиттальный наклон изображения, кома, астигматизм и дисторсия третьего порядка, отсутствующие в центрированных системах. Первичные волновые аберрации 4 порядка получают дополнительные приращения, появляется 11 аберраций 5 порядка, расширяется наименование типов аберраций: появляются стреловидная ошибка (сагитта), птерра. Аберрированная поверхность служит образованием дополнительных аберраций второго порядка на последующих оптических поверхностях. Таким образом, первичная сферическая аберрация центрированной системы, получая приращение при разъюстировке, обрастает большим количеством дополнительных аберраций. Это приводит к тому, что аналитическое выражение суммарной аберрации оказывается чрезвычайно громоздким. Если при этом вспомнить, что аберрации разъюстировки (наклона и децентрировки) носят векторный характер, то можно заключить, что эффективным единственным способом анализа при проектировании в этом случае остается метод имитационного моделирования, или метод Монте-Карло.

Заметим, что предложенный М.М. Русиновым [6] метод “деформирующих” элементов также предполагает применение прямого расчета. Согласно методу для удобства анализа вместо реального элемента, вносящего погрешность, используют некоторый “деформирующий элемент”, эквивалентный по своему действию, но расположенный или в пространстве предметов, или в пространстве изображений. При этом необходимо проводить расчет хода лучей через часть или всю анализируемую систему.

Дополнительным преимуществом при моделировании первичных погрешностей оптического прибора является возможность синтеза допусков на первичные погрешности. При этом учет особенностей различных проектных методов может быть промоделирован с помощью задания статистических характеристик отдельных погрешностей. Так, например, располагая данными о технологических допусках на обработку оптиче-

ских деталей и оправ на том или ином уровне точности, можно непосредственно получить соответствующее значение корригируемой функции.

В данном случае погрешности положения линз конденсора являются однородными, поэтому используем метод равных допусков, согласно которому суммарная погрешность, аберрация конденсора, складывается из частичных погрешностей пропорционально передаточным функциям (коэффициентам влияния).

Для реализации модели реального конденсора определим матрицу положений линз

$$E(\Delta,\Theta)=\begin{pmatrix} x_0 & u_0 & x_1 & u_1 & x_2 & u_2 \ldots \\ y_0 & v_0 & y_1 & v_1 & y_2 & v_2 \ldots \\ z_0 & w_0 & z_1 & w_1 & z_2 & w_2 \ldots \end{pmatrix},$$

где (x_k, y_k, z_k) – положение центра полюса к-поверхности в глобальной системе координат, а (u_k, v_k, w_k) – направляющие косинусы нормали в полюсе к-поверхности. Предположим, что положения координат разъюстировки распределены равномерно на интервале $[-\Delta/2,\Delta/2]$, а углы разъюстировки также распределены равномерно на интервале $[-\Theta/2,\Theta/2]$.

В результате моделирования получаем зависимости дисперсии аберрированного изображения от величины интервалов разъюстировки, представленные на рис.2 и 3.

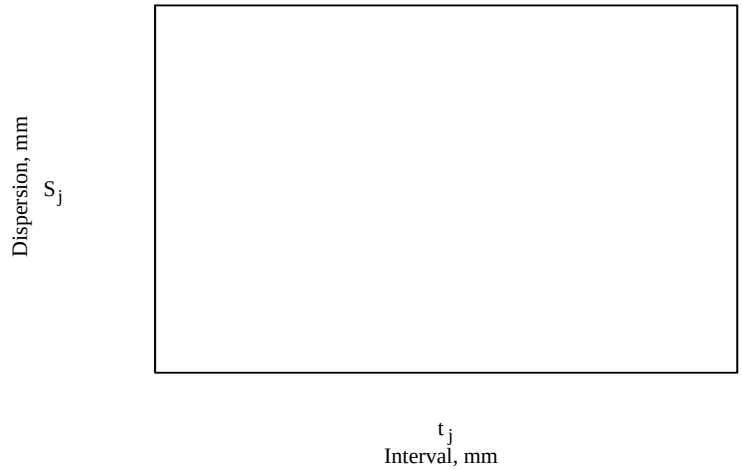


Рис. 2. Зависимость дисперсии аберрации от величины интервала разъюстировки

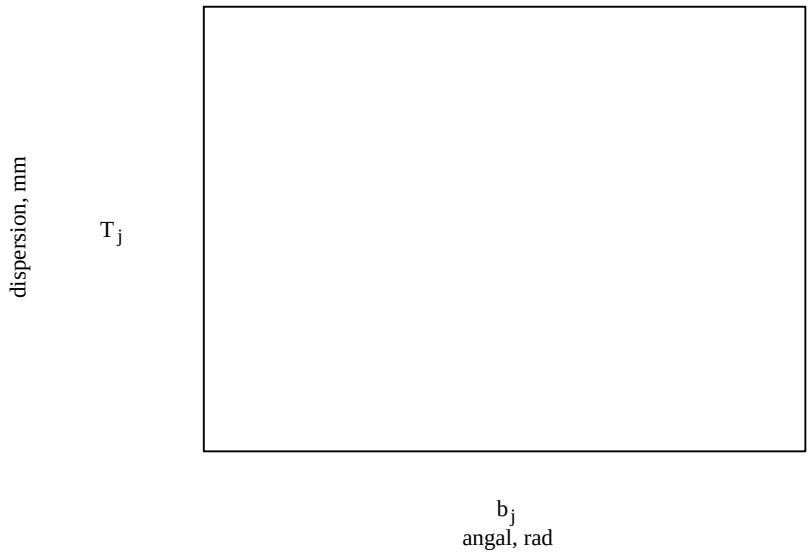


Рис. 3 Зависимость дисперсии аберрации от величины интервала углов разъюстировки

Обращает на себя внимание сильная изрезанность передаточной функции отдельной реализации. Из этого можно сделать вывод, что существует определенная вероятность получения высокой аберрационной характеристики при больших допусках разъюстировки отдельного прибора.

Если сравнивать влияние пространственных и угловых разъюстировок, то их соответствие друг другу можно условно установить с помощью диаметра линз *D*. Примем следующий критерий соответствия: $\Delta\alpha \approx \Delta/D$.Тогда Δ=1мм соответствует наклону в 0.028 рад (D = 36 мм). Из сравнения графиков на рис.2 и 3 видно, что соответствующий наклон в несколько (2–3) раз менее критичен, чем децентрировка по данному критерию.

На рис.4 представлена зависимость дисперсии аберрации от интервала децентрировки, усредненная по 10 реализациям. Линейная регрессия данной зависимости отображена на графиках рис.4 пунктиром. Регрессионная функция

$$F(\Delta)=0{,}002979 + 0{,}116\,\Delta$$

может рассматриваться как передаточная функция обобщенного допуска на разюстировку рассматриваемого конденсора.

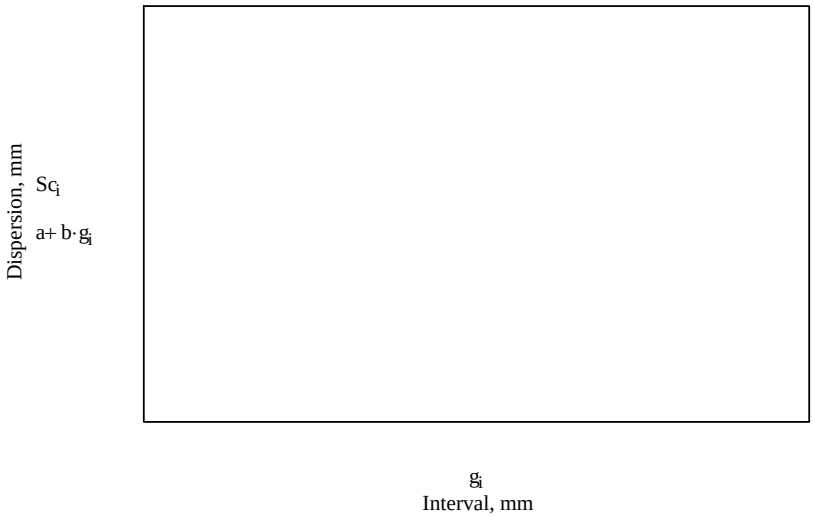


Рис.4 Зависимость дисперсии аберрации от интервала разъюстировки по ансамблю.

Аналогичные графики поведения передаточной функции разъюстировки для случая недоисправленного конденсора, имеющего остаточную сферическую аберрацию, представлены на рис.5–7.

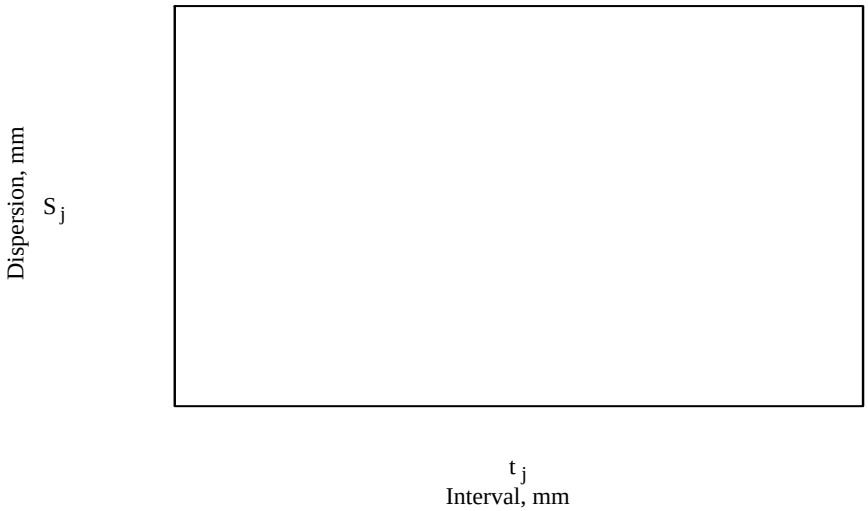


Рис. 5. Зависимость дисперсии аберрации от интервала разъюстировки в случае наличия остаточной сферической аберрации конденсора

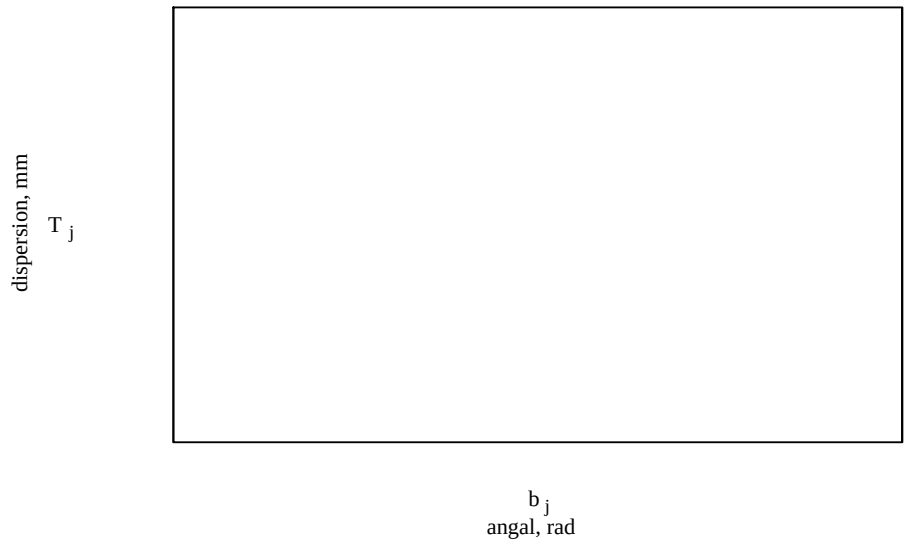


Рис.6. Зависимость дисперсии аберрации от интервала угловой разъюстировки в случае наличия остаточной сферической аберрации конденсора.

Рис.7. Зависимость дисперсии аберрации от интервала разъюстировки в случае наличия остаточной сферической аберрации конденсора по ансамблю из 10 реализаций.

Обращает на себя внимание увеличение разброса значений передаточной функции: среднеквадратическое отклонение возросло с 0,106 до 0,115. Менее выражена монотонность и наклон линейной регрессионной кривой также меньше. Регрессионная функция имеет вид

$F(\Delta)=0{,}235 + 0{,}038\Delta$.

Заключение

Допуски на положение (разъюстировку и технологические погрешности) оптических поверхностей носят векторный характер. Для их определения требуется использовать программу расчета хода лучей через разъюстированную соответствующим образом систему. Использование для этих целей мобильной расчетной программы, моделирующей оптическую систему и легко меняющей свою архитектуру в зависимости от конкретных влияющих параметров, представляется единственно возможным решением этой задачи. Программно-математический пакет MathCAD предлагает для этой цели широкие возможности по визуально-ориентированному программированию, а мощная математическая оболочка облегчает анализ и представление полученных результатов,

чем способствую наиболее оптимальному проектированию с учетом самих строгих требований к его проведению.

Построение такой программы в MathCAD и ее использование проиллюстрировано на примере определения допусков разъюстировки конденсора, ранее рассчитанного по программе САРО на ЭВМ БЭСМ-6. В результате найдено более эффективное сочетание коррекционных параметров, построена модель, имитирующая разъюстировку всех трех линз в заданном диапазоне и с заданной функцией распределения. Проведен анализ как отдельной реализации схемы, так и усредненной по ансамблю. С помощью линейной регрессии получены передаточные функции в обоих случаях. Поведение передаточной функции в случае остаточной сферической аберрации отличается от таковой в случае отсутствия аберраций большей “изрезанностью”, большей величиной среднеквадратического отклонения и меньшей зависимостью от величины интервала разъюстировки.

Полученные значения непосредственно могут быть использованы при проектировании данного конденсора и как отдельного элемента, и в составе другого прибора, с учетом уровня технологичности.

Полученные результаты могут быть использованы в инженерной деятельности и в учебном процессе по дисциплинам, охватывающим как анализ, так и конструирование точных оптических приборов.

Литература

1. Дьяконов В.П. MathCAD 2001. Специальный справочник. СПб: Питер, 2002.
2. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. / Учебное пособие. Часть 2. СПб.: 1999.
3. Грамматин А.П. О возможности нахождения нескольких решений при автоматизированной коррекции оптических систем. / Труды ЛИТМО. Проектирование и исследование оптических систем, Л.,1979.
4. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., 1969.
5. Смирнов А.П. Аберрации разъюстировки оптических систем, исследованные в рамках теории эйконала Зейделя. // Оптика и спектроскопия. 1995. Т. 78. №1. С.165–173.
6. Русинов М.М. Габаритные расчеты оптических систем. М., 1963.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЮСТИРОВКИ ПОДВИЖНЫХ ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.М. Бурбаев

Обсуждаются методические аспекты обучения студентов решению задач юстировки поворотных зеркально-призменных систем. На примере оптико-механического устройства для вращения изображения излагается методика построения математической модели, позволяющей просматривать решение задачи без применения сложных аналитических методов.

Многолетний опыт преподавания дисциплины «Сборка, юстировка и контроль оптических приборов» показывает, что такой раздел курса, как юстировка зеркально-призменных систем (ЗПС), вызывает у студентов, пожалуй, наибольшие трудности. Конечно, речь здесь идет о юстировке сложных ЗПС, а также о вращаемых ЗПС. Необходимо отметить, что область применения ЗПС как функциональных устройств оптических приборов (ОП) постоянно расширяется. Это связано, в частности, с тем, что во многих случаях использование ЗПС дает лучшее, по сравнению с другими системами, схемное или конструктивное решение. Особенно заметно состояние неуверенности у студентов при решении задач юстировки во время курсового и дипломного проектирования. На этом этапе обучения студентам в достаточно сжатые сроки необходимо представить научно обоснованную методику юстировки разработанного устройства в виде соответствующего раздела пояснительной записки.

Для овладения современными методами расчета и анализа сложных ЗПС, такими как векторно-матричный, винтовое исчисление и алгебра бикватернионов, применение которых показано в работах [1–4], требуется не только огромное время, но и глубокие математические знания, навыки и, наконец, воля. Какой же видится выход из этого затруднения? В статье [5] на примере развертывающего устройства плоскомера показан альтернативный метод анализа подвижных ЗПС, основанный на построении простой и наглядной математической модели, позволяющей просматривать решаемую задачу (юстировки и обеспечения необходимой точности функционирования устройства) с точки зрения геометрии ее построения.

В данной работе делается попытка изложить методические аспекты обучения студентов решению задач юстировки поворотных ЗПС.

Прежде всего, решение той или иной задачи предполагает не только ее четкое формулирование, но и глубокое понимание физических принципов, положенных в основу работы устройства. Необходимо представить себе результат функционирования оптической системы, например, наблюдаемую в поле зрения траекторию перемещения изображения какого-либо объекта, в случае проведения требуемой юстировки и в отсутствие таковой. Необходимо также определить перечень как очевидных, так и предполагаемых первичных погрешностей устройства, от которых может зависеть достигаемый в процессе юстировки результат.

После этого можно приступать к разработке модели – максимально формализованной и вместе с тем наглядной схемы анализируемого устройства, в которой сложные ЗПС заменяются простейшими эквивалентами. Схемы, дающей полное представление о геометрических связях между элементами устройства, характеризующих его состояние.

Перечислим еще некоторые принципиально важные положения, понятия, методы и приемы, используемые при разработке и анализе моделей устройств, содержащих поворотные системы плоских зеркал и призм.

- ЗПС характеризуются следующими видами преобразования пространства: инверсией, сдвигом и поворотом. Под инверсией понимают такое преобразование пространст-

ва, при котором радиус–вектор **r** точки изменяет свое направление на обратное, преобразуется в радиус-вектор **-r**. Такое преобразование дает одиночное плоское зеркало, когда вектор коллинеарен орту его нормали. В общем случае одиночное зеркало дает все три вида преобразования: инверсию, сдвиг точки на двойное значение ее расстояния от зеркала и поворот вокруг орта нормали на угол π. Зеркальный ромб дает сдвиг пространства на двойной линейный базис – двойное расстояние между его зеркалами по направлению орта нормали первого по ходу лучей зеркала. Два как угодно расположенных зеркала представляют собой так называемое угловое зеркало (УЗ), поворачивающее пространство вокруг его ребра на двойной угол между зеркалами в направлении от первого по ходу лучей зеркала ко второму.

- Любая ЗПС обладает так называемым основным неизменным направлением (ОНН) или точкой, вращение вокруг которых, а также смещение вдоль ОНН инвариантно, т.е. не влияет ни на положение, ни на ориентировку изображения. ОНН или точка являются основными конструкторскими базами ЗПС, вполне определяющими положение зеркальных систем по отношению к другим, функционально связанным с ними схемными оптическими элементами.
- Правильный выбор основной базы – того первичного, естественного и неизменного, что определяет точку отсчета в оценке любых отклонений в функционировании системы.
- Выбор исходного положения оптической системы (системы координатных осей), точки предмета, направления визирной оси, позволяющий без ущерба полноте решения упростить вид аналитических выражений, характеризующих влияние сдвигов или поворотов ЗПС на положение или ориентировку изображения.
- Исключение из анализируемой схемы – с целью ее упрощения – неподвижных зеркал и призм, выполняющих компоновочную функцию, путем изображения тех или иных элементов схемы в прямом или обратном ходе лучей, т.е. путем выпрямления схемы.
- Поворот ЗПС на 180° по отношению к исходному положению, а в тех случаях, когда эквивалентной зеркальной системой (ЭЗС) является одиночное плоское зеркало, параллельное оси вращения, – на 90°, с целью изменения знака анализируемой погрешности или «исключения» ее влияния.
- Применение метода инверсии. Так, например, в лабораторной работе №11 упомянутого выше курса «Юстировка вертикального оптического длиномера» вращение наблюдателя с автоколлимационной трубкой вокруг оси пиноли и неподвижного столика можно мысленно заменить вращением столика относительно оси пиноли при неподвижном расположении автоколлимационной трубки и наблюдателя. В этом случае становится ясным, что наблюдаемое смещение автоколлимационного изображения происходит исключительно от неперпендикулярности столика к оси поворота, что и выявляется таким образом в «чистом» виде и в удвоенном масштабе.
- Методы идеализации и дифференциации. Анализ системы в предположении, что либо все технологические погрешности равны нулю, либо присутствует лишь одна, исследуемая погрешность. В этом случае результат одновременного воздействия на систему всех не зависящих друг от друга погрешностей представляет собой сумму реакций системы на каждое элементарное воздействие (свойство линейности оптической системы).
- При наличии призм с углом отклонения 90° юстировочный поворот вокруг оси падающего пучка лучей можно заменить подобным поворотом вокруг оси отраженного пучка лучей.
- Действие призмы, имеющей такие дефекты изготовления, как фокусность или клиновидность развертки, можно представить как действие идеальной призмы в совокупности с действием слабой линзы (коллектива) или малого клина, главное сечение

которого параллельно или перпендикулярно главному сечению, приклеенных к одной из граней призмы.

С примерами применения многих способов и приемов упрощения задач юстировки ЗПС и нахождения ЭЗС можно ознакомиться в литературе [1–3, 5,6].

Проиллюстрируем на примере применение предлагаемого метода решения задачи. На рис.1 представлена оптико-кинематическая схема наблюдательного прибора, приведенного в учебном пособии [4] и заимствованного из патента ФРГ №3436168. Прибор состоит из объектива 1, неподвижной прямоугольной призмы 2 типа АР-90° и вращающегося блока призм, составленного из призмы 3 типа БР-180° и призмы-ромб 4. Наблюдение за бесконечно удаленным объектом осуществляется с помощью окуляра 6, в фокальной плоскости которого находится сетка 5. Поворотный блок призм применен здесь для вращения изображения в поле зрения прибора. Здесь же [4] сообщается о том, что после сборки этого устройства наблюдался уход изображения наблюдаемого объекта из поля зрения. Требуется разработать научно обоснованную методику юстировки устройства, в результате которой вращение изображения будет происходить вокруг центра С перекрестия сетки 5.

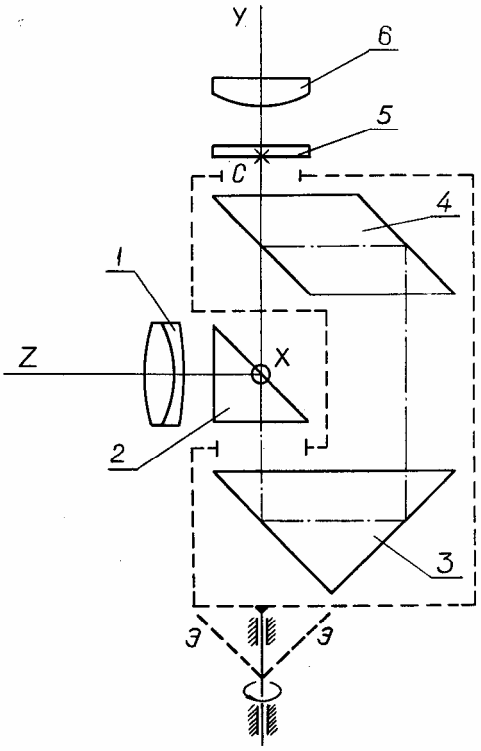


Рис.1. Оптико-кинематическая схема наблюдательного прибора и эквивалентная зеркальная система

Приступим к разработке модели устройства. Основу прибора составляет визир с изломом оптической оси на 90°. Схему визира следует «выпрямить», для чего исключить из рассмотрения неподвижную призму 2, выполняющую функцию компоновки устройства. Таким образом, в схеме остается лишь объектив 1 и перекрестие сетки 5. Напомним, что визирная ось устройства проходит через заднюю узловую точку N’ объектива и центр перекрестия сетки 5. Именно визирную ось следует выбрать в качестве основной базы при юстировке этого устройства. Рассмотрим теперь, что же представляет собой призменная система поворотной части устройства. Сначала исключим из системы призму-ромб, действие которой состоит лишь в сдвиге пространства изображения, необходимом, чтобы окуляр с сеткой оставались в приборе неподвижными (опять же функция компоновки). При-

чем, сдвиг этот не зависит от положения призмы, а определяется лишь ее параметрами. Теперь уже становится очевидным тот факт, что эквивалентом системы, состоящей из призм 3 и 4, является угловое прямоугольное зеркало $Э-Э$ (рис.1), ребро которого для сохранения соосности оси вращения и окуляра должно находиться на оси вращения. Именно за счет поворота призмы 3 происходит вращение плоскости изображения с удвоенной угловой скоростью. С этого момента и возникает решение задачи юстировки, но пока не ясна в этом процессе роль остальных элементов схемы.

Следующему шагу в разработке модели устройства предшествует выбор: поскольку поворотное угловое зеркало $Э-Э$ расположено между неподвижными частями визира – объективом и окуляром с сеткой, следует решить, какую часть визира оставить неподвижной, а какую часть следует изобразить в поворотном угловом зеркале $Э-Э$. Выбрав ранее в качестве основной базы при контроле биения (увода) визирную ось, изображаем на схеме (рис. 2) объектив 1 как неподвижный элемент, а перекрестие сетки $C_0^{''}$ как изображение реального перекрестия C сетки 5 (рис. 1) в эквивалентном угловом зеркале $Э-Э$, расположив на одной прямой все три точки: заднюю узловую точку объектива $N', C_0^{''}$ и вершину ели, выбранной в качестве объекта наблюдения. Дальнейшие построения проводят, добиваясь лишь лучшей наглядности.

На рис.2 положение перекрестия C сетки выбрано произвольно, однако положение следа ребра $P_Э^0$ эквивалентного углового зеркала $Э-Э$ следует зафиксировать точно посредине отрезка $CC_0^{''}$, поскольку действием этого зеркала и является поворот пространства изображения вокруг ребра на угол 180°. В общем случае, до проведения операции юстировки, ребро эквивалентного углового зеркала не пересекает ось вращения, из-за чего и происходит увод визирной оси (рис. 2). После поворота углового зеркала на 180° новое положение следа ребра $P_Э^{180}$ определит новое положение изображения перекрестия сетки $C_{180}^{''}$, а, следовательно, и новое направление оси визирования. Из рис. 2 видно, что изображение объекта может уйти из поля зрения.

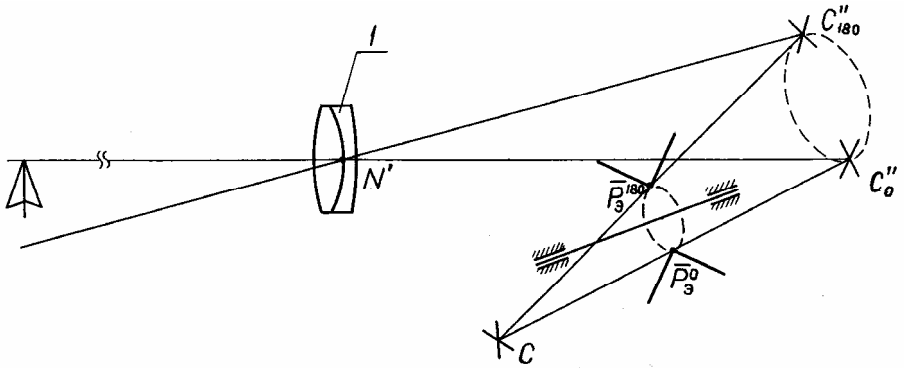


Рис. 2. Математическое моделирование работы оптико-механического устройства при наличии погрешностей его сборки

Для того чтобы устранить увод изображения, необходимо не только обеспечить пересечение с осью вращения ребра углового зеркала, но и добиться его перпендикулярности к этой оси. Теперь становится очевидным, что юстировку системы следует выполнять подвижками исключительно одной призмы 3 – сдвигом ее вдоль оси Z и наклоном вокруг оси, параллельной оси Z. Никакой компенсации эти две составляющие погрешности установки призмы 3 не поддаются, они вызывают отклонение оси визирования во взаимно перпендикулярных плоскостях, а их суммарное действие определяется геометрическим сложением, причем биение происходит синхронно вращению призмы.

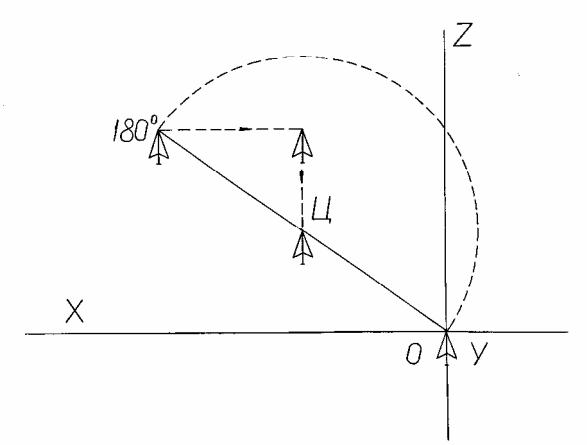


Рис.3. Вид части поля зрения прибора при выполнении юстировочной операции

Таким образом, методика устранения увода изображения заключается в следующем (рис.3).

1. Совмещают с центром перекрестия сетки выбранную точку объекта или перекрестие коллиматора путем разворота и наклона самого наблюдательного прибора или коллиматора.
2. Поворачивают призменный блок на 180° и замечают на сетке новое положение изображения точки объекта. Мысленно отмечают на сетке положение точки $Ц$ – центра дуги, по которой происходит перемещение изображения точки объекта.
3. Наклоном призмы 3 вокруг оси, параллельной оси Z, смещают изображение точки объекта вдоль оси X до координаты точки $Ц$.
4. Сдвигом призмы 3 вдоль оси Z совмещают изображение выбранной точки объекта с точкой $Ц$.
5. Вновь совмещают изображение выбранной точки объекта с центром перекрестия сетки и после поворота блока призм на 180° снова оценивают величину увода изображения. При необходимости повторяют переходы 3 и 4.

С целью достижения необходимой точности юстировки за один цикл можно воспользоваться теодолитом, установив его перед объективом наблюдательного прибора и подсветив сетку 5 со стороны окуляра. В этом случае положение точки $Ц$ можно с высокой точностью зафиксировать с помощью лимбов теодолита.

В заключение следует отметить, что освоение предложенного метода решения задач юстировки поворотных ЗПС придаст уверенность студенту и усилит мотивацию к освоению более сложных перечисленных выше аналитических методов.

Литература

1. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. 2-е изд. Л.; Машиностроение, 1982. 237с.
2. Погарев Г.В., Киселев Н.Г. Оптические юстировочные задачи. Справочник. 2-е изд. Л.; Машиностроение, 1989. 260с.
3. Грейм И.А. Зеркально-призменные системы. М.; Машиностроение, 1981.125с.
4. Кручинина Н.И. Проведение технологического анализа зеркально-призменных устройств с помощью математического моделирования. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1989. 38с.
5. Бурбаев А.М. Разработка и исследование математической модели развертывающего устройства плоскомера. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 5. Оптические приборы, системы и технологии. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 199с.
6. Погарев Г.В., Бурбаев А.М., Кручинина Н.И. Методика нахождения эквивалентов зеркально-призменных систем. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1983.46 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОТОКОЛА ОБМЕНА ДАННЫМИ ПО ОПТИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ STEP-NODIF ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ИНФОРМАЦИОННОМ СОПРОВОЖДЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

М.А Ган, С.А. Ларионов, Я.М. Ган, А.С. Чертков

Рассмотрено использование проекта оптического раздела стандарта ISO 10303 STEP NODIF и AP203 для обмена данными по оптическим системам, конструирования и информационного сопровождения жизненного цикла оптических приборов. Описана программа ИПОС для экспорта данных об оптической системе из САПР-оптика WinDemos в формат STEP по прикладным протоколам NODIF и AP203 и для визуализации оптической системы, включая ход лучей. При экспорте по прикладному протоколу NODIF передается информация о конфигурациях оптических систем, форме, световых ограничениях и положении поверхностей, структурах на поверхности, свойствах оптических сред, лучах и др. AP203 позволяет передавать данные о конструктивных элементах оптической системы и рассчитанные лучи в механические САПР.

В статье рассмотрено использование проекта оптического раздела стандарта ISO 10303 STEP (NODIF), на базе которого обеспечивается непрерывная информационная поддержка полного жизненного цикла оптических систем (ИПИ, CALS-технологии), для обмена данными по оптическим системам.

Проект оптического раздела стандарта ISO 10303 NODIF разработан рабочей группой SC4 комитета ISO TC172/TC184. Он создает основу для применения современных технологий информационного сопровождения при разработке, производстве и эксплуатации оптических систем. Этот стандарт определяет представление конструкции и функциональных требований для оптических элементов и систем в формате данных STEP, который генерируется на стадии проектирования и может быть использован на всех стадиях жизненного цикла оптической системы.

В настоящее время недостаточно только разработать проект изделия и изготовить его. Для использования, обслуживания, утилизации изделия потребителем, потенциально в любой стране мира, необходимо большое количество информации и совместимость по форме представления этой информации. Важно и исключение человеческих ошибок и дублирования информации, отслеживание версий документов и т.п.

Подход, используемый в ИПИ, как следствие единых принципов создания документации, начиная от электронной модели изделия, создаваемой на стадии проектирования, потенциально позволяет бесконфликтно интегрировать в новый проект все необходимые узлы, детали, приборы при наследовании новым проектом всей уже созданной документации и информации для всех входящих компонентов.

Оптический прибор должен быть описан с точки зрения множества дисциплин, таких как расчет оптических систем, конструирование оптических систем, оптические материалы, испытания. Фактически все стадии производства оптических приборов имеют общие аспекты со многими неоптическими продуктами (механическими и т.п.). В то же время производство оптических приборов имеет атрибуты, уникальные для этой области и определяемые или ограничиваемые из оптических соображений.

Стандарт STEP обеспечивает интеграцию данных предметной области, т.е. позволяет создать единую информационную модель этих данных в виде, формализованном на уровне спецификации EXPRESS. Язык информационного моделирования EXPRESS предназначен для описания концептуальных моделей данных. С помощью EXPRESS разрабатывают информационные схемы, лежащие в основе прикладных протоколов. Язык EXPRESS имеет графическое представление, которое называется EXPRESS-G.

Информационная модель может быть описана одной или несколькими взаимосвязанными схемами. При разработке информационных схем используются интегрирован-

ные ресурсы общего применения, множественное наследование данных и ограничений и др. Моделируемые объекты в информационной модели изделия представлены сущностями (ENTITY). Определение сущностей дается через их свойства в соответствующей информационной схеме. Свойства характеризуются путем определения области их значений и определения ограничений, накладываемых на область значений. Определение сущности является шаблоном, с помощью которого создаются экземпляры объектов информационной модели изделия.

Проект оптического раздела стандарта ISO 10303 STEP (NODIF) устанавливает спецификацию прикладного протокола для области оптического приборостроения. Спецификация содержит информационную схему, в рамках которой определяются все необходимые типы данных. Рассмотрим некоторые из них.

Объект system обеспечивает наиболее общее описание оптической системы и содержит только указатели на главные разделы (см. EXPRESS-G диаграмму, рис.1). Этот объект является корневым объектом конфигурации, т.е. объектом самого верхнего уровня модели одной конфигурации изображающего оптического прибора.

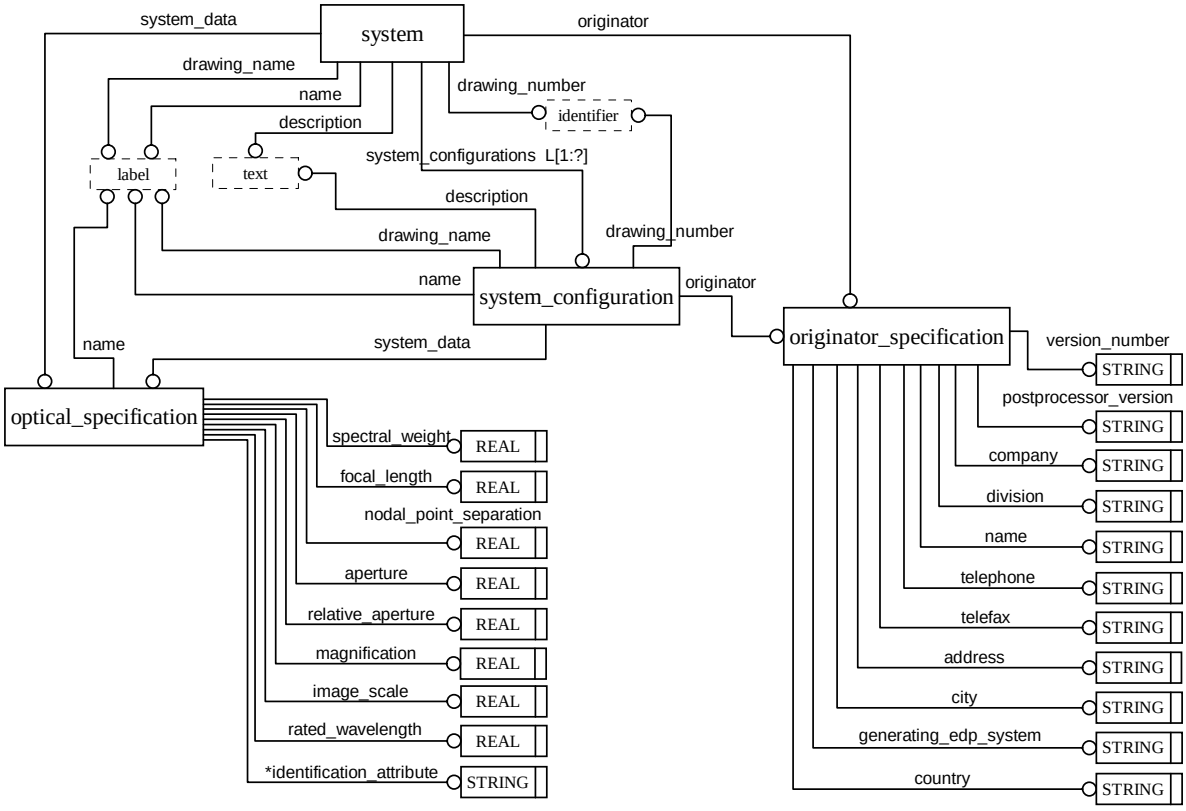


Рис.1. EXPRESS-G диаграмма

Оптическая система состоит из компонентов, содержащих физические поверхности (оптически эффективные и неэффективные) и вспомогательные, виртуальные объекты (специальные плоскости, оси и точки).

Каждая из поверхностей содержит координатную систему, начало которой представлено вершиной компонента или поверхности.

Физическая структура оптической системы в общем случае определяется исходя из взаиморасположения компонентов в 3-х мерном пространстве путем установления соответствующих отношений между их вершинами и ассоциированными системами координат.

Оптическая система может содержать несколько конфигураций (рис. 2), состоящих из оптических компонентов (сборок, деталей), которые, в свою очередь, могут быть разбиты далее на отдельные поверхности и их атрибуты.

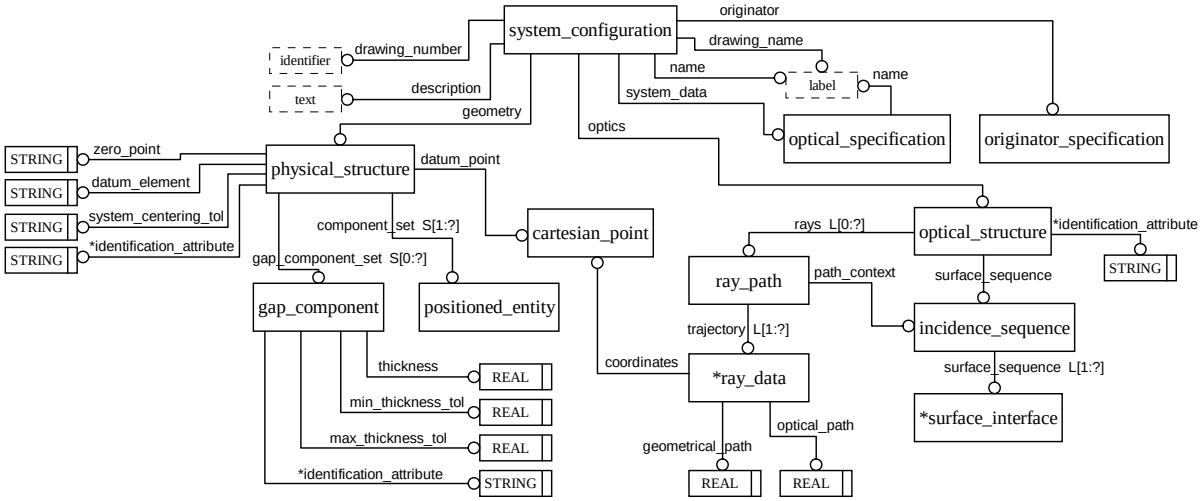


Рис. 2. EXPRESS-G диаграмма: Объект system_configuration

Оптическая часть определения структуры оптической системы определяется с помощью объекта optical_structure, который содержит:

- информацию об оптической структуре системы и ее функциях,
- указатели на описания лучей,
- информацию о пересечениях лучей с поверхностями.

Объект optical_specification содержит наиболее общие сведения об оптической системе.

Объект originator_specification описывает источник или происхождение данных, а также указывает тип и версию системы, создавшей обменный файл.

В проекте стандарта NODIF заимствуются и вводятся информационные объекты для определения состава и конфигурации изделия и административных данных, с целью получения информационной схемы, которая совместима с интегрированными ресурсами общего применения и известными прикладными протоколами, описывающими геометрию и топологию изделия (AP203). Так, заимствуется ряд сущностей из прикладного протокола 203, который имеет развитые средства для моделирования механических изделий и используется практически всеми современными системами автоматизированного проектирования, производства и инженерного анализа.

В соответствии с общепринятым подходом, оптическая сборка в NODIF состоит из отдельных деталей и/или (других) оптических сборок, а деталь определяется как замкнутый объем, который образован оптически эффективными и оптически неэффективными поверхностями. Эти поверхности определяются с помощью соответствующих индивидуальных объектов, сущностей (entities).

Оптические элементы и системы имеют атрибуты, уникальные для этой области техники. Кроме того, оптические системы содержат специальные объекты – плоскость предмета, плоскость изображения, плоскость апертурной диафрагмы, плоскости зрачков, фокальная плоскость, главные плоскости и другие.

Проект стандарта NODIF для определения области оптической поверхности, оптической поверхности, детали и сборки использует ряд сущностей прикладного протокола AP203, в частности, путем наследования с добавлением специфически оптических свойств (рис.3). Например, объект optical_face (область, зона оптической поверхности)

наследует механические свойства, такие как расположение в пространстве, базовая поверхность и граница, от объекта advanced_face (AP203), и определяет оптические свойства – оптические структуры на поверхности (покрытие, переменное оптическое пропускание, голограмма и т.п.).

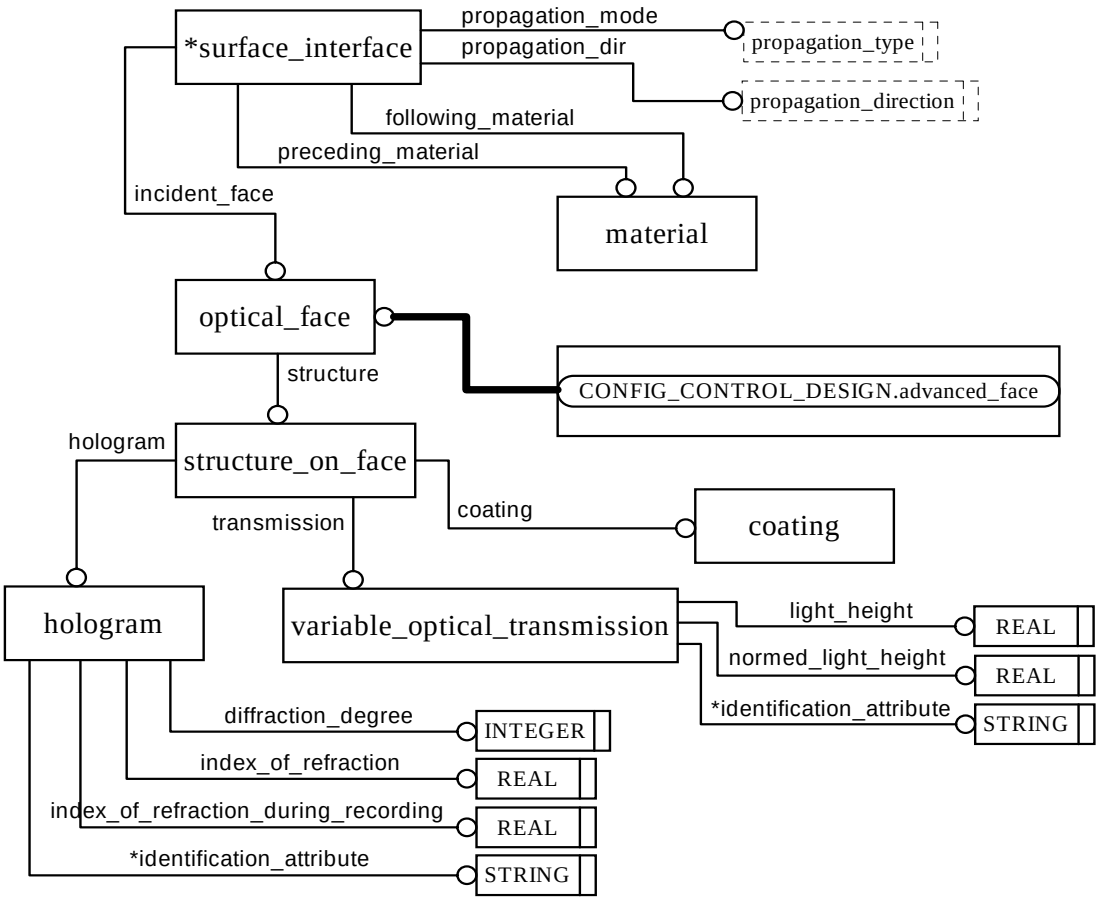


Рис. 3. EXPRESS-G диаграмма: Определение оптических свойств зоны оптической поверхности с помощью объекта optical_face

На рис. 4 показана схема наследования от (абстрактной) сущности surface (поверхность, часть 42 интегрированных ресурсов общего применения) с получением элементарных поверхностей и ряда специальных поверхностей, используемых при проектировании оптических систем.

Промежуточное пространство между компонентами определяется с помощью объекта gap_component (промежуток). Этот объект может описывать воздух, клеевое соединение и среды, отличные от воздуха, такие как вода, иммерсионные среды, вакуум.

Нами разработана реализация оптического прикладного протокола стандарта STEP-NODIF ISO 10303. На основе указанной реализации спецификации STEP-NODIF разработана специализированная программа ИПОС для автоматического обмена информацией между оптическими и механическими САПР в процессе разработки и сопровождения изделий. Программа обеспечивает интеграцию оптических и механических данных, поддерживает формирование компьютерно-ориентированного описания оптического прибора в формате NODIF и осуществляет формирование обменного файла, удовлетворяющего требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 10303-21.

Программа ИПОС реализует экспорт данных оптической системы из системы САПР-оптика WinDemos в формат STEP по прикладным протоколам NODIF и AP203, а также позволяет визуализировать оптическую систему, включая ход лучей. В качестве

исходных данных в представленной программе используются файлы, применяемые в системе автоматизированного проектирования оптики WinDEMOS. Файлы описания конструктивных данных хранятся в текстовом формате, который называется ЯООС – язык описания оптических систем.

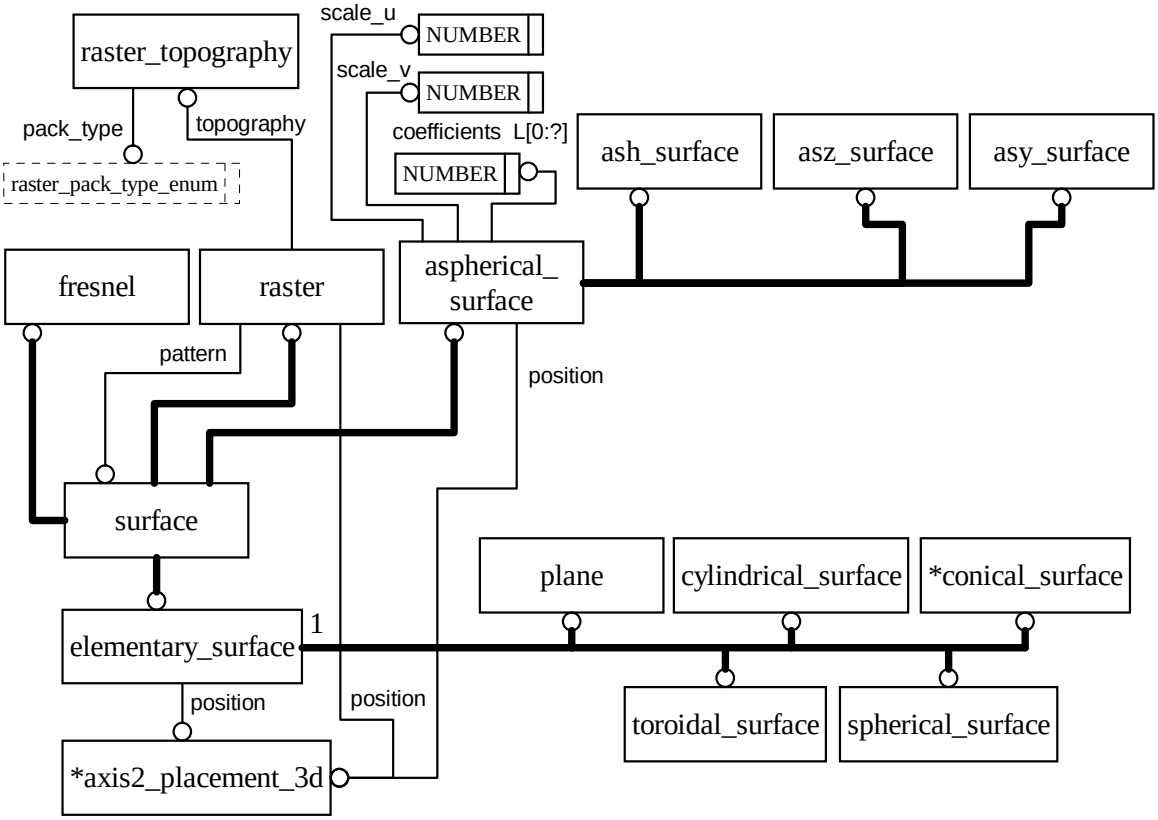


Рис. 4. EXPRESS-G диаграмма: Объект surface. Схема наследования от сущности surface с получением элементарных поверхностей, а также асферических поверхностей, используемых при проектировании оптических систем

Программа реализует вывод информации об оптической системе в формате STEP согласно проекту прикладного протокола NODIF, а также вывод информации о форме и расположении поверхностей по протоколу AP203.

При разработке оптической прибора, после того как система рассчитана и получены все свойства оптических поверхностей и сред, составляющих оптическую систему, необходимо разработать оптические детали, включающие рассчитанные поверхности, и механические детали, такие как корпуса деталей и оправы. Поскольку системы оптического расчета имеют дело преимущественно с оптическими поверхностями, то задачи конструирования оптических приборов в настоящий момент решаются в средствах автоматизированного проектирования механических конструкций. Для успешного взаимодействия этих систем необходим экспорт оптических поверхностей для использования в CAD-системе.

При экспорте по прикладному протоколу AP203 используется только геометрическая модель оптической системы. Из всей информации об оптической поверхности используются только положение, форма и ограничения поверхностей. Полученные модели оптических схем могут быть использованы для конструирования оптических приборов в системах автоматизированного проектирования, таких как AutoCAD, SolidWorks и др.

Кроме поверхностей, программа может экспортировать также еще один важный объект – траектории лучей в оптической системе. Траектории лучей помогают конст-

руктору оптического прибора при проектировании оправ, световых ограничений и других конструктивных элементов.

При экспорте по прикладному протоколу NODIF используется вся информация об оптических системах. Кроме формы, ограничений и положения, записываются структуры на поверхности, свойства оптических сред, окружающих поверхность и др.

Нами были выполнены ряд пилотных проектов, в ходе которых осуществлялись работы по проектированию и изготовлению с применением современных компьютерных технологий коллиматорного кабинного дисплея для истребительной авиации и нашлемного малогабаритного дисплея для боевых вертолетов. При выполнении пилотных проектов была показана высокая эффективность ИПИ технологий, что позволило провести работы в кратчайшие сроки на высоком научно техническом уровне.

6 ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАКТА НА ИЗМЕРИТЕЛЬНУЮ БАЗУ В ВИДЕ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

В.Л. Мусяков, Э.Д. Панков, А.Н. Тимофеев

Настоящая работа проводилась в рамках гранта РФ в области естественных и точных наук РФ Е02-7.0-6, целью которого являлось рассмотрение широкого круга вопросов, связанных с исследованием оптико-электронных систем (ОЭС) с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ) для инженерно-геодезических измерений, ослабляющих или компенсирующих действие атмосферы на основе многоспектральных методов.

При активном развитии техники все большую часть технологических операций занимает проблема пространственного позиционирования относительно протяженной базы, особенно при инженерно-геодезических измерениях в машиностроении [1, 2], контроле строительной планировки поверхности [3], а также при управлении исполнительными органами машин при производстве земляных работ [4]. Использование в качестве протяженной измерительной базы коллимированного лазерного луча достаточно широко исследовано [5], в то время как применение оптической равносигнальной зоны (ОРСЗ), позволяющее обеспечить в приборах высокую точность при большом диапазоне контроля и наличии вибраций и ускорений [6], недостаточно изучено.

Однако в настоящее время существует тенденция ужесточения требований по точности к проведению инженерных геодезических измерений, связанная с повышением точности изготовления строительных и промышленных конструкций, а также точности их монтажа и последующего контроля их состояния. Анализ показывает, что среди источников погрешностей в оптико-электронных системах для инженерных геодезических измерений главную роль играет влияние воздушного тракта, особенно при значительных дистанциях.

В качестве основного источника систематических ошибок при точном оптическом определении углов и расстояний признаны сегодня эффекты рефракции, которые обычно вызываются неоднородной средой распространения для оптического луча. Как показали многочисленные работы российских и зарубежных исследователей, а также исследования, ранее проведенные в СПбГУИТМО [7], наиболее перспективными с точки зрения повышения точности и увеличения дальности действия геодезических приборов являются многоспектральные (многоволновые, дисперсионные) или, как их принято называть, полихроматические методы компенсации влияния атмосферы [8].

Впервые полихроматический (дисперсионный) метод для применения в оптико-электронных дальномерах был предложен М.Т. Прилепиным [9]. Наиболее детальные и глубокие исследования этого метода проведены в работах М.Т. Прилепина и А.Н. Голубева [10]. В основу полихроматического метода положена зависимость показателя преломления воздуха от длины волны зондирующего сигнала, а его техническая реализация сводится к измерению разности оптических путей зондирующих сигналов с различными длинами волн. В литературе обсуждались двух- и трехволновый варианты данного метода.

На данном этапе исследований по теме гранта РФ Е02-7.0-6 предполагалось ограничиться исследованиями по двухволновому варианту.

Трудности в практической реализации полихроматических приборов были связаны с высокими требованиями к точности и с проблемой создания полихроматических источников излучения. Такие устройства стали появляться с развитием технологических возможностей [11, 12].

Основа двухволнового излучателя – двухволновый лазер, генерирующий синий свет удвоением частоты длины волны полупроводникового ИК лазерного диода в кристалле ниобата калия ($KNbO_3$). Такой твердотельный лазер идеально подходит для двухволнового излучателя и позволяет избежать проблемы объединения пучков двух лазеров. Он также дает стабильное коаксиальное одномодовое распространение на обеих длинах волн с достаточной оптической мощностью для области применения [11].

При исследованиях предполагается, что более простым в технической реализации окажется многоспектральный метод с использованием ОРСЗ.

Для светового диапазона зависимость фазового показателя преломления от длины волны может быть получена из теоретических предпосылок, однако количественные соотношения при этом могут быть установлены лишь с малой точностью. Поэтому указанную зависимость предпочитают получать экспериментально, подбирая подходящую функцию и определяя из опыта входящие в неё коэффициенты.

Для воздуха принято эту зависимость представлять в виде, предложенном Коши:

$$n_ф - 1 = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4, \qquad (1)$$

где λ – длина волны излучения; A, B и C – коэффициенты дисперсии излучения для воздуха. Из последней формулы найдем, что

$$\mathrm{d}n_ф/\mathrm{d}\lambda = -2B/\lambda^3 - 4C/\lambda^5,$$

и, имея в виду (1), получим

$$n_ф - 1 = A + 3B/\lambda^2 + 5C/\lambda^4 . \qquad (2)$$

Коэффициенты дисперсии для воздуха определялись до настоящего времени многократно. При геодезических измерениях им придают значения, полученные Сирсом и Барреллем. По определению Сирса и Баррелла эти постоянные для сухого воздуха, содержащего 0,03% углекислого газа, при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст. равны: A = = 2876,04·10^{-7}, B = 16,288·10^{-7}, C = 0,136·10^{-7}. Эти постоянные относятся к длинам волн света в пустоте, выраженным в микрометрах. Поэтому для воздуха при упомянутых выше условиях в соответствии с формулой (2)

$$N \cdot 10^7 = (n_{гр} - 1) \cdot 10^7 = 2876{,}04 + 3 \cdot 16{,}288/\lambda^2 + 5 \cdot 0{,}136/\lambda^4 .$$

Здесь N – индекс преломления воздуха, или преломляемость.

Точность коэффициентов этой формулы такова, что она обеспечивает определение $n_ф$ для видимой части спектра с погрешностью порядка 10^{-7}.

Одним из основных источников погрешностей, сдерживающих возможности повышения точности геодезических измерений, является влияние рефракции световых лучей в атмосфере. При высокоточных измерениях влияние рефракции определяют, исходя из метеорологических параметров атмосферы (температуры, давления и влажности). О.И. Горбенко показал, что при горизонтальных градиентах температуры, равных 0,005 °С/м, поправка за рефракцию на среднюю точку створа длиной 1000 м составляет около 1,2 мм.

На практике во многих случаях для коротких дистанций на горизонтальных трассах градиент температуры можно считать постоянным. Тогда смещение по координате y [6] равно

$$\delta y_p = -[(n-1)/(nT)]\mathrm{grad}_y T \cdot l^2/2,$$

где l – расстояние от выходного зрачка объектива задатчика базового направления (ЗБН) до рассматриваемой точки; $\mathrm{grad}_y T$ – градиент температуры по вертикальной оси OY.

Основными методами ослабления влияния рефракции, исследуемыми в СПбГУ ИТМО в последние годы, являются методы прямых измерений с введением поправки и компенсацией хроматической разности с оптическим и электронным путем.

Метод прямых измерений с введением поправки основан на прямых измерениях деформации ОРСЗ при двух длинах волн.

Известно, что если вдоль линии (рис. 1) направить два луча с длинами волн λ_1 и λ_2, то вследствие рефракции один из лучей придет в точку B_1, а другой луч, вышедший из точки A под некоторым углом δ_1 к линии AB, придет в точку B_2.

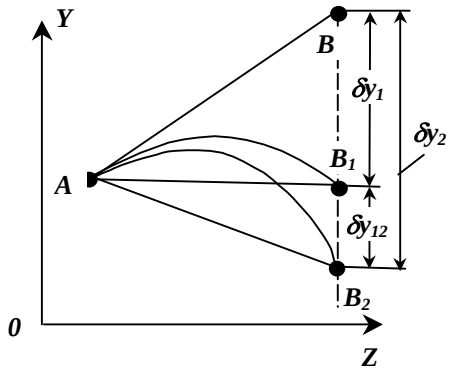


Рис. 1. Схема дисперсионного метода учета рефракции

Пусть индекс рефракции $N = (n - 1)\cdot 10^6$. Согласно работе [4] выражение для индекса рефракции N равно

$$N = 77{,}6\, P/T + 0{,}584\, P/(T\lambda^2),$$

где T – температура среды, К; P – атмосферное давление, мб; λ – длина волны, мкм.

$A = 77{,}6$; $B = 0{,}584$; $C = P / T$.

Тогда:

$$N = AP/T + BP/(\lambda^2 T) = C(A + B\lambda^{-2}).$$

Измерив разность деформации луча δy_{12}, обусловленной рефракцией при работе на длинах волн λ_1 и λ_2, получим (рис. 1):

$$\delta y_{12} = \delta y_1 - \delta y_2 = -[(n_1 - 1)/T]\,\mathrm{grad}_y T\, z_o^2/2 + [(n_2 - 1)/T]\mathrm{grad}_y T\, z_o^2/2,$$

где δy_1, δy_2 – величина деформации луча при работе на длинах волн λ_1 и λ_2; n_1, n_2 – показатели преломления для длин волн λ_1 и λ_2.

С учетом обозначений, приведенных выше, получим

$$N_1 = C(A + B\lambda_1^{-2}), \qquad N_2 = C(A + B\lambda_2^{-2}), \tag{3}$$

$$N_1 - N_2 = C(A + B\lambda_1^{-2}) - C(A + B\lambda_2^{-2}) = BC(\lambda_1^{-2} - \lambda_2^{-2}). \tag{4}$$

Обозначив $Y = (1/T)\,\mathrm{grad}_y T\, z_o^2/2$, на основании выражений (3) и (4) получим

$$\delta y_{12} = BCY\,(\lambda_2^{-2} - \lambda_1^{-2})\cdot 10^{-6},$$

$$\delta y_1 = -(n_1 - 1)Y = -C\,(A + B\lambda_1^{-2})\,Y\cdot 10^{-6},$$

$$\delta y_1 = -(A + B\lambda_1^{-2})\,\delta y_{12} / [B\,(\lambda_2^{-2} - \lambda_1^{-2})].$$

Следовательно, измерив δy_{12} в контролируемой точке, можно определить величину поправки в результаты измерения в этой точке.

Метод минимизации хроматической разности с оптической компенсацией основан на компенсационной схеме измерений [13]. Так, величину δy_{12} можно скомпенсировать, включив в ЗБН компенсатор хроматической разности, например, двухклиновой компенсатор с углами при вершинах вращающихся клиньев σ, обеспечивающий величину смещения ОРСЗ на дистанции z_o:

$$\delta y_1 = 2\sigma\,(n_{c1} - 1) z_o \sin\alpha\,,$$

где n_{c1} – показатель преломления материала клина для длины волны λ_1; α – угол взаимного разворота клиньев. Аналогично, для δy_2

$$\delta y_2 = 2\sigma\,(n_{c2} - 1) z_o \sin\alpha\,,$$

где n_{c1} – показатель преломления материала клина для длины волны λ_2.

Из одновременной компенсации смещений ОРСЗ на обеих длинах волн одним компенсатором вытекает основное условие выбора показателей преломления клиньев

$$(n_1 - 1)/(n_2 - 1) = (n_{c1} - 1)/(n_{c2} - 1)\,. \qquad (5)$$

Таким образом, если подобрать клинья, чтобы выполнялось условие (5), то смещение луча с длиной волны λ_1 и с длиной волны λ_2 будет полностью исключаться для среды с постоянными градиентами температуры по дистанции или ослабляться для реальной среды. Например, для длин волн λ_1 = 0,466 мкм и λ_2 = 1,26 мкм в качестве материала для клиньев можно использовать стекло ЛФ1.

Другой способ построения системы, основанной на методе электронной компенсации хроматической разности смещений пучков ОРСЗ, базируется на специальном алгоритме работы излучателя. На рис. 2 представлена структурная схема измерительного канала, в которой в ЗБН излучение двух пар полупроводниковых излучающих диодов (ПИД) – ИК 2, 18 и синих 4, 16 – с помощью светоделительных кубиков 3 и 17 собирается на зеркальной разделительной призме 19, которая расположена в фокальной плоскости объектива 15.

Объектив 13 приемной части (ПЧ) собирает пришедшее от ЗБН и разделенное по спектру светоделительным кубиком 5 оптическое излучение на фоточувствительных площадках фотоприемных устройств 6 и 12. Электрические сигналы с фотоприемных устройств поступают на синхронные детекторы 7 и 11, куда также поступают опорные сигналы с блока питания ПИД 1.

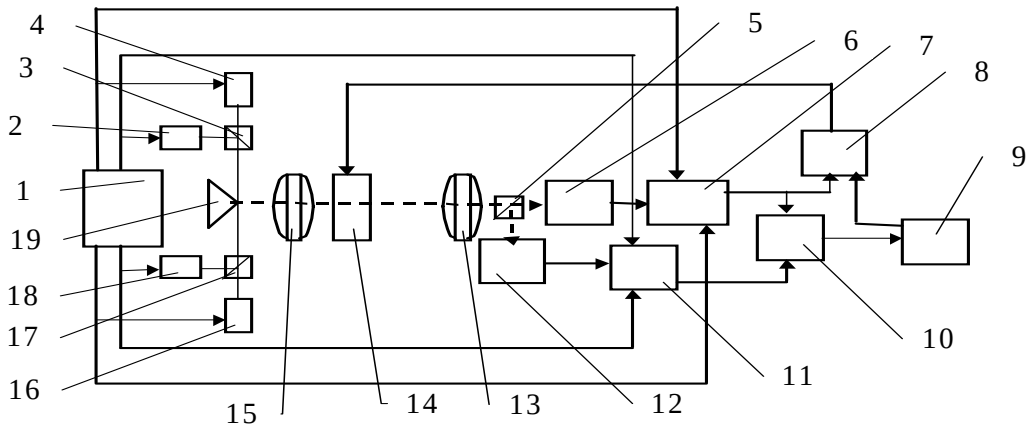


Рис. 2. Структурная схема предлагаемой системы

Суть алгоритма работы источников излучения состоит в том, что для определения величины погрешности, обусловленной рефракцией, используется противофазная модуляция их излучения таким образом, что в первый полупериод включаются одновременно в различных каналах источники с разной длиной волны излучения, а в другой полупериод – наоборот. В следующий период для определения величины смещения

также используется противофазная модуляция, но в каждом канале включаются одновременно оба источника с различными длинами волн.

Благодаря указанной фазовой манипуляции питанием ПИД достигается требуемый алгоритм обработки информационных электрических сигналов, в результате которого на выходе коммутатора-детектора 10 образуется сигнал, который пропорционален величине δy_{12}, и подается на блок индикации и выработки решений 9. Когда эта величина достигает минимального значения, блок 9 вырабатывает команду, которая разрешает блоку измерения 8 с помощью компенсатора 14 замерить величину смещения. Такой цикл измерения существенно увеличивает время измерения, за счет чего и достигается повышение точности измерения.

Временные диаграммы сигналов манипуляции ПИД представлены на рис. 3. Диаграмма I соответствует режиму измерения смещения ПЧ относительно ОРСЗ, а диаграмма II – режиму измерения смещения ОРСЗ, обусловленного рефракцией атмосферы; Φ_Σ – суммарный поток излучения от двух ПИД на ПЧ.

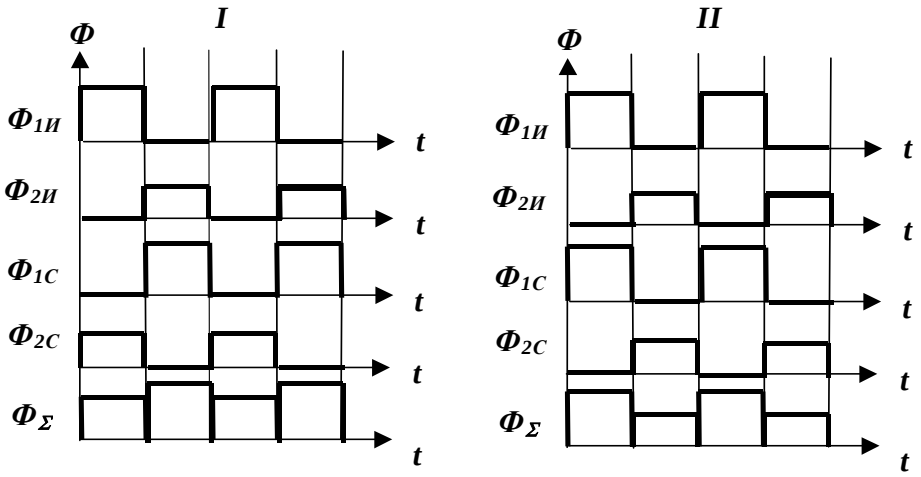


Рис. 3. Временные диаграммы модуляции потока излучения ПИД

Когда осуществляется режим измерения смещения ПЧ, сигналу с фазой 0° ИК ПИД соответствует сигнал с фазой 0° синего ПИД (аналогично для второй пары ПИД), а когда осуществляется режим измерения смещения ОРСЗ, обусловленного влиянием рефракции атмосферы, то сигналу с фазой 0° ИК ПИД соответствует сигнал с фазой 180° синего ПИД, а сигналу с фазой 180° ИК ПИД соответствует сигнал с фазой 0° синего ПИД.

Разность значений смещений пучка лучей в плоскости ПЧ для двух длин волн даст значение смещения пучка лучей, обусловленного рефракцией атмосферы в рассматриваемом спектральном диапазоне.

Ограниченный объем доклада не позволяет подробно отразить все результаты первого этапа работы по гранту. Вкратце они сводятся к следующему.

Многоспектральные методы компенсации влияния воздушного тракта находят все большее применение и развитие с целью повышения точности в геодезических измерениях. В настоящее время область применения этих методов ограничена, в основном, дальнометрией. Из литературных источников известны реализации лишь двухспектральных устройств – как дальномеров, так и геодезических угломерных приборов. В свою очередь, применяемые в угломерных приборах методы для достаточной степени компенсации сложны и требуют исключительно высокой точности измерений информативных параметров атмосферы. Предполагается, что более простым в технической реализации окажется многоспектральный метод с использованием ОРСЗ.

Исследования схемных решений ОЭС с ОРСЗ показали возможность достаточно простой реализации в них многоспектральных методов с применением трех и более длин волн. Использование в ОЭС с ОРСЗ метода хроматической разности с оптической или электронной компенсацией позволит полностью исключить влияние рефракции для среды с постоянными градиентами температуры по дистанции или ослабить ее влияние для реальной среды.

Собран стенд для исследований макета ОЭС с ОРСЗ и проведены предварительные исследования, которые показали, что чувствительности установки достаточно для проведения углубленных исследований физической модели системы с полихроматической ОРСЗ. Дальнейшие исследования предполагается развивать в направлении разработки методики исследований дополнительных возможностей повышения точности инженерных геодезических измерений с использованием оптической равносигнальной зоны при многоспектральном методе с применением трех и более длин волн.

Литература

1. Высокоточные угловые измерения. / Под ред. Ю.Г. Якушенкова М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
2. Афанасьев В.А., Усов В.С. Оптические приборы и методы контроля прямолинейности в инженерной геодезии. М.: Недра, 1973.
3. Сытник В.С. Лазерные геодезические приборы в строительстве. М.: Стройиздат, 1988.
4. Неумывакин Ю.К. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. .М.: Недра, 1984.
5. Зацаринный А.В. Автоматизация высокоточных инженерно-геодезических измерений. М.: Недра, 1976.
6. Джабиев А.Н., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной. Монография. / Под общей редакцией Э.Д. Панкова. СПб: ИТМО, 1998. 238 с.
7. Глазунова Е.Ю. Проблемы влияния атмосферы на прохождение оптического излучения и положение оптической равносигнальной зоны в приборах с ОРСЗ .// Оптико-электронные приборы и системы: Сб. науч. статей. Вып. 99 / Под ред. Э.Д. Панкова. СПб: ИТМО, 1999. С. 14–18.
8. Методы и средства лазерной прецизионной дальнометрии / А.М. Андрусенко и др. М.: Изд. стандартов, 1987. 224 с.
9. Прилепин М.Т. Определение показателя преломления воздуха при измерении расстояний светомодуляционными дальномерами. // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1957. № 2. С. 123–-132.
10. Прилепин М.Т., Голубев А.Н. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. М.: Недра, 1972. 168 с.
11. Böckem B. High-Accuracy Alignment Based on Atmospherical Dispersion // Technological Solutions for the Dual-Wavelength Transmitter. IWAA99, Oct. 18.-21.1999, Grenoble, France.
12. Ingensand H., Böckem B. A High-Accuracy Alignment System Based on the Dispersion Effect. IWAA97, Oct. 13.-17.1997, Argonne, IL.
13. Бугрова В.В., Кирчин Ю.Г., Рождественский А.В., Тимофеев А.Н. Оптико-электронное устройство для измерения линейных смещений. А.с. 1516787. БИ № 39, 1989.

О ПОСТРОЕНИИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Ю.Н. Калиниченко, А.В. Прокофьев, А.Н. Тимофеев

Обосновывается, что многоспектральные методы компенсации влияния воздушного тракта в технической реализации будут более простым в случае систем с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ).

В качестве основного источника систематических ошибок при геодезическом измерении углов и расстояний сегодня признаны эффекты рефракции, которые обычно вызываются неоднородной средой распространения для оптического луча [1]. Как показали многочисленные работы российских и зарубежных исследователей, а также исследования, ранее проведенные в СПбГУИТМО [2], наиболее перспективными с точки зрения повышения точности и увеличения дальности действия геодезических приборов являются многоспектральные (многоволновые, дисперсионные) или, как их принято называть, полихроматические [2] методы компенсации влияния атмосферы [3].

Основными методами ослабления влияния рефракции, исследуемыми в СПбГУИТМО в последние годы, является методы прямых измерений с введением поправки и компенсацией хроматической разности оптическим и электронным путем. Поэтому целью настоящей статьи являлось рассмотреть особенности построения системы контроля смещений (СКС) на основе двуспектральный оптической равносигнальной зоны (ОРСЗ) для инженерно-геодезических измерений, ослабляющих или компенсирующих действие атмосферы.

Суть метода прямых измерений состоит в определении хроматической разности δy_{12} в контролируемой точке, по которой можно определить величину поправки в результаты измерения в этой точке.

$$\delta y_{12} = B \cdot C \cdot Y(\lambda_2^{-2} - \lambda_1^{-2}) \cdot 10^{-6}$$

где B = 0,584; $C = P / T$, P – атмосферное давление, мб, T – температура среды, °К; A = 77,6; $Y = (1/T)\, grad_y T\, z_o^2/2$; $grad_y T$ – градиент температуры по вертикальной оси OY, z_o – расстояние от выходного зрачка объектива прожектора до рассматриваемой точки; .λ_1, λ_2 – длины волн излучателей в прожекторе, мкм.

Метод минимизации хроматической разности с оптической компенсацией основан на компенсационной схеме измерений [3].

Предлагаемый способ построения системы основан на методе электронной компенсации хроматической разности смещений пучков ОРСЗ, который базируется на специальном алгоритме модуляции источников излучения в каналах.

Суть алгоритма модуляции источников излучения состоит в том, что для определения величины погрешности, обусловленной рефракцией, используется противофазная модуляция их излучения таким образом, что в первый полупериод включаются одновременно в различных каналах источники с разной длиной волны излучения, а в другой полупериод – наоборот. В следующий период для определения величины смещения также используется противофазная модуляция, но в каждом канале включаются одновременно оба источника с различными длинами волн.

В разрабатываемой схеме предлагается амплитудно-фазовая манипуляция излучения путем модуляции тока питания полупроводниковых излучающих диодов (ПИД). При этом излучение каждой пары (ПИД) промодулировано в противофазе. Поскольку макет должен обеспечивать как измерение смещения фотоприемника (ФП) относительно ОРСЗ, так и смещение, обусловленное рефракцией атмосферы, то целесообразно разделить эти две функции.

Временные диаграммы сигналов манипуляции ПИД представлены на рис. 1 Диаграмма I соответствует режиму измерения смещения ФП относительно ОРСЗ, а диаграмма II – режиму измерения смещения ОРСЗ, обусловленного рефракцией атмосферы; $Ф_{\Sigma}$ – суммарный поток излучения от двух ПИД на ФП.

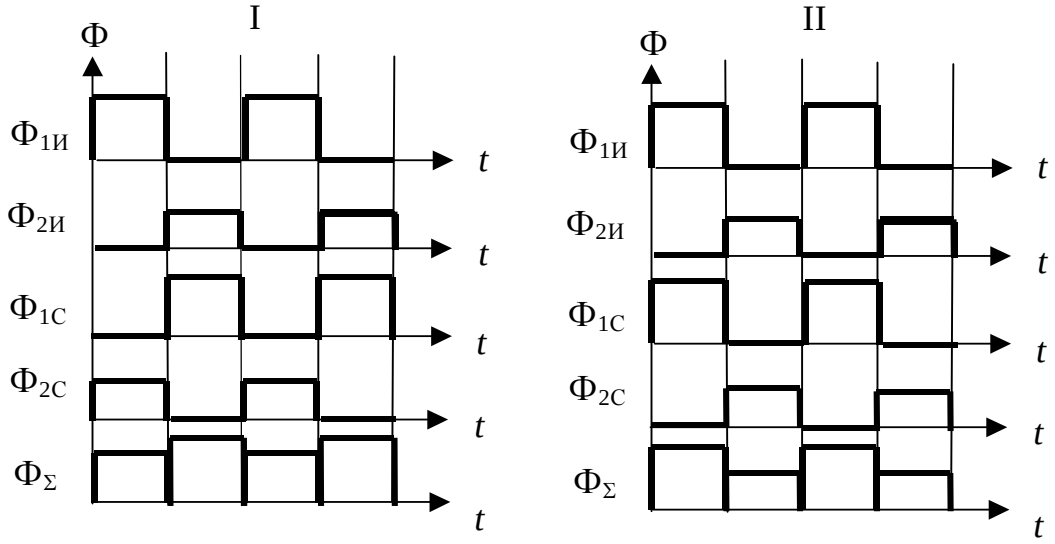


Рис. 1. Временные диаграммы модуляции потока излучения ПИД

Из рис. 1 видно, что в режиме работы I измеряется смещение ОРСЗ, обусловленное рефракцией атмосферы, а в режиме работы II измеряется смещение ФП относительно ОРСЗ. Другими словами, когда осуществляется режим измерения смещения ФП, сигналу с фазой 0° ИК ПИД соответствует сигнал с фазой 0° синего ПИД (аналогично для второй пары ПИД), а когда осуществляется режим измерения смещения ОРСЗ, обусловленного влиянием рефракции атмосферы, то сигналу с фазой 0° ИК ПИД соответствует сигнал с фазой 180° синего ПИД, а сигналу с фазой 180° ИК ПИД соответствует сигнал с фазой 0° синего ПИД.

Для реализации описанного алгоритма предлагается структурная схема измерительного канала (рис. 2), в которой в задатчике базового направления (ЗБП) излучение двух пар полупроводниковых излучающих диодов (ПИД) 2, 18 и 4, 16, имеющих различную длину волны оптического излучения, с помощью светоделительных кубиков 3 и 17 собирается на зеркальной разделительной призме 19, которая расположена в фокальной плоскости объектива 15. Объектив 13 приемной части (ПЧ) собирает пришедшее от ЗБП и разделенное по спектру светоделительным кубиком 5 оптическое излучение на фоточувствительных площадках фотоприемных устройств 6 и 12. Электрические сигналы с фотоприемных устройств поступают на синхронные детекторы 7 и 11, куда также поступают опорные сигналы с блока питания светодиодов 1.

Благодаря фазовой манипуляции питанием светодиодов достигается требуемый алгоритм обработки информационных электрических сигналов, в результате которого на выходе коммутатора-детектора 10 образуется сигнал, пропорциональный величине δy_{12}, и подается на блок индикации и выработки решений 9. Когда эта величина достигает минимального значения, блок 9 вырабатывает команду, которая разрешает блоку измерения 8 с помощью компенсатора 14 замерить величину смещения. Такой цикл измерения существенно увеличивает время измерения, за счет чего и достигается повышение точности измерения. Разность значений смещений пучка лучей в плоскости ФП δy_{12} для двух длин волн даст значение смещения пучка лучей, обусловленного рефракцией атмосферы в рассматриваемом спектральном диапазоне:

Поскольку регистрируемой величиной является переменная составляющая потока излучения, падающего на ФП, рассмотрим распределение потока излучения в плоскости ФП.

При этом полагаем, что излучение и ИК, и синих ПИД промодулировано со сдвигом по фазе на 180°. Потоку излучения ИК ПИД, промодулированному со сдвигом по фазе на 0°, соответствует поток излучения синего ПИД, промодулированный со сдвигом по фазе на 180°, а потоку излучения ИК ПИД, промодулированному со сдвигом по фазе на 180°, соответствует поток излучения синего ПИД, промодулированный со сдвигом по фазе на 0°.

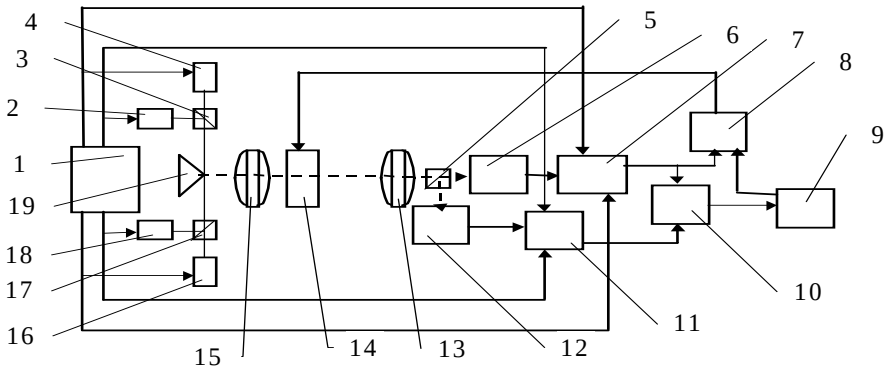


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы

Рассмотрим вначале распределение потока излучения в плоскости фотоприемника от двух ПИД, излучение которых сдвинуто по фазе на π радиан (180^0) друг относительно друга. На рис. 3 изображено распределение потоков излучения в ОРСЗ, создаваемой двумя ПИД в исходном состоянии (смещение отсутствует и $\Phi_1 = \Phi_2$) и при смещении Δ ($\Phi_1 \neq \Phi_2$).

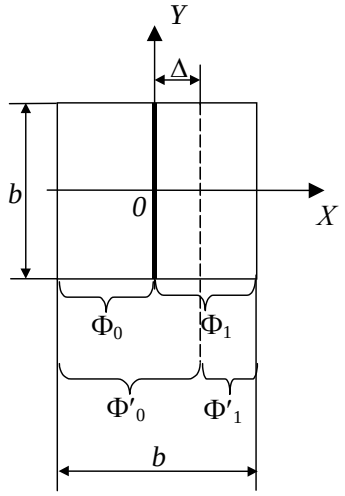


Рис. 3. Распределение потока излучения в плоскости ФП.

Освещенность E, создаваемая плоским источником оптического излучения с яркостью L, диаметром излучающей поверхности d_u, расположенным на расстоянии $-a$ от плоскости входного зрачка объектива прожектора диаметром D, при проектировании объекта прожектором в плоскость фоточувствительной площадки ФП, находящейся на расстоянии l:, равна

$$E = \tau_o \cdot \tau_{cp} \cdot L \cdot \pi \left(\frac{4a^2 + d_u^2}{4a^2 + D^2} \right) \cdot \left(\frac{D^2}{4l^2 + D^2} \right),$$

где τ_o и τ_{cp} – коэффициент пропускания оптического излучения объективом прожектора и средой атмосферой.

В нашем случае ОРСЗ создается двумя светящимися полуплоскостями, яркость одной из полуплоскостей сдвинута по фазе на 180° относительно другой. Полагаем, что энергетическая яркость $L_{1И}$ первого из двух ИК ПИД при фазной манипуляции является функцией времени, например [4],

$$L_{1И} = L_{01И} + L'_{1И}\sin(\omega t + 0)$$

где $L_{01И}$ – постоянная составляющая яркости первого ИК ПИД; $L'_{1И}$ – амплитуда модуляции яркости первого ИК ПИД (в реальных оптических системах невозможно получить увеличение яркости, а потому $L'_{1И} < L_{01И}$); ω – угловая частота модуляции излучения; t – время. Соответственно, для второго ИК ПИД энергетическая яркость запишется в следующем виде:

$$L_{2И} = L_{02И} + L'_{2И}\sin(\omega t + \pi)$$

Для первого синего ПИД:

$$L_{1C} = L_{01C} + L'_{1C}\sin(\omega t + \pi)$$

а для второго

$$L_{2C} = L_{02C} + L'_{2C}\sin(\omega t + 0).$$

Потоки излучения для двух ИК ПИД, попадающие на фоточувствительную площадку ФП размером b x b мм, при отсутствии смещения ФП с ОРСЗ составят

$$\Phi_{1И} = (b^2/2)Q[L_{01И} + L'_{1И}\sin(\omega t + 0)] = \Phi_{01И} + \Phi'_{1И}\sin(\omega t + 0),$$

$$\Phi_{2И} = (b^2/2)Q[L_{02И} + L'_{2И}\sin(\omega t + \pi)] = \Phi_{02И} + \Phi'_{2И}\sin(\omega t + \pi),$$

где

$$Q = \tau_o \cdot \tau_{cp} \cdot \pi\left(\frac{4a^2 + d_u^2}{4a^2 + D^2}\right)\cdot\left(\frac{D^2}{4l^2 + D^2}\right)$$

Аналогично можно написать выражения для потоков излучения двух синих ПИД:

$$\Phi_{1C} = (b^2/2)Q[L_{01C} + L'_{1C}\sin(\omega t + \pi)] = \Phi_{01C} + \Phi'_{1C}\sin(\omega t + \pi), \text{ и}$$

$$\Phi_{2C} = (b^2/2)Q[L_{02C} + L'_{2C}\sin(\omega t + 0)] = \Phi_{02C} + \Phi'_{2C}\sin(\omega t + 0).$$

При наличии смещения Δ на фоточувствительной площадке ФП потоки излучения для двух ИК ПИД составят

$$\Phi'_{1И} = [(b^2/2) + b\cdot\Delta]Q[L_{01И} + L'_{1И}\sin(\omega t + 0)],$$

$$\Phi'_{2И} = [(b^2/2) - b\cdot\Delta]Q[L_{02И} + L'_{2И}\sin(\omega t + \pi)];$$

складывая эти два потока излучения, получим:

$$\Phi'_{1И} + \Phi'_{2И} = (b^2/2)Q(L_{01И} + L_{02И}) + b\cdot\Delta\cdot Q(L_{01И} - L_{02И}) +$$

$$+ (b^2/2)Q[L'_{1И}\sin(\omega t + 0) + L'_{2И}\sin(\omega t + \pi)] + b\cdot\Delta\cdot Q[L'_{1И}\sin(\omega t + 0) - L'_{2И}\sin(\omega t + \pi)]$$

Аналогично можно написать выражения для потоков излучения двух синих ПИД:

$$\Phi'_{1C} = [(b^2/2) + b\cdot\Delta]Q[L_{01C} + L'_{1C}\sin(\omega t + \pi)],$$

$$\Phi'_{2C} = [(b^2/2) - b\cdot\Delta]Q[L_{02C} + L'_{2C}\sin(\omega t + 0)];$$

складывая эти два потока излучения, получим:

$$\Phi'_{1C} + \Phi'_{2C} = (b^2/2)Q(L_{01C} + L_{02C}) + b\cdot\Delta\cdot Q(L_{01C} - L_{02C}) +$$

$$+ (b^2/2)Q[L'_{1C}\sin(\omega t + \pi) + L'_{2C}\sin(\omega t + 0)] + b\cdot\Delta\cdot Q[L'_{1C}\sin(\omega t + \pi) - L'_{2C}\sin(\omega t + 0)]$$

.

Считаем, что $L_{01И} = L_{02И}$, $L'_{1И} = L'_{2И}$, $L_{01C} = L_{02C}$, $L'_{1C} = L'_{2C}$,, что необходимо для устранения влияния разбалансировки каналов. Запишем выражения распределения облученности в плоскости ФП, учитывая при этом, что ОРСЗ, образованная двумя соприкасающимися полями излучения ИК ПИД сместится на величину $\delta h^{ИК}_p$, а ОРСЗ, образованная двумя соприкасающимися полями излучения синих ПИД сместится на величину δh^{C}_p. Тогда

$$\Phi'_И = \Phi'_{1И} + \Phi'_{2И} = b^2 \cdot QL_{01И} + 2b \cdot \delta h_p^{ИК} \cdot Q \cdot L'_{1И} \sin(\omega t).$$

$$\Phi'_C = \Phi'_{1C} + \Phi'_{2C} = b^2 \cdot QL_{01C} - 2b \cdot \delta h_p^{C} \cdot Q \cdot L'_{1C} \sin(\omega t).$$

$$\Phi'_И + \Phi'_C = 2b^2 \cdot QL_{01И} + 2b \cdot z_0 (n_{ИК} - n_C) tg\sigma_p \cdot Q \cdot L'_{1И} \sin(\omega t).$$

Поскольку при амплитудно-фазовом детектировании выделяется только переменная составляющая сигнала, то сигнал, снимаемый с ФП будет пропорционален величине смещения, обусловленного рефракцией атмосферы. Для первого синего ПИД при работе в режиме измерения смещений яркость равна

$$L_{1C} = L_{01C} + L'_{1C} \sin(\omega t + 0),$$

а для второго –

$$L_{2C} = L_{02C} + L'_{2C} \sin(\omega t + \pi).$$

Тогда при работе макета в режиме измерения смещений предыдущие формулы примут следующий вид:

$$\Phi'_И = \Phi'_{1И} + \Phi'_{2И} = b^2 \cdot QL_{01И} + 2b \cdot \delta h_p^{ИК} \cdot Q \cdot L'_{1И} \sin(\omega t),$$

$$\Phi'_C = \Phi'_{1C} + \Phi'_{2C} = b^2 \cdot QL_{01C} + 2b \cdot \delta h_p^{C} \cdot Q \cdot L'_{1C} \sin(\omega t),$$

$$\Phi'_И + \Phi'_C = 2b^2 \cdot QL_{01И} + 2b \cdot z_0 (n_{ИК} + n_C) tg\sigma_p \cdot Q \cdot L'_{1И} \sin(\omega t).$$

Таким образом, сигнал, снимаемый с ФП и пропорциональный величине смещения, обусловленного рефракцией атмосферы, можно в дальнейшем использовать для компенсации влияния атмосферы электронным путем.

Использование в ОЭС с ОРСЗ метода хроматической разности с оптической или электронной компенсацией позволит полностью исключить влияние рефракции для среды с постоянными градиентами температуры по дистанции или ослабить ее влияние для реальной среды. Дальнейшие исследования предполагается развивать в направлении разработки методики исследований дополнительных возможностей повышения точности инженерных геодезических измерений с использованием оптической равносигнальной зоны при многоспектральном методе с применением трех и более длин волн.

Литература

1. Неумывакин Ю.К. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. М.: Недра, 1984.
2. Отчет о НИР "Повышение точности инженерных геодезических измерений с использованием оптической равносигнальной зоны" (итоговый), по гранту 97-27-1.6-10 "Исследование возможностей повышения точности инженерных геодезических измерений с использованием оптической равносигнальной зоны". СПб.: ИТМО, 2000.
3. Методы и средства лазерной прецизионной дальнометрии / А.М. Андрусенко и др. М.: Изд. стандартов, 1987. 224 с.
4. Джабиев А.Н., Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной. Монография. / Под общей редакцией Э.Д. Панкова. СПб: ИТМО, 1998. 238 с.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ

В.В. Коротаев, А.Н. Чиванов

Оптико-электронные системы формирования, обработки и визуализации инфракрасных изображений находят все более широкое применение в самых различных областях науки и техники [1, 2]. Их можно разделить на системы тепловидения, использующие фотоэлектрические полупроводниковые приемники (ФЭПП) [3], и приборы ночного видения, в которых используются электровакуумные фотоэлектронные приемники, например, электронно-оптические преобразователи или передающие телевизионные трубки [4, 5]. В настоящей статье будем рассматривать системы тепловидения с многоэлементными ФЭПП, называя их для краткости тепловизионными приборами (ТВП).

Зарубежная тепловизионная техника развивается, в основном, по государственным программам унификации и стандартизации. Первая такая программа была реализована в США (программа Common Module) [6]. Толчком к развитию техники тепловидения послужила концепция НАТО, обратившая внимание на необходимость создания пассивных средств наблюдения и прицеливания, действующих в условиях плохой видимости днем и ночью, с целью достижения тактического превосходства над вероятным противником. Это в значительной степени может быть осуществлено способом наблюдения, основанным на регистрации теплового контраста между целью и фоном. В отличие от метода ночного наблюдения целей, основанного на использовании электронно-оптических приборов, обеспечивающих видимость за счет усиления слабого рассеянного света небесного свода и звезд, тепловидение не зависит от уровня естественной ночной освещенности и позволяет обнаруживать и наблюдать цели в любое время суток в ухудшенных условиях видимости.

В 1972 г. фирма Texas Instruments (TI) провела анализ причин высокой стоимости производства тепловизионной аппаратуры, в результате чего было установлено, что главной причиной является многообразие конструкций. Каждый правительственный заказ инфракрасных (ИК) систем производился изолированно, и большинство узлов каждой из систем, предназначенных во многих отношениях для аналогичных применений, конструировался всякий раз заново.

Высокая стоимость разработок не сдерживала рост их многообразия, что не давало возможности воспользоваться преимуществами серийного производства как в отношении стоимости единицы продукции, так и в отношении использования прогрессивной технологии изготовления и исследования надежности. Также было установлено, что для широкого круга применений лишь отдельные элементы ТВП определяют соответствие аппаратуры особым требованиям для конкретных применений, а именно: входная оптическая система (ОС) и способ воспроизведения изображения, интерфейс между прибором и человеком. Другими словами, изготовление модульных ТВП с достаточным числом общих модулей для большинства систем различных назначений позволило бы сберечь значительные средства.

Система общих модулей представляет собой ряд функциональных блоков, которые могут соединяться таким образом, чтобы удовлетворять любым требованиям с минимальной доработкой. Каждый модульный блок должен быть определен формой, присоединительными размерами, внутренним устройством и функцией.

В 1972 г. фирма TI получила такие эффективные характеристики модульной системы, что модульный принцип был положен в основу разработки тепловизионных схем, как конкурентно-способный.

Успех модульной концепции состоит в резком снижении затрат на исследования и разработку систем ТВП. По данным TI, это снижение составляет 1:10.

В 1976 г. был совершен решающий скачок в области разработки модульных блоков, когда ТВП на модульных блоках были подвергнуты сравнительным испытаниям с ТВП обычной конструкции. Результаты испытаний показали, что ТВП на модулях обладают существенным превосходством по сравнению с другими ТВП аналогичного назначения. В 1977–78 гг. на испытаниях ТВП было зарегистрировано два отказа на 6000 часов наработки.

Суть технических решений, принятых при создании ТВП, заключалась в использовании «длинных чересстрочных» линейных приемников оптического излучения (ПОИ). Разделение линейных ПОИ на «длинные», «средние» и «короткие» определяется количеством фоточувствительных элементов (ФЧЭ) в ПОИ и зависит от параметра k, который представляет собой число сканов (число заходов), необходимых для формирования растра, и составляет:

- для «длинных» $k = 1$;
- для «средних» $1 < k < 12–15$;
- для «коротких» $k > 12–15$.

Для решения широкого спектра фоноцелевых задач были созданы три типоразмера ТВП [5], основные параметры которых приведены в табл. 1.

Число ФЧЭ	Формат	Размер ФЧЭ, мкм	Порог чувствительности, К	Назначение
180	360 × 720	50×50	0,1К	Тяжелые носители
120	240 × 480			Легкие носители
60	120 × 240			Портативные

Таблица 1. Основные параметры ТВП

Первичное поле зрения формируется сканирующей системой, а необходимые для решения конкретной фоноцелевой задачи поле зрения, угловое разрешение и диаметр входного зрачка формируются телескопической насадкой (ТН) с заданным увеличением.

В начале 80-х годов была проведена в жизнь программа унификации и стандартизации тепловизионной техники в интересах вооруженных сил Франции (SMT) [6]. В основу программы была положена идея построения ТВП на базе унифицированных модулей. Модульная система состоит из семи общих модулей:

- сканирующий двухкоординатный модуль;
- модуль фотоприемного устройства (ФПУ) с «короткими» линейными ПОИ;
- модуль предварительного усилителя;
- модуль обработки сигналов;
- криогенный модуль;
- модуль дисплея;
- контрольно-поверочный модуль.

Поле зрения, формируемое сканирующим модулем вместе с модулем ФПУ, составляет примерно 54°. Необходимое рабочее поле формируется дополнительной ТН с заданным увеличением.

Программа TICM министерства обороны Англии была начата в 1976 г. с целью создания опытных образцов ТВП [6]. Модули были разделены на три класса с сохранением, где это было можно, общности компонентов между классами. Все три типа сканирующих устройства основаны на двухкоординатных сканирующих механизмах, которые можно перепрограммировать на изменение формата изображения или приспособить к различной длине «коротких» линейных ПОИ. Принятие на вооружение унифицированных модульных ТВП существенно снизило стоимость приборов, упростило материально-техническое обслуживание и ремонт. Кроме того, накопленный опыт ис-

пользования стандартных компонентов дал возможность разрабатывать новые ТВП в более короткие сроки и по более низкой стоимости.

К настоящему времени все модули и приборы на их основе в США, Франции и Англии претерпели ряд модернизаций для существенного повышения характеристик. Однако радикальный подъем уровня характеристик ТВП произошел за последние несколько лет с завершением программы SYNERGY. Технической особенностью программы является создание полноформатного ТВП: 576×768 элементов (приборов такого уровня не было ни в одной из предыдущих программ), а организационной – тот факт, что программа является результатом сотрудничества между фирмами Англии, Франции и Германии. Характеристики ТВП базируются на новом «сверхдлинном» линейном ПОИ форматом Мк×Мс = 288×4 элементов. Важной характеристикой нового ТВП является его масса (масса общих модулей около 10 кг) и возможность изменения конфигурации прибора. Эти показатели позволяют использовать прибор для размещения на различных носителях: танках, вертолетах, перископах подводных лодок и т.п.

Рассуждая о схемотехнических решениях отечественных приборов, следует отметить, прежде всего, организационную сторону создания ТВП. Подавляющая часть разработок проводилась на головных предприятиях страны для решения конкретных задач в интересах различных групп потребителей. Отсутствие единой технической политики (и самого органа, проводящего разработку этой политики в жизнь) способствовало независимому (региональному) развитию тепловизионной техники на каждом предприятии страны. Сложная, наукоемкая тепловизионная техника создавалась, в основном, на промышленных предприятиях (заводах), и практически единственным способом разработки новых приборов являлось копирование схем зарубежных образцов. Были воспроизведены в том или ином виде практически все схемные решения западных образцов ТВП, начиная с конца 70-х годов. По мере совершенствования зарубежной технологии и элементной базы (особенно в области электроники) воспроизводить зарубежные образцы становится все сложнее и бессмысленнее. В настоящее время практически все разработки, выполненные до 1990 г., потеряли свою актуальность и морально устарели, а повторить программу SYNERGY в ближайшие годы без использования импортной элементной базы для отечественной промышленности невозможно.

Параллельно с конкретными разработками, проводимыми на предприятиях оптико-механической промышленности, проводились работы по унификации и стандартизации ТВП. В одной из последних работ была разработана концепция создания унифицированных тепловизионных модулей трех типоразмеров, основные параметры которых приведены в таблице 2.

Число ФЧЭ	Формат	Размер ФЧЭ, мкм	Порог чувствительности, К	Назначение
96	384×512	35×35	0.1	Тяжелые носители
64	256×384			Легкие носители
32	192×256			Портативные

Таблица 2. Параметры унифицированных модулей

Топология ПОИ – «шахматный» линейный ПОИ «средней» длины – была выбрана, исходя из следующих соображений:

- технология «длинных» линейных ПОИ в нашей стране в настоящее время несовершенна (максимальный практически достигнутый размер – 128 ФЧЭ);

- первичная обработка сигналов «средних» линейных ПОИ легко реализуется с помощью частично отечественной, частично импортной электроники;

- для обеспечения развертки разработаны эффективные развертывающие устройства (РУ).

В 1992 г. работа получила продолжение с целью разработки программы создания унифицированных тепловизионных модулей и приборов на новом, более высоком уровне. Основной задачей программы была организация промышленного производства ТВП через унификацию и стандартизацию ТВП и его основных функциональных узлов – общих модулей. Было признано, что унификация и стандартизация – единственное и радикальное средство снижения стоимости ТВП, повышения их качества и надежности. В рамках программы были выполнены следующие работы:

- разработана базовая структурная схема ТВП;
- определено деление ТВП на общие и дополнительные модули;
- определены характеристики общих и дополнительных модулей;
- определены характеристики ТВП, построенные на модулях;
- разработаны конструкции модулей;
- разработана методика стыковки модулей с целью формирования ТВП;
- разработаны общие технические требования к тепловизионным модулям (ОТТ).

Технологическая структура создания ТВП предусматривает следующие уровни.

Первый уровень - материалы, элементы и технологии, доступные во время разработки.

Второй уровень - создание унифицированных функциональных узлов - тепловизионных модулей.

Третий уровень - создание тепловизионных каналов на базе унифицированных модулей.

Четвертый уровень - создание тепловизионных комплексов различного назначения на базе унифицированного тепловизионного канала.

На базе существующих в стране материалов, элементов и технологий разрабатываются специфические тепловизионные функциональные узлы – модули, каждый из которых определен функцией, системой параметров и присоединительными элементами; исходя из функции, были определены две группы модулей: общие и дополнительные модули. Общие модули обеспечивают основные параметры ТВП: формат, частоту кадров, чувствительность и т.п. Совокупность общих модулей формирует тепловизионную камеру.

Разработка тепловизионной камеры проводилась по четырем классам – типоразмерам [7]. Основной классификационный признак тепловизионной камеры – формат растра:

1-й класс.....576×768 элементов;

2-й класс.....384×512 элементов;

3-й класс.....256×384 элементов;

4-й класс.....192×256 элементов.

Дополнительные модули предназначены для адаптации тепловизионной камеры к фоноцелевой обстановке (ТН) и к носителю (блок питания, пульт управления, блок обработки изображения). Совокупность общих и дополнительных модулей формируют тепловизионный канал. При построении тепловизионного комплекса выбирается тепловизионная камера нужного класса с учетом того, что, чем больше формат камеры, тем больше масса, габариты и энергопотребление, но одновременно и больше дальность действия по заданной цели. С помощью дополнительных модулей обеспечиваются необходимые поле зрения, дальность действия, привязка к бортовому блоку питания, связь с бортовыми информационными системами. Важной частью работы включения тепловизионного канала в комплекс является создание системы гиростабилизации, так как эта система, являясь частью комплекса, может предъявлять одновременно специфические требования к тепловизионному каналу (к входной ОС).

Таким образом, важнейшими тенденциями разработки современных ТВП являются унификация и стандартизация на основе модульного принципа построения. При этом общие модули обеспечивают основные параметры и характеристики ТВП, а дополнительные служат для адаптации к объектам наблюдения и месту расположения ТВП.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Тенденции развития тепловизионных систем второго и третьего поколений и некоторые особенности их моделирования // "Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений". Сборник статей под ред. В.В. Тарасова и Ю.Г. Якушенкова. Вып. 1. М., 2000, с.3-18.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы "смотрящего" типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: / Пер. с английского под ред. А.И. Горячева. М.: Мир, 1978.
4. Изнар А.Н. Электронно-оптические приборы. М.: Машиностроение, 1977.
5. The Infrared and Electro-Optical System Handbook (Ed. by J.S.Accetta, D.L.Shumaker-Bellingham), 1993.
6. Моделирование ночного видения: исторические перспективы. James A. Ratches U.S. Army Communications-Electronics Command Research, Development& Engineering Center Night Vision & Electronic Sensors Directorate Ft. Belvoir, VA 22060-5806 Конференция по инфракрасной технике: Проект, Анализы, Моделирование и Испытание, Орландо, Флорида, Апрель 1999г. SPIE Vol. 3701 0277-786X/99.
7. Дегтярев Е.В., Рудый И.В. Анализ эффективности перспективных тепловизионных приборов различных классов и выбор схем их построения / "Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений". Сборник статей под ред. В.В. Тарасова и Ю.Г. Якушенкова. Вып. 1. М., 2000. С.19-33.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИЗОРОВ

А.Н. Чиванов

В данной работе рассматриваются вопросы повышения технических характеристик тепловизоров за счет анализа изменения относительного расположения фоточувствительных элементов (ФЧЭ) различной топологии в приемниках оптического излучения (ПОИ) и оптико-механической сканирующей системе (ОМСС).

В настоящее время за рубежом наиболее распространены тепловизионные приборы (ТВП), разработка которых проводилась по национальным программам в период 1970–1985 гг. [1]: Common Module (США) – 1972 г.; SMT (Франция) – 1982 г.; TICM-1, TICM-2 (Англия) – 1982 г. Схемотехнические принципы, положенные в основу каждой из программ, определялись достигнутым технологическим уровнем той или иной страны, что определило в дальнейшем два основных направления развития тепловизионной техники.

Первое направление привело к тому, что с начала 90-х годов за рубежом начались разработки ТВП на «сверхдлинных» линейных ПОИ [2]. Спецификой этих разработок являются: простая оптическая система (ОС); ПОИ с числом ФЧЭ около 1000 и более; интегрированная с ПОИ первичная обработка сигнала, находящаяся в охлаждаемой зоне криостата. Эти решения делают ТВП более «электронным», чем традиционные «оптические», до сих пор разрабатываемые в России, о которых будет сказано ниже. Разработка подобных ТВП по силам только специализированным предприятиям электронной техники.

В конце 80-х – начале 90-х годов для армии США началась разработка ТВП второго поколения, разрешающая способность которых должна быть повышена на 50–60%. Достигается это за счет ПОИ на основе CdHgTe, содержащих 4×480 ФЧЭ. Новые ТВП предназначены, прежде всего, для авиации и противоракетной обороны [1]: комплекс MUSTERS для обнаружения пусков баллистических ракет; комплекс EOSS для оснащения новых вертолетов РАН-66 «Команч»; комплекс Falcon Knight, заменяющий наиболее эффективный в настоящее время в мире прицельно-навигационный комплекс LANTIRN.

Подобные работы проводятся и в Европе. Франция, Англия и Германия совместно выполняют программу создания нового поколения ТВП SYNERGI. Система строится на ПОИ формата 2×288 ФЧЭ. Основная задача проекта – разработка комплекта тепловизионных модулей, которые будут использоваться в качестве строительного материала для создания ТВП различной конфигурации, позволяющих размещать их на различных объектах [3, 4]. Проект рассчитан на использование его результатов в течение следующих 15–20 лет. Информация о создании первых реализаций программы – вертолетных комплексов Condor-1 и Condor-2 – появилась в России в начале 1991 г.

Ко второму направлению развития тепловизионной техники можно отнести все разработки сканирующих ТВП, проводившиеся за рубежом (а также в России), для которых характерны: сложная эффективная ОС (сканирующая система); сравнительно малоэлементный ПОИ (60, 120 и 180 ФЧЭ в ТВП США; 44, 96 и 128 ФЧЭ в ТВП Франции – сканирующие матрицы; ПОИ типа SPRITE, содержащий 4 или 8 ФЧЭ, в ТВП Англии). ТВП с такими признаками («оптические» ТВП) достаточно просто изготавливаются на предприятиях, специализирующихся на создании оптико-механических приборов, так как именно здесь легко реализуются сложные ОС и имеется возможность создания простой электронной схемы обработки видеосигнала для малоэлементного ПОИ. Характерными особенностями такого ТВП являются развертывающее устройство (РУ), обеспечивающее зонное сканирование, и ПОИ, выполненный в виде малоформат-

ной матрицы, работающей в режиме сканирования, с последующим цифровым преобразованием сигналов к телевизионному стандарту.

Унифицированные ТВП подвергались в дальнейшем неоднократной модернизации. В США (первое направление) были проведены, по крайней мере, две серьезные модернизации, направленные на повышение качественных характеристик ТВП. Во Франции (второе направление) по мере совершенствования ПОИ проводились работы по снижению числа ФЧЭ при сохранении заданных характеристик ТВП (такие приборы, как «Castor», «Athos» и др., где вместо первоначальных 55 ФЧЭ используют 44), что, безусловно, является большим достижением промышленного производства [1]. Важным является тот факт, что, несмотря на массированную рекламу ТВП с матричными ПОИ со стороны зарубежных фирм (а также и ряда российских организаций), тем не менее, планируется оснащение армий зарубежных стран сканирующими приборами [5].

Таким образом, в современных зарубежных разработках наблюдается три направления создания сканирующих ТВП на базе фотоэлектрических ПОИ: на ПОИ типа SPRITE (1–8 ФЧЭ), на малоэлементных ПОИ (16–128 ФЧЭ) и на многоэлементных ПОИ (более 1000 ФЧЭ).

Проведенные габаритно-энергетические расчеты и натурные испытания различных типов тепловизионной аппаратуры показали возможность достижения соизмеримых результатов для основных параметров ТВП (по дальности действия, углам обзора, числу элементов разложения, т.е. «формату кадра», и, соответственно, качеству картины) при использовании различной топологии данного типа ПОИ [5].

Успех может быть достигнут за счет тех или иных схемотехнических решений. Однако тенденция здесь очевидна: при реализации второго направления объем электроники меньше, чем в первом случае, за счет использования минимального числа ФЧЭ ПОИ, соответствующего упрощения электронного канала (в основном, его аналоговой части) и повышения эффективности РУ; схемотехническое решение оптического канала при реализации первого направления сложнее.

Учитывая тот факт, что в настоящее время уровень оптических технологий в России значительно выше уровня электроники, следует, видимо, отдать предпочтение первому варианту построения ТВП.

При практическом выборе той или иной схемы построения одним из определяющих факторов эффективности является жесткая структура взаимосвязей узлов ОС, РУ, ПОИ и электронного тракта преобразования видеосигнала. При этом выбор ПОИ и, в частности, его топологии определяет распределение функциональной нагрузки по основным функциональным узлам ТВП, что, в конечном счете, приводит к совершенно разным требованиям к элементной базе электронного тракта, материалоемкости входной ОС и, соответственно, ценообразованию изделия [6].

На практике понятие “выбор технических вариантов” означает поиск компромисса между принципиальным техническим решением функциональной задачи и реализуемым на существующем технологическом уровне серийного производства образцом модуля ТВП или его узла или блока. Основные предпосылки при выборе компромиссных решений состоят в том, что параметры модулей ТВП находятся во взаимной связи явным и неявным образом.

Например, количество ФЧЭ в ПОИ связано с достижимой величиной их максимальной чувствительности и величиной разброса чувствительности ФЧЭ относительно среднего значения, что напрямую связано с чувствительностью ТВП. Одновременно количество ФЧЭ определяет количество зон сканирования, т.е. основной параметр РУ, и, как следствие, время минимально короткого импульса, ширину полосы пропускания, а в итоге - чувствительность ТВП и его габариты. Кроме того, от количества ФЧЭ зависит требуемая хладопроизводительность микрокриогенной системы, а следовательно,

масса, габариты и энергопотребление ТВП. Вследствие этого у разработчика ТВП существует определенная свобода в выборе вариантов построения, позволяющая несколько компенсировать недостаточно высокий технологический уровень, например, ПОИ, за счет увеличения функциональной нагрузки и усложнения конструкции РУ. Таким образом, выбор разработчиком технического решения конкретного узла или блока оказывается прямым образом включенным в процедуру выбора базовой технологии серийного производства модулей ТВП и, в свою очередь, служит инструментом корректировки при оптимизации базовой технологии серийного производства модульных ТВП.

Методически анализ ТВП с ОМСС основывается на моделировании процесса сканирования различных ОМСС с ПОИ, топология которого может быть различна в зависимости от числа ФЧЭ. При этом поиск эффективной пары "ПОИ – ОМСС" состоит из следующих этапов.

1. Расчет основных параметров зеркальных сканирующих систем, что позволяет проводить анализ растровой структуры на основе закона сканирования и уравнения ПОИ и определять: допуски геометрических искажений, зависящие, в частности, от выбора осей качания и углов обзора; габаритные соотношения элементов системы, согласование входных и выходных зрачков, требования к объективу, определяемые спецификой применяемого сканера, линейными размерами (масштабом) и топологией ФЧЭ выбранного (заданного) ПОИ; изменение линейного разрешения по полю обзора, интегральной дисторсии (от оси до крайних точек, связанных по размеру с центральной) и распределения освещенности по ФЧЭ как функций угла поля зрения.

2. Расчет спектра видеосигнала, что позволяет исследовать нарушение подобия между объектом и его изображением, возникающее из-за несоответствия «оптического» и «электронного» растра, а также растра системы отображения. Это дает возможность вводить коррекцию переналожения или пропуска строк и распределения освещенности ФЧЭ в строчном и кадровом направлении.

3. Расчет отношения сигнал/шум в изображении с учетом величины дисперсии флуктуаций фонового излучения в качестве уровня физических ограничений чувствительности ПОИ, а также расчет уровней чувствительности и разрешающей способности, которые можно считать рациональными для применения на практике с точки зрения платы за стремление к предельному увеличению параметров эффективности функционирования отдельных узлов ТВП. Резерв в повышении эффективности ТВП состоит в достижении порога чувствительности ПОИ, ограниченного фоновым излучением при использовании охлаждаемых апертурных диафрагм и рациональном выборе рабочего спектрального диапазона, что позволяет достичь предельных значений обнаружительной способности. Необходимая рабочая полоса пропускания и, как следствие, требования по быстродействию к электронному тракту, его архитектуре и программе функционирования обусловлены длительностью просмотра пикселя, определяемой циклограммой прохождения сигналов и соответствующей угловому размеру пикселя.

Моделирование процесса сканирования позволило провести анализ вариантов относительного расположения ФЧЭ различной топологии и ОМСС при переборе различных ОМСС, выполненных на базе одиночного зеркала, двух зеркал и двугранного зеркала, осуществляющих строчную и кадровую развертку. Анализ показал наличие двух типов ОМСС.

Первый тип ОМСС не обладает зависимостью расхождения траекторий строк, последовательно сканирующих ФЧЭ, от углов поля зрения, а следовательно, и от топологии ФЧЭ.

Второй тип ОМСС обладает этой зависимостью. При этом траектории проекций отличаются тем сильней, чем дальше ФЧЭ расположены друг от друга и от оптической оси системы. При превышении предела соответствия размеров, топологии ФЧЭ и углов

поля зрения данного типа ОМСС ухудшается качество изображения за счет следующих факторов: появления муара из-за переналожения строк; появления увеличивающегося и изменяющегося по строке квазисимметричного фазового набега; появления расхождения или переналожения зон сканирования. Кроме того, возможно появление искажений формы изображения объекта за счет несоответствия законов сканирования ОМСС (датчика) и системы обработки информации.

Следует отметить, что приведение сигналов с отдельных элементов (пикселей) к одной фазе возможно за счет применения переменной временной задержки по полю или за счет нелинейного считывания изображения, например, в блок цифровой обработки. Но практически, исходя из требований имеющейся элементной базы электроники для цифровой обработки сигналов, которую можно реально применять при промышленном производстве ТВП, сдвиг фазы между первой и последующими линейками ПОИ должен быть кратным числу пикселей в строке для соблюдения соответствия угловых координат «оптического растра» временным координатам «электронного растра».

Таким образом, для улучшения технических характеристик ТВП следует учитывать следующие моменты.

1. В связи с тем, что, при условии применения идеальной ОС, угловое разрешение системы δ определяется только значениями площади квадратного ФЧЭ a^2 и относительного фокусного расстояния f', т.е. $\delta = a/f'$, а поле системы определяется длиной линейки M: $\omega = M \times \delta$ (при использовании ФЧЭ в виде сканирующей матрицы - ее диагональю), и учитывая, что для уменьшения фоновой засветки ПОИ, работающих в режиме ограничения флуктуациями фотонов фона (режим ОФ или BLIP), в конструкцию ПОИ устанавливают охлаждаемую диафрагму, которая располагается непосредственно перед ФЧЭ, а ее эффективность зависит от места установки, поскольку имеется несколько факторов, в том числе системных: смещение зрачка, теплопритоки, масса и габариты ОС и др.

2. Под оптимальной стыковкой ОС с ПОИ подразумевается конструкция, состоящая из ОМСС и ПОИ, содержащая криостат ПОИ, в котором охлаждаемая апертурная диафрагма по форме, размерам и местоположению совмещена с выходным зрачком объектива ПОИ ("первичной" оптики) при отсутствии вобуляции выходного зрачка (аберрации в зрачках). Это означает, что на практике диафрагма должна иметь форму круга.

3. Освещенность по полю изменяется как функция $D \cdot \cos \omega$, где D – диаметр входного зрачка объектива ПОИ, и не зависит от расположения зрачка в системе при условии, что этот входной зрачок совмещен с выходным зрачком телескопической насадки (ТН), что для сканирующих систем полностью неосуществимо. Однако необходимо минимизировать аберрации в зрачках, не жертвуя при этом другими параметрами системы. Иначе это неблагоприятно сказывается на массе и габаритах ОС, определяемых, например, диаметром первой линзы или габаритами главного зеркала ТН, и как следствие, на коэффициенте пропускания ОС и показателе материалоемкости, так как при изготовлении линз технологическая норма отношения диаметра линзы к ее толщине равна примерно 10/1.

4. В результате определения граничных соотношений топологии ПОИ и углов поля зрения ОМСС выявляется возможность достижения сканирующими ТВП максимальной чувствительности за счет применения малоформатной сканирующей матрицы при сохранении по полю приемлемого качества изображения.

5. Фокусировка изображения должна осуществляться оптическими элементами входной ОС (в ТН), так как фокусировка, например, перемещением линз объектива ПОИ без одновременной корректировки линейных размеров зон получаемого изображения в узле ТН приведет к несшиванию зон в получаемом кадре (пропуски или переналожение зон). Кроме того, желательно использовать исполнительный механизм и оп-

тические элементы фокусировки и для устранения терморасстраиваемости ОС (дополнительная функциональная нагрузка).

6. При использовании «коротких» линейных ПОИ результат операции по согласованию зрачков входной ОС и объектива ПОИ более эффективен, так как при условии равенства линейных размеров ФЧЭ исправление волнового фронта и коррекцию аберраций в зрачках проще проводить при формообразовании объектива ПОИ, чем во входной ОС, в то время как использование «длинных» линейных ПОИ ведет к необходимости обязательного спецформообразования (асферизация, киноформ) оптических элементов входной ОС, что технологически более сложно.

7. Полевые углы засветки меньше при использовании «коротких» линейных ПОИ по сравнению с «длинными», что способствует созданию малогабаритного криостата ПОИ с охлаждаемой апертурной диафрагмой (при условии ее оптимальной связи с блоком сканирования) с меньшими теплопритоками. Это, в конечном итоге, ведет к снижению требований по холодопроизводительности при фиксированном времени выхода на режим и, как следствие, к уменьшению массы, габаритов и энергопотребления микрокриогенных систем при снижении порога чувствительности за счет снижения флуктуаций фонового потока.

В результате в ГОИ им. С.И. Вавилова разработан ряд развертывающих устройств для линейных ПОИ с числом фоточувствительных элементов 96, 64 и 32, которые обеспечивают формирование тепловизионного изображения с форматом кадра следующего ряда: 576×768, 384×512, 384×256, 192×256.

Литература

1. Моделирование ночного видения: исторические перспективы. James A. Ratches U.S. Army Communications-Electronics Command Research, Development& Engineering Center Night Vision & Electronic Sensors Directorate Ft. Belvoir, VA 22060-5806 Конференция по инфракрасной технике: Проект, Анализы, Моделирование и Испытание, Орландо, Флорида, Апрель 1999г. // SPIE. Vol. 3701. 0277-786X/99.
2. Белозеров А.Ф., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Современные направления применения ИК радиометров и тепловизоров в научных исследованиях и технике // Оптический журнал. 1998. № 6. С. 19-23.
3. P.R. Norton. Infrared in the next millennium // SPIE Proc. Vol. 3698 (1992). P. 652-665.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
5. Гоев А.И. Разработки тепловизионных приборов в ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» // Научно-технический и гуманитарный сборник Международной Академии Контенант. 2002, апрель. С. 7-9.
6. Мирошников М.М. Инфракрасная техника в России. // Оптический журнал. 1997. № 2. С. 18–23.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ОБЩЕЙ ИНФИЦИРОВАННОСТИ МЯСА С ПОМОЩЬЮ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО МЕТОДА

Р.Е. Демин, С.Б. Лукин

Приведены результаты статистической оценки результатов эксперимента по определению наличия патогенных микроорганизмов на поверхности пищевых продуктов, а именно мяса говядины.

В настоящее время в мире очень большое внимание уделяется обнаружению микроорганизмов, вызывающих серьезные заболевания [2]. В то же время на рынке отсутствуют общедоступные средства диагностики бактериального загрязнения – быстродействующие, надежные, простые в применении и доступные по цене. Самые важные критерии эффективности для любых методов анализа – это время, чувствительность и стоимость анализов.

Среди экспресс-методов обнаружения патогенных бактерий наиболее интересен спектральный люминесцентный метод, который выгодно отличается от других методов анализа. Особенность спектрального люминесцентного метода, выделяющая его среди других объективных методов, состоит в том, что анализ продукта проводят без разрушения образца на основе спектров люминесценции. [5]

Сущность метода состоит в том, что спектры чистого и искусственно зараженного мяса по прошествии нескольких часов отличаются. Указанный эффект используется для решения вопроса о присутствии или отсутствии патогенных бактерий на тестируемой поверхности. Вероятной причиной изменения спектров флуоресценции являются продукты метаболизма бактерий.[1]

Остановимся на трансформации спектров люминесценции изначально чистого мяса и выясним, какой закон распределения имеют интересующие нас интенсивности при многократном повторении эксперимента. Эксперимент проводился на следующем оборудовании: источник излучения – аргоновый лазер ЛГ-106М-1 с длиной волны излучения 488 нм. Для регистрации сигнала люминесценции использовался спектрофотометр ДФС-24 и фотоумножитель ФЭУ-79. Для наглядности представим схему эксперимента (рис.1).

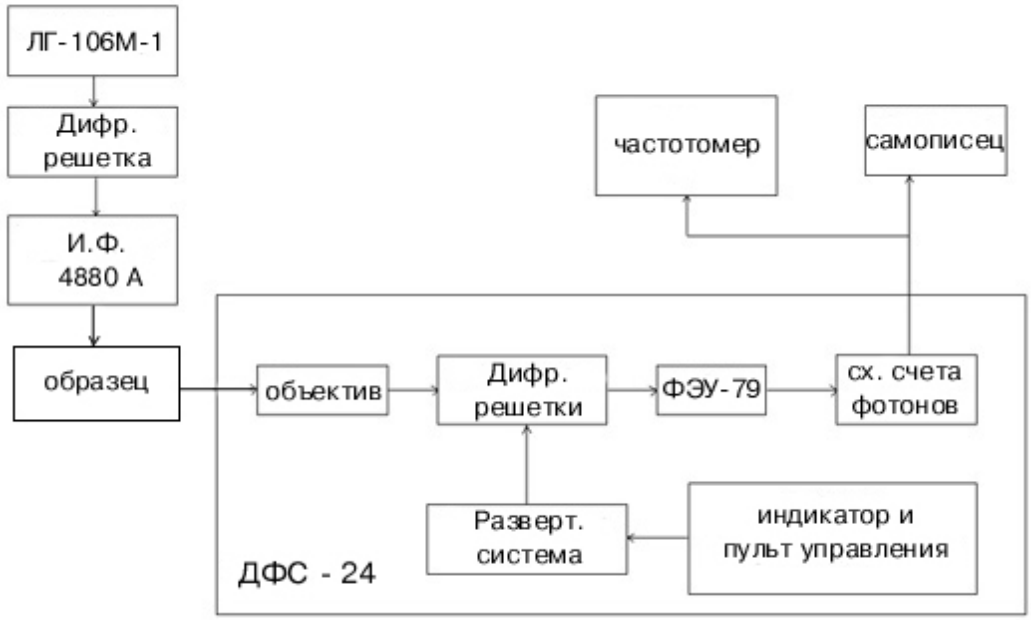


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

При выборе признакового пространства учитывалось отношение интенсивностей люминесценции на трех диапазонах длин волн λ_1 = 500–510 нм, λ_2 = 540–550 нм и λ_3 = 575–585 нм. Вычисление соотношения (1), оно же первый информационный признак позволяет нам сделать первоначальное заключение о качестве мясного продукта.

$$1I_\lambda = I_{\lambda 2} / I_{\lambda 1}. \quad (1)$$

Для более точного распознавания образцов необходимо, второй информационный признак, в котором будут участвовать третий и первый диапазоны:

$$2I_\lambda = I_{\lambda 3} / I_{\lambda 1} \quad (2)$$

Таким образом, две величины $1I_\lambda$ и $2I_\lambda$ дают нам одну точку в признаковом пространстве (рис.2). В ходе эксперимента были произведены измерения чистого мяса, этого же мяса через 12 часов хранения при комнатной температуре, 24 часа и через 48 часов. Было произведено 80 экспериментов. В результате этого мы получили признаковое пространство, а в нем – четыре области по 80 значений в каждом. Для оценки эффективности классификации загрязненности пищевых продуктов определим плотности вероятности указанных областей. Выберем в качестве математической модели распределения признаков нормальный закон. Параметры распределений приведены в табл. 1.

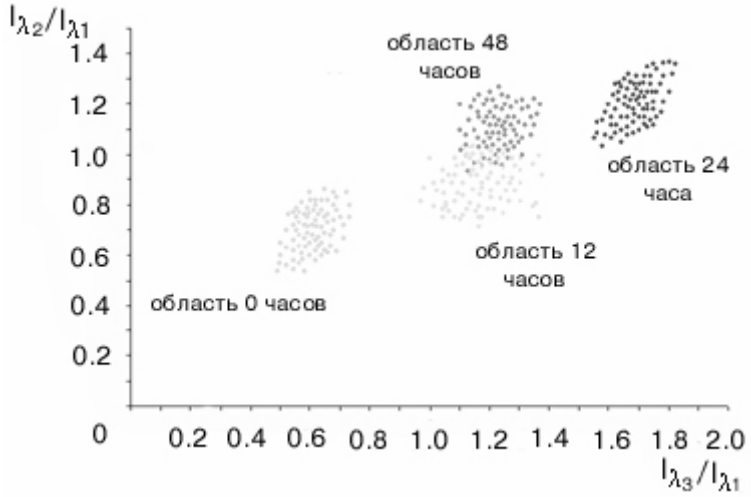


Рис. 2. Область 1 – чистое мясо, область 2 – мясо 24 часа при комнатной температуре, область 3 – 48 часов при комнатной температуре;

Для расчета ошибок первого и второго рода укажем математические ожидания и дисперсии четырех областей в табл. 1:

	Мат ожидание	Дисперсия
0 часов	0.1732	0.0748
12 часов	0.7806	0.0871
24 часа	0.9015	0.076
48 часов	1.3709	0.083

Таблица 1. Параметры распределения

Тот факт, что область, соответствующая содержанию мяса 48 часов при комнатной температуре, находится практически между областями 12 и 24 часа, не говорит нам о неправильности выбора информационных признаков. Все дело в том, что бактерии, засеянные в определенный, не изменяющийся объем питательной среды, размножаясь,

потребляют питательные элементы, что приводит в дальнейшем к истощению питательной среды и прекращению роста бактерий, а затем их гибели [6]. График фаз размножения бактерий представлен на рис.3.

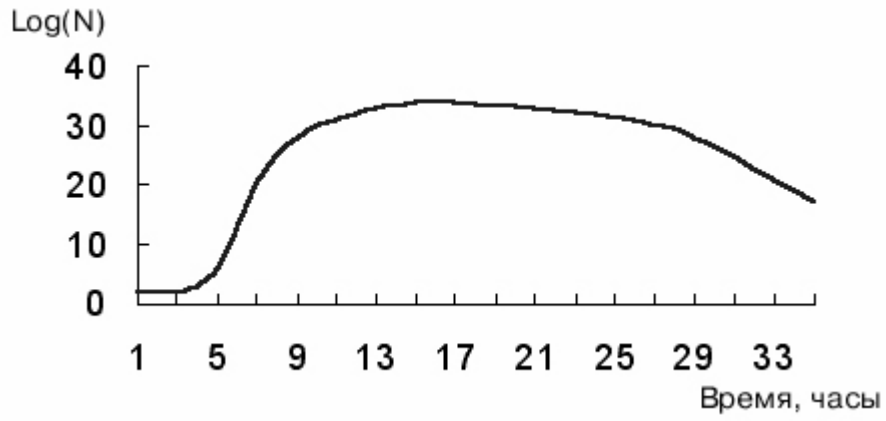


Рис 3. Фазы размножения бактерий

На рис. 4 приведены плотности распределения вероятностей попадания точек в признаковом пространстве мяса говядины. Воспользуемся данными табл. 1. Выберем статистический пороговый критерий X = 0.41 (рис.4). Далее методами численного интегрирования для двух нормальных законов с параметрами распределения M1 = 0.1732, σ1 = 0.0748 и распределения M2 = 0.7806, σ2 = 0.0871 вычислим вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги (ошибка первого рода). Статистический критерий значимости выбирается из того условия, что ошибка второго рода опасней ошибки первого рода, т.е. принятие загрязненного мяса за чистое представляет большую опасность, чем принятие чистого мяса за грязное.

Вероятность правильного обнаружения чистого, т.е. признания чистого мяса чистым, $P_{п.о.}$ = 94.495 %, а вероятность ложной тревоги $P_{л.т.}$ = 5.505 %. Вероятность пропуска сигнала о загрязненности загрязненного мяса $P_{п.с.}$ = 0.572 %, а вероятность правильного обнаружения загрязненности мяса $P_{п.о.}$ = 99.428 %.

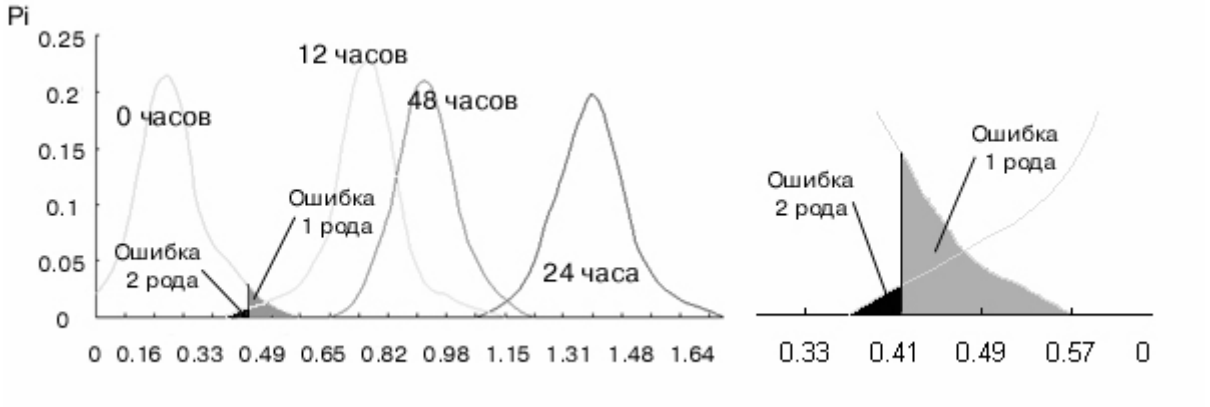


Рис. 4. Плотности распределения вероятностей нахождения точек в признаковом пространстве мяса говядины

Предложенные признаки позволяют с высокой степенью эффективности производить классификацию пищевых продуктов на наличие патогенных микроорганизмов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возможности использования спектрального люминесцентного метода для обнаружения патогенных бактерий на поверхности мяса.

Литература

1. Флуоресцентный метод дистанционного контроля качества пищевых продуктов/ В.И. Земский, О.В.Клим, Л.А. Кафтырева, И.К. Мешковский // Известия вузов. Приборостроение. 2002. Т.45.№1.С.60–62.
2. Biosensors for detection of pathogenic bacteria: Review / D.Ivnitski, I. Abdel-Hamid, E. Wilkins // Biosensors & Bioelectronics. 1999. №14. P.599–624.
3. Герасимович А.И. Математическая статистика. 2-е издание Мн.: Высшая школа, 1983. 279 с.
4. Пат.2170928 РФ. Дистанционный спектральный метод для определения качества мяса / В.И. Земский, И.К. Мешковский, А. Гоетц. 2001.
5. С.А Евелев, Н.П. Новоселов. Сравнительный анализ спектров люминесценции различных видов мяса/ // Институт холодильной промышленности, стр. 38-39.
6. Воробьев А.В., Быков А.С., Пашков Е.П., Рыбакова А.М. Микробиология. – М. Медицина, 2003. – 336 с

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ОСВОЕНИЯ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ОБЪЕМОВ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ И СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ

В.В. Коротаев, А.В. Краснящих, А.Н. Тимофеев

Для решения задач контроля деформации крупногабаритных инженерных сооружений, к которым относятся средства освоения ресурсов мирового океана, необходимо реализовать распределенную оптико-электронную систему (РОЭС) обеспечивающею многоточечный непрерывный контроль, что позволит получать более полную информацию о состоянии объекта [1, 3–6].

Одной из важных проблем в рамках НТП «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» по подпрограмме "Новые авиационные, космические и транспортные технологии" (шифр 205 04.01.034) является повышения быстродействия РОЭС при оптимизации объемов информационных потоков.

Под РОЭС предложено понимать набор оптико-электронных преобразователей (ОЭП), определенным образом распределенных (разнесенных) в пространстве, времени, спектральном диапазоне, воспринимающих определенную часть информации, содержащейся в оптическом сигнале об измеряемом (наблюдаемом) объекте, и преобразующих ее в электрический сигнал, передаваемый по каналу передачи данных на центральный управляющий прибор (ЦУП). ЦУП введен в систему для восстановления общей информационной картины из частей, полученных от ОЭП, а также осуществления управления процессом собора, хранения и отображения измерительной информации. В состав РОЭС также могут входить дополнительные источники информации (ДИИ) об объекте, например, температурные датчики. Обобщая выше сказанное, стоит отметить, что РОЭС необходимо строить по блочно-модульному принципу, что позволит создать универсальную систему, способную решать различные измерительные задачи путем изменения набора блоков, входящих в ее состав. Стоит особо отметить, что РОЭС призвана обеспечивать многоточечный контроль состояния объекта.

В дальнейшем ОЭП, входящий в РОЭС, в связке с источником оптического излучения будем называть измерительным каналом (ИК) (рис.1), таким образом, в состав ИК должны входить источник и приемник оптического излучения, а также блоки интерфейса (БИ), обеспечивающий двухстороннюю связь ИК с каналом передачи данных.

ЦУП, помимо блоков, обеспечивающих сбор, отображение и хранение измерительной информации, должен обладать и БИ, обеспечивающим подключение к каналу передачи данных. ДИИ могут подключаться напрямую к ЦУП или (и) через БИ к каналу передачи данных. Количество необходимых ДИИ определяется из задачи, решаемой РОЭС.

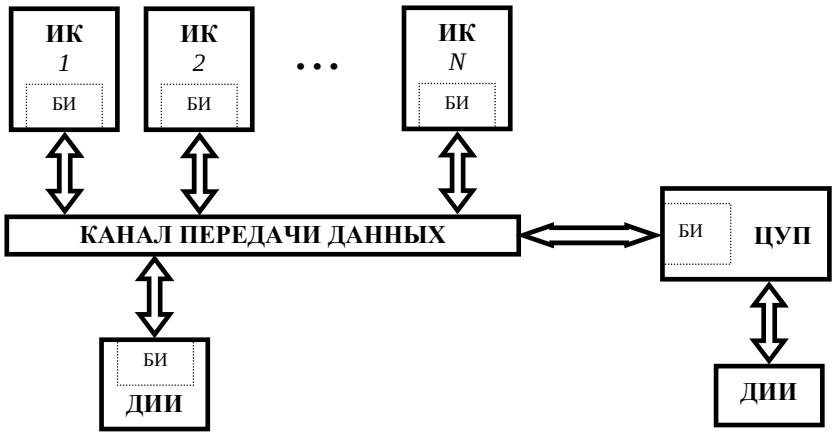


Рис.1. Общая схема распределенной оптико-электронной системы

Примером системы контроля состояния средств освоения ресурсов мирового океана может служить РОЭС структура, представленная на рис. 1. В этой РОЭС ИК может быть построен по схеме, указанной на рис.1, только в его состав вместо ЦУП будет входить промежуточный управляющий прибор (ПУП), выполняющий функции сбора и передачи данных из своего сегмента РОЭС в ЦУП. В таком случае ИК будем называть составным в том смысле, что он представляет собой не одиночный ОЭП, а целый набор. В противном случае ИК называется простым, или просто ИК.

Накопление и обработка измерительной информации производится по управляющим командам, поступающим с ЦУП. В связи с этим каждый ИК должен получить команду на накопление, обработку измерительной информации, а также пересылку результатов измерений. В случае, когда в РОЭС нет составных ИК и все ИК имеют одинаковые характеристики быстродействия, возможны два варианта организации пересылки управляющих команд: последовательная, т.е. каждому ИК по отдельности, и широковещательная – подается одна общая управляющая команда [2]. В варианте с широковещательными управляющими командами РОЭС работает приблизительно в N (число ИК в системе) раз быстрее, что позволяет существенно уменьшить объем передаваемых управляющих команд и ускорить процесс получения полной картины состояния объекта.

В качестве приемников оптического излучения в ИК используются оптико-электронные датчики с матричным фотоэлектрическим преобразователем на основе приборов с зарядовой связью (ФПЗС).

В таком датчике на ФПЗС 6 (рис.2), находящийся в приемном блоке, объективом 5 проектируются изображение контрольного элемента 1, роль которого играет инфракрасный излучающий диод. Сформированный ФПЗС видеокадр (четный и нечетный) передается в блок предварительной обработки измерительной информации (БПОИИ) (рис. 3), находящийся в непосредственной близости к ФПЗС. В БПОИИ захваченный кадр оцифровывается с помощью АЦП. БПОИИ, связанный через блок интерфейса с персональным компьютером (ПК), выполняющим функции обработки, отображения и хранения измерительной информации, а также управления процессом сбора измерительной информации. Адресация оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) производится под управлением блока управления (БУ) на базе счетчиков [5].

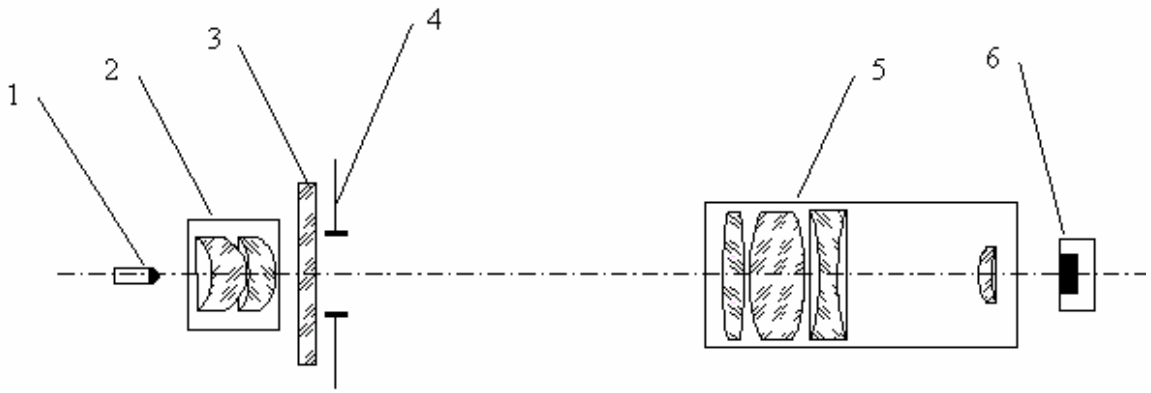


Рис. 2. Схема измерительного канала: 1 – инфракрасный диод, 2 – обьектив контрольного элемента, 3 – молочное стекло, 4 – диафрагма, 5 – объектив телевизионного датчика, 6 – матрица ФПЗС

В реализованном макете канала системы связь ПК с БПОИИ осуществляется по протоколу RS-485. Протокол связи RS-485 является наиболее широко используемым промышленным стандартом, использующим двунаправленную сбалансированную линию передачи. Протокол поддерживает многоточечные соединения, обеспечивая соз-

дание сетей с количеством БПОИИ до 32 и передачу на расстояние до 1200 м. Использование повторителей RS-485 позволяет увеличить расстояние передачи еще на 1200 м или добавить еще 32 БПОИИ. Стандарт RS-485 поддерживает полудуплексную связь. Для передачи и приема данных достаточно одной скрученной пары проводников и одной пары для питания подключенных устройств.

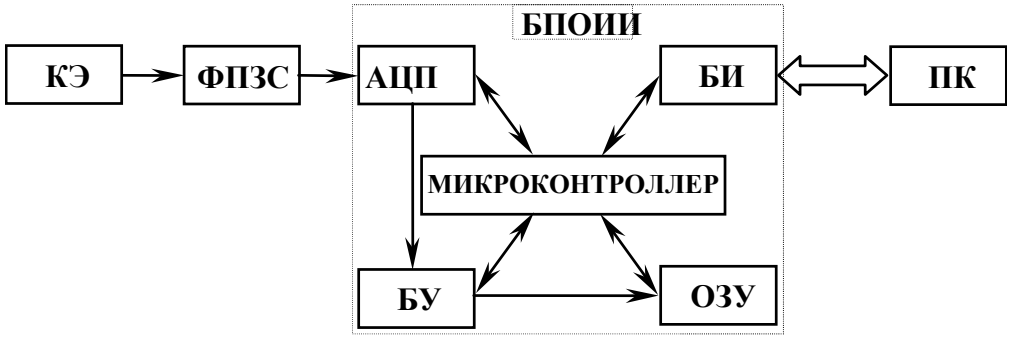


Рис. 3. Схема макета измерительной системы

В схеме БПОИИ используется микроконтроллер фирмы ATMEL – AT89C2051. Микроконтроллер AT89C2051 не имеет возможности адресации внешнего ОЗУ, в связи с этим для выборки нужного значения из ОЗУ необходимо выдать серию тактовых управляющих импульсов, что приводит к побайтовому просмотру всего содержимого ОЗУ, находящегося перед необходимым значением. Данный способ реализации пересылки данных между процессором и ОЗУ заметно увеличивал время обработки измерительной информации, которое составляло значение порядка 60 секунд от момента захвата кадров до выдачи результатов измерений, в результате была разработана и реализована новая схема на базе микроконтроллера фирмы ATMEL – AT89C55. Этот микроконтроллер позволяет адресовать 65536 байт внешней памяти, однако и этого недостаточно для обработки полного кадра изображения, так как изображение занимает в ОЗУ 262144 байта (два полукадра, четный и нечетный, размером 256×512 каждый). В результате схема БПОИИ была пересмотрена, в ее состав был введен новый элемент, выполняющий функции контроллера прямого доступа к памяти (КПДП). Функции КПДП реализованы с помощью микросхемы программируемой логики производства фирмы ALTERA – EPM7128SQC100. Структурная схема БПОИИ с КПДП приведена на рис.4.

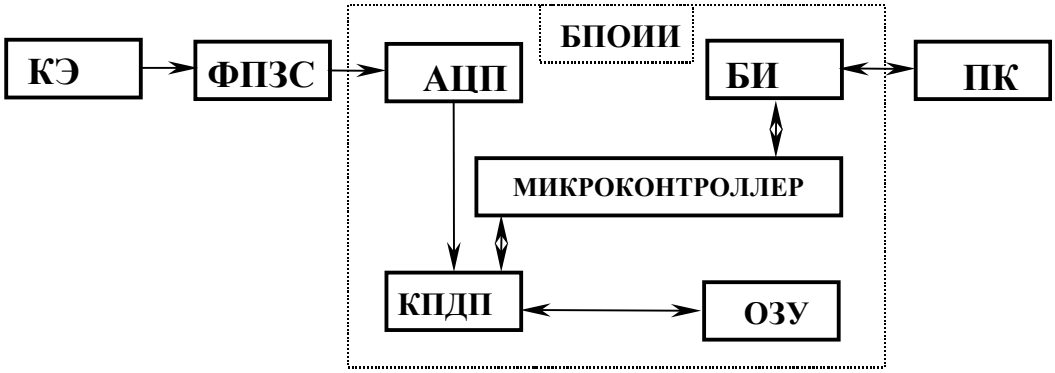


Рис. 4. Схема макета измерительной системы с использованием КПДП

Под управлением синхроимпульсов, поступающих с ФПЗС, сформированные полукадры поступают на вход АЦП. Если запись кадров в ОЗУ разрешена, то к шине данных подключается АЦП – производится запись захваченных полукадров в память сис-

темы, в противном случае ОЗУ доступно для обращения со стороны микроконтроллера. После записи в ОЗУ полукадров АЦП отключается от шины данных и подключается микроконтроллер. Вся область памяти разбита на четыре фрагмента по 65536 байт, каждому из них присвоен персональный номер, реализованный посредством трехбитной шины. В программе, записанной в микроконтроллер, реализована функция обращения к памяти, которая осуществляет программную склейку полукадров и адресацию полученного полного кадра, при этом в памяти полукадры хранятся последовательно, один за другим. Такое развитие схемы позволило сократить время получения результата измерений до 7 секунд, т.е. примерно в 8.5 раз.

Таким образом, использование КПДП в схеме измерительного канала оптико-электронной системы контроля геометрических параметров крупногабаритных объектов, позволило увеличить быстродействие измерительной системы в 8.5 раз по сравнению с предыдущим образцом без потери точности. Применение широковещательных управляющих команд позволяет существенно увеличить производительность системы в целом, а также существенно сократить объем предаваемых управляющих команд.

Основываясь на изложенном, повышения быстродействия в целом можно достичь путем совершенствования структуры РОЭС, введением широковещательных управляющих команд, а также применением контроллеров прямого доступа в электронной части канала.

Дальнейшие исследования в рамках НТП «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» по подпрограмме "Новые авиационные, космические и транспортные технологии" (шифр 205 04.01.034) планируется провести в направлении совершенствования алгоритмического обеспечения каналов и программы управления системой.

Литература

1. Казанский Г.Д., Курячий М.И., Пустынский И.Н. Измерительное телевидение: Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1994.
2. Стэн Шатт. Мир компьютерных сетей: Пер. с английского. К.: BHV, 1996.
3. Коротаев В.В., Краснящих А.В. Исследование макета оптико-электронной системы контроля деформаций крупногабаритных инженерных сооружений. // Сборник трудов пятой международной конференции "Прикладная оптика". 15–17 октября 2002 г. СПб. ГОИ Т.1., с 70.
4. Коротаев В.В., Краснящих А В. Исследование точностных характеристик макета оптико-электронной системы контроля деформаций крупногабаритных инженерных сооружений. // Тезисы докладов конференции «Лазеры для медицины, биологии и экологии». Санкт-Петербург, 27–28 ноября 2002 г. / Под ред. В.Е. Привалова. БГТУ, СПб, 2002.
5. Андреев А.Л., Ярышев С.Н., Стрелков А.Р. Аппаратные и программные средства оптико-электронных приборов с телевизионными датчиками на ФПЗС. Методические указания. СПб.: ИТМО, 1995. 49 с.
6. Грязин Г.Н. Системы прикладного телевидения. СПб.: Политехника, 2000. 277 с.

КРИТЕРИЙ ВЫБОРА И СИНТЕЗ УСЛОВИЙ ОСАЖДЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СИСТЕМ

Л.А. Губанова

Градиентные диэлектрические системы широко применяются в лазерных резонаторах для создания гауссовых и супергауссовых световых пучков. Для решения этой задачи могут быть использованы полупрозрачные градиентные зеркала (амплитудно-фазовая коррекция формы волнового фронта) или «глухие» зеркала, обладающие примерно постоянным коэффициентом отражения и меняющейся по поверхности разностью фаз между падающей и отраженной волнами (фазовая коррекция формы волнового фронта).

Как известно [1], значение коэффициента отражения выходного зеркала по его поверхности задается функцией вида: $R_з = R_0 \exp\left[-\left(\frac{\rho}{a}\right)^k\right]$, где R_0 – коэффициент отражения в центре зеркала, ρ – значение радиальной координаты, a – параметр, определяющий радиальную координату, в которой значение коэффициента отражения уменьшается в e раз, k – любое число (целое, рациональное, иррациональное). Как видно отсюда, распределение коэффициента отражения обладают осевой симметрией.

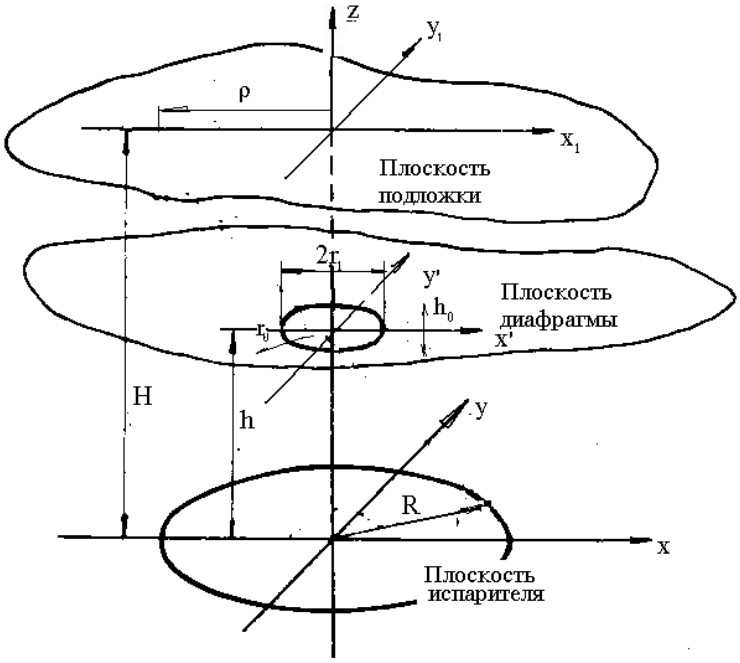


Рис. 1. Схема формирования диэлектрических слоев с использованием пульсирующей диафрагмы

Для создания зеркал с таким распределением коэффициента отражения используется метод термического испарения диэлектриков в вакууме. Для получения осесимметричного распределения коэффициента отражения используются слои диэлектриков с меняющейся по поверхности зеркала толщиной. Осесимметричное распределение

толщины слоев по поверхности оптического элемента может быть получено при осаждении слов на вращающуюся подложку (см. рис.1), если между подложкой и испарителем помещены круглые диафрагма или экран [1]. Для коррекции распределения толщины слоя по поверхности детали целесообразно использовать пульсацию положения и размера диафрагмы с заданной частотой. Распределение толщины слоя по поверхности оптической детали будет определяться по приведенным ниже зависимостям:

$$F(x,\tau) = \begin{cases} 1 & \text{если} \quad \Delta(x,\tau) \geq 1 \\ 0 & \text{если} \quad \Delta(x,\tau) \leq -1 \\ f(x,\tau) & \text{если} \quad |\Delta(x,\tau)| < 1 \end{cases},$$

где

$$f(x,\tau) = \frac{\left(H^2 + R^2\right)^2}{\left(H^2 + R^2 + x^2\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{\sin\ (x,\tau)}{\pi\left[1 - a^2(x)\right] \cdot \left[1 + a(x)\cos\ (x,\tau)\right]} + \frac{1 - 2\pi^{-1}\,\mathrm{arg}tg\left[\sqrt{(1-a(x))(1+a(x))^{-1}} \cdot tg0.5\ (x,\tau)\right]}{\sqrt{\left(1 - a^2(x)\right)^3}} \right] \quad (1)$$

и

$$\varphi(x,\tau) = \arccos\left[\frac{1}{2Rh(\tau)} \times \frac{H^2(r(\tau))^2 - R^2(H - h(\tau))^2 - x^2(h(\tau))^2}{(H - h(\tau)) \cdot x} \right],$$

$$a(x) = \frac{2Rx}{H^2 + R^2 + x^2},$$

$$\Delta(\tau, x) = \frac{r^2(\tau)H^2 - R^2\left[H - h(\tau)\right]^2 - x^2h^2(\tau)}{2Rh(\tau) \cdot (H - h(\tau)) \cdot x},$$

при $r(\tau) = r_1 + r_0 \cos\omega\ \tau$, $h(\tau) = h_1 + h_0 \cos\alpha\omega\tau$, где h_1– расстояние между плоскостью, в которой расположен испаритель, и плоскостью, в которой расположена подожка в начальный момент времени, h_0 – амплитуда, с которой изменяется расстояние между диафрагмой и плоскость испарителя, r_1 – радиус диафрагмы в начальный момент времени, r_0 – амплитуда изменения радиуса диафрагмы, ω и aω – угловые скорости изменения радиуса диафрагмы и положения центра диафрагмы на оси подложки, τ – время осаждения слоя, величина a может принимать любые значения (целые, дробные, иррациональные).

У слоя, граничащего с воздухом, толщина, согласно соотношению (1), будет являться функций показателей преломления пленкообразующих материалов и толщин слоев. В нашем случае толщина двух слоев постоянна и кратна λ/4, толщина граничащего с воздухом слоя меняется по приведенному выше закону.

Для определения относительного расположения подложки, диафрагмы (экрана) и испарителя, при которых наблюдается наилучшее совпадение экспериментально реализуемых и заданных значений распределения коэффициентов отражения по поверхности подложки, предлагается использовать интегральный критерий вида

$$\mu = \int_0^{\rho} \left(\frac{R_{эр} - Rз}{Rз} \right)^2 \cdot f(\rho) d\rho \to \min,$$

где $f(\rho)$ – функция качества, учитывающая статистический вес разницы значений коэффициента отражения в разных зонах зеркала. Величина $R_{эр}$ – возможное экспериментально реализуемое значение коэффициентов отражения в разных зонах зеркала – в зависимости от конструкции и условий осаждения определяется аналогично том, как это делалось нами ранее [2].

При выборе условий осаждения нами были использованы функции вида: $f(\rho)=1$, т.е. значения разности коэффициентов отражения в разных зонах зеркала учитываются одинаково, и $f(\rho)=1+\rho^2$, где преимущественно учитываются значения разности коэффициентов отражения на краю зеркала. В работе рассмотрены четные значения k=2,4,6,8,10, выбор проводился при условии равенства частот пульсации радиуса диафрагмы в плоскости *yox* и ее положения по оси *oz*.

В табл. 1 приведены значения интегрального критерия качества при получении гауссовых и супергауссовых зеркал с использованием рассмотренного выше метода формирования диэлектрических покрытий методом электронно-лучевого испарения вещества в вакууме.

k	$f(\rho)=1$		$f(\rho)=1+\rho^2$	
	Диафрагма неподвижна	С учетом пульсации диафрагмы	Диафрагма неподвижна	С учетом пульсации диафрагмы
2	0.02	0,02	1.317	1.317
4	$3.59\cdot10^{-3}$	$3.59\cdot10^{-3}$	0.364	0.364
6	$1.66\cdot10^{-3}$	$1.66\cdot10^{-3}$	0.164	0.164
8	$1.08\cdot10^{-3}$	$1.08\cdot10^{-3}$	0.118	0.118
10	$1.09\cdot10^{-3}$	$8.5\cdot10^{-4}$	0.098	0.098

Таблица 1. Критерии качества при выборе условий формирования гауссовых и супергауссовых зеркал испарением вещества в вакууме

В табл. 2 представлены геометрические параметры расположения подложки, диафрагмы и испарителя для разных функций качества и значений параметра k при получении гауссовых и супергауссовых зеркал испарением вещества в вакууме.

	$f(\rho)=1$		$f(\rho)=1+\rho^2$	
	Диафрагма неподвижна	Оптимальная амплитуда перемещения диафрагмы	Диафрагма неподвижна	Оптимальная амплитуда перемещения диафрагмы
	h_1=449,2 r_1=5,4	h_0=0 r_0=0	h_1=446,8 r_1=5,2	h_0=0 r_0=0
	h_1=449,2 r_1=5,5	h_0=0 r_0=0	h_1=448,9 r_1=5,5	h_0=0 r_0=0
	h_1=450,5 r_1=6,0	h_0=0.4 r_0=0.1	h_1=450,3 r_1=5,6	h_0=0 r_0=0
	h_1=451,6 r_1=6,4	h_0=0.1 r_0=0.3	h_1=451,4 r_1=6,3	h_0=0 r_0=0
0	h_1=452,4 r_1=6,7	h_0=0.8 r_0=0.2	h_1=452,5 r_1=6,7	h_0=0 r_0=0

Таблица 2 Геометрические параметры расположения подложки, диафрагмы и испарителя при формировании гауссовых и супергауссовых зеркал испарением вещества в вакууме

В результате анализа приведенных таблиц можно сделать следующие выводы:

- Значение критерия качества уменьшается примерно на порядок по мере увеличения параметра k как для неподвижного расположения диафрагмы относительно испарителя, так и для пульсирующих в двух координатах диафрагм. Это означает, что данный метод предпочтительнее применять при значениях k>10.

- Диаметр диафрагмы и ее взаимное расположение относительно подложки и испарителя меняется в зависимости от величины параметра *k*.
- Анализ применения пульсирующих диафрагм при *k*>6 и частоте смещения диафрагмы по высоте в два раза большей, чем по радиусу показывает, что в пределах точности измерений реализуемое распределение коэффициента отражения по поверхности подложки совпадает с таким же при неподвижной диафрагме и таком же ее расположении относительно испарителя и подложки. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что возможные вибрации элементов подколпачной арматуры с амплитудой менее миллиметра не сказываются на точности воспроизведения толщины слоя по поверхности подложки.

Зависимости распределения коэффициентов отражения при различных значениях критерия качества для $R_з = R_0 \exp\left[-0.1\rho^6\right]$ при $f(\rho)=1$: для кривой 2 ($\mu=1{,}66\cdot10^{-3}$) и кривой 3 ($\mu=2{,}57\cdot10^{-3}$) приведены на рис. 2. Этим значениям критерия качества соответствуют следующие условия осаждения: h_1=450,5мм, r_1=6,0мм, *H*=460мм, *R*=230мм и *h1*=450,3мм, r_1=6,2мм, *H*=460мм, *R*=230мм соответственно.

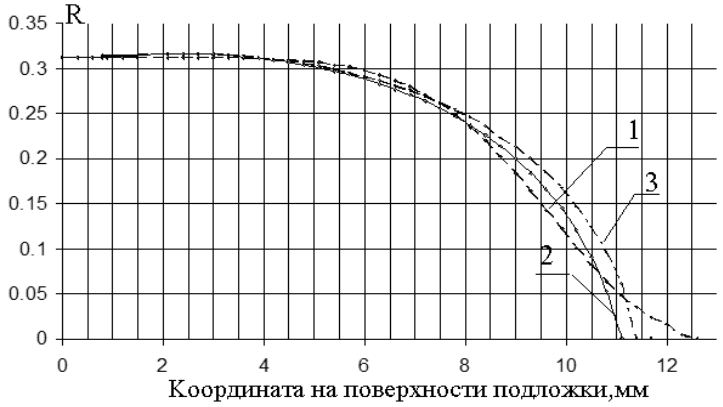


Рис. 2. Кривая 1 – заданное распределение коэффициента отражения,
кривая 2 – расчетное распределение при $\mu= 1{,}66\cdot10^{3}$,
кривая 3 – расчетное распределение при $\mu= 2{,}57\cdot10^{3.}$

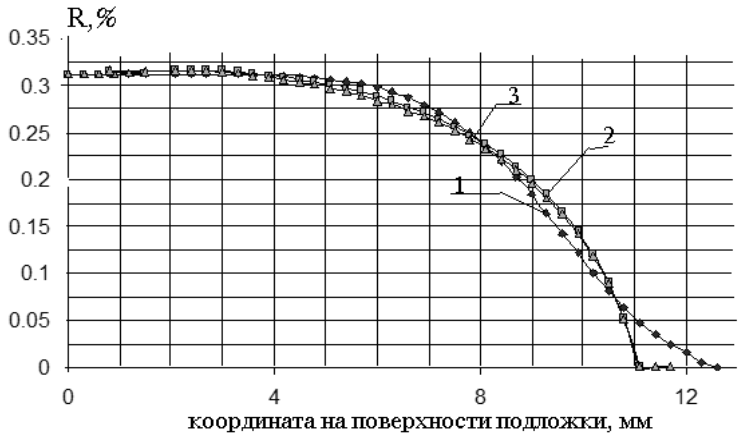


Рис. 3. Кривая 1 – заданное распределение коэфяфициента отражения,
кривая 2 – расчетное распределение при $f(\rho)=1$,
кривая 3 – расчетное распределение при $f(\rho)=1+\rho^2$

Как видно из представленных графиков, наибольшее отклонение в распределение коэффициента отражения наблюдается в точках, наиболее удаленных от центра детали,

т.е. при малых значениях коэффициента отражения. С целью выяснения возможности уменьшения расхождения на краю зеркала нами было испытано влияние введения в подынтегральное выражение функции $f(\rho)=1+\rho^2$, что позволило бы уменьшить эти расхождения. Анализ результатов расчетов, выполненных после этого, показал, что введение подобной функции на результаты определения оптимальных условий осаждения не влияет. Распределения коэффициента отражения по поверхности зеркала представлены на рис.3.

В результате работы была проведена экспериментальная проверка критерия согласования энергетических коэффициентов отражения градиентных зеркал для создания лазерных резонаторов, позволяющих получить выходное излучение с малой расходимостью и высокой яркостью. Создана экспериментальная установка, позволяющая измерить распределение коэффициента отражения на поверхности экспериментально изготовленных зеркал. Результаты измерения распределения коэффициента отражения достаточно хорошо совпадают с расчетным распределением коэффициента отражения по поверхности зеркала.

Работа выполнена в рамках проекта 20150 «Синтез градиентных зеркал лазеров для опто-акустоэлектроники».

Литература

1. Губанова Л.А., Дмитренко В.А., Путилин Э.С. Формирование градиентных слоев с помощью круглых диафрагм и экранов // Оптический журнал. 2003. №3. С.50-53.
2. Губанова Л.А., Дмитренко В.А., Путилин Э.С. Многослойные диэлектрические зеркала с переменным профилем коэффициента отражения для лазерных систем // Оптический журнал. 2000. № 3. С.91-96.
3. Губанова Л.А., Карасев В.Б., Путилин Э.С.. Использование подвижных диафрагм при формировании слоев переменной толщины. // Оптический журнал. 2003. №11. С. 45-48.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ

В.А. Дмитренко, Н.Н. Карасёв, Э.С. Путилин

Рассмотрены вопросы, посвященные влиянию различных технологических факторов на распределение толщины слоев по поверхности подложки при формировании градиентных покрытий на оптических деталях с использованием оснастки, выполняющей перераспределение молекулярного потока испаренного пленкообразующего вещества от малого поверхностного испарителя.

Большое внимание уделяется применению в лазерных резонаторах отражателей с переменным по поверхности коэффициентом отражения для улучшения их пространственно-энергетических характеристик. Отражатели представляют собой нанесенные на подложку многослойные диэлектрические покрытия, содержащие один или несколько градиентных слоев с переменным по поверхности детали профилем толщины. Важным моментом в технологии изготовления таких систем, основанной на вакуумных методах нанесения покрытий с использованием различной оснастки, является получение покрытий с заданными геометрическими и оптическими параметрами.

В процессе формирования покрытий данного типа с использованием масок – диафрагм круглой формы (рис. 1) необходимо рассмотреть влияние различных параметров оснастки: H – расстояния от плоскости испарителя (И) до поверхности подложки и h – расстояния от плоскости испарителя до диафрагмы D_1, $R_И$ – расстояния от испарителя до оси вращения подложки, на распределение толщины осажденного слоя.

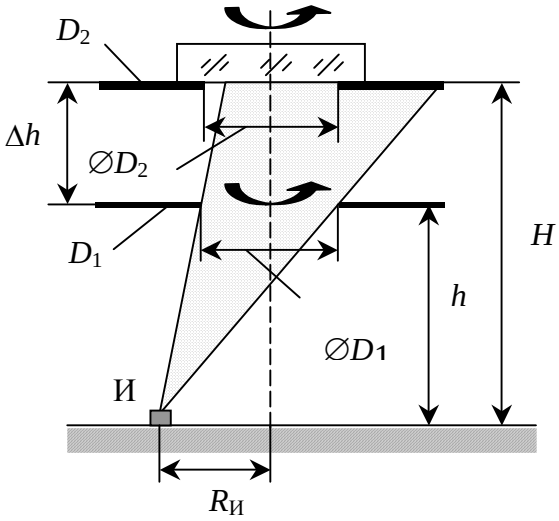


Рис. 1. Расположение детали, диафрагмы и испарителя во время осаждения

Толщина слоя в некоторой точке поверхности детали, сформированная осаждением материала через круглую диафрагму D_1 с учетом различных факторов, определена в выражении (1) [1, 2]:

$$d = \frac{\beta\upsilon}{\pi g\omega}\int_0^{\varphi}\frac{H^2 d\varphi}{P^4(\varphi)}, \qquad (1)$$

где P – расстояние от испарителя И до точки поверхности подложки, находящейся в зоне видимости испарителя, на которую проводится осаждение за время определяемое углом поворота $\varphi\in[0;2\pi]$ подложкодержателя, β – коэффициент конденсации, определяющий отношение числа осажденных молекул к общему числу молекул, υ – скорость испарения вещества, g – плотность образовавшегося слоя, ω – угловая скорость враще-

ния приемной поверхности. Предположим, что коэффициенты: β, υ, g, ω в этом выражении постоянны во времени. Следовательно, основное влияние на толщину слоя в некоторой точке поверхности подложки оказывают параметры H, $R_И$, h, r_{D1} – радиус диафрагмы D_1 (см. рис. 1).

Факторы, влияющие на распределение толщины градиентных слоев на подложке, можно разделить на:

1. начальные ошибки, возникающие до процесса осаждения:
   а) при изготовлении элементов оснастки для формирования слоев с переменным профилем толщины;
   б) при сборке и установке оснастки в вакуумной камере;
2. конечные ошибки, возникающие во время осаждения:
   а) при изменении размеров элементов оснастки;
   б) при возможной разъюстировке оснастки;
   в) при изменении расстояния от испарителя до элементов оснастки.

Все эти ошибки приводят к тому, что при формировании слоев полученные профили толщины отличаются от расчетных. Фактор 1а имеет место при изготовлении любого изделия, детали и т.д., т.е. является технологическим фактором. В данном случае оснастка состоит из простых элементов, поэтому при ее изготовлении отсутствуют какие-либо технологические сложности, способные привести к возникновению начальных ошибок. Наиболее жесткие требования по допуску на отклонение размеров предъявляются к элементам оснастки D_1 и D_2, где D_2 – отрезающая диафрагма, с помощью которых формируют требуемое распределение толщины, и к параметру $\Delta h=H-h$, особенно при его малых значениях.

Оснастка не является монолитной и, как любая другая сложная конструкция, состоит из множества элементов, многие их которых подвижны и после проведения юстировки фиксируются с помощью резьбовых соединений. При этом остаются некоторые погрешности – фактор 1б. Начальные ошибки 1а и 1б оказывают минимальное отрицательное воздействие на формирование толщины покрытия во время процесса осаждения.

Процесс осаждения является высокотемпературным процессом, поэтому изменение размеров элементов оснастки обусловлено их тепловым расширением. Фактор 2а проявляется в случаях, когда осаждение материала проводится длительное время, что может быть связано с формированием большого количества слоев с переменным профилем или большим значением толщины слоев, входящих в пленочную систему. Тепловое расширение материала проявляется, если формирование слоев необходимо проводить на нагретую до $\approx 300^0$С поверхность подложки. Фактор 2б проявляется через некоторый промежуток времени после начала вращения приемной поверхности и связан с устройством схемы вращения подложкодержателя. При вращении оснастка подвержена небольшой вибрации, которая воздействует на связанные друг с другом с помощью резьбовых соединений элементы оснастки. Нагрев подшипников и зубчатых колес, с помощью которых осуществляется вращение подложкодержателя с оснасткой, увеличивает вибрацию – совместное проявление 2а и 2б.

В модели одинарного вращения (рис. 1) рассмотрено испарение из малого поверхностного испарителя, находящегося в плоскости тигля. Параметры H, h и, следовательно, расстояние P в математической модели осаждения рассчитывались от плоскости тигля. В реальном испарителе мишень имеет конечные размеры, и параметры рассчитываются от верхней границы плоскости реального испарителя вещества.

Вначале рассмотрим фактор 2в на примере испаряемого вещества в виде спрессованных из порошка таблеток. Отклонение $R_И$ можно частично отнести к случаю, возникающему до процесса осаждения, так как установка одной или нескольких таблеток в одной секции выполняется с определенной погрешностью $\Delta R_{Иуст}$. Во время осаждения

пучок электронов сфокусирован на поверхности испаряемого материала. При этом диаметр зоны, из которой происходит испарение вещества, может быть от 3 до 5мм для диэлектрических пленкообразующих материалов. Следовательно, $R_И$ определяется как расстояние от центра пятна до центра вращения подложкодержателя и представлено в виде: $R_{Иср} = \frac{R_{И1} + R_{И2}}{2}$, где $R_{И1}$ и $R_{И2}$ – крайние значения $R_И$, обозначающие границы зоны испарения. При увеличении числа электронов, бомбардирующих поверхность вещества, диаметр зоны испарения будет увеличиваться. В вакуумной установке ВУ1-А существует возможность сканирования пучком электронов по поверхности испаряемого материала с заданной частотой и амплитудой в плоскости испарителя. В этом случае при увеличении общей площади воздействия электронов энергия, приходящаяся на единицу поверхности, уменьшается. Размер зоны испарения увеличивается и ограничивается температурой плавления вещества, диаметром таблетки и размером тигля.

Если зона испарения соизмерима с диаметром таблетки, то за время осаждения параметр $R_И$ практически не изменяется. После прогрева и дегазации таблетки в начальный момент испарения параметры H и h имеют некоторые значения $H_н$ и $h_н$, несколько отличные от измеренных до осаждения от верхней плоскости испарителя, так как при этих процессах приповерхностная часть таблетки нагревается до температуры испарения, и часть вещества испаряется под заслонкой. В конце осаждения параметры имеют значения $H_к$ и $h_к$, которые могут значительно отличаться от начальных, в зависимости от длительности процесса испарения вещества. При создании многослойных пленочных систем используются, как минимум, два пленкообразующих вещества с разными показателями преломления [3]. Испарение материалов, расположенных в разных секциях, производится поочередно.

Если испаряемое вещество представляет собой колотую или порошкообразную массу, то, с одной стороны, $\Delta R_{И\,ср}$ увеличится, с другой стороны, ее сложно оценить точно, так как сканирование пучка ограничивается только размером секции, в которой находится вещество. С определением H и h до осаждения возникнут трудности вследствие того, что поверхность испаряемого вещества имеет сложную форму, отличную от плоской поверхности. Во время испарения колотой массы отклонения ΔH и Δh можно оценивать лишь приближенно. Необходимо отметить, что изменения рассмотренных параметров во время осаждения в большой степени зависят от количества и толщины слоев, от скорости осаждения.

Характер профиля толщины на поверхности детали, сформированного в вакууме с использованием круглой диафрагмы при одинарном вращении (рис. 1), имеет некоторые особенности (рис. 2):

- наличие зоны с максимальным или минимальным значением постоянной толщины в центральной части подложки;
- зона с переменным профилем толщины начинается от максимального или минимального значения и заканчивается минимальным значением толщины на краю детали или на некотором расстоянии от центра;
- характер переменного профиля толщины на рис. 2.1 является близким для всех случаев с максимальной толщиной в центре детали; аналогично, профиль толщины на рис. 2.2 является близким для всех случаев с минимальной толщиной.

Учитывая эти особенности, необходимо оценить влияние каждого параметра оснастки отдельно и в совокупности на распределение толщины. При проведении оценок взаимного влияния рассматриваемых параметров на профиль толщины необходимо учитывать, что они имеют ограничения линейных размеров. Это связано с тем, что взаимное расположение элементов оснастки при одинарном вращении определяется конструктивными особенностями и габаритами вакуумной установки ВУ1-А.

Рассмотрим влияние каждого параметра на формируемый профиль толщины от-

дельно друг от друга. Параметры взяты в следующих диапазонах: r_{D1}=0.5–60мм, $R_И$=215–235мм, H=480–500мм, h=370–499мм, $\Delta h_{\min} = (H - h) = 1$мм. При проведении оценок определено влияние этих параметров на различные участки покрытия: на радиальные размеры зоны профиля толщины по всей поверхности подложки – ρ_0, зоны постоянной толщины – ρ_{const} и зоны с переменным профилем – ρ_{var}. В табл. 1 представлены результаты расчетов, полученных из выражений (2), которые использовались при проведении оценок этих параметров:

$$\rho_{const} = \left| R_И\left(1 - \frac{H}{h}\right) + \frac{H \cdot r_{D1}}{h} \right|, \ \rho_0 = R_И\left(\frac{H}{h} - 1\right) + \frac{H \cdot r_{D1}}{h}, \qquad (2)$$

где $\rho_{var}=(\rho_0-\rho_{const})$.

Например, при определении влияния r_{D1} на размер зон фиксированными параметрами являются H, h и $R_И$, и выражения (2) можно представить в виде линейной зависимости: $\rho(r_{D1}) = k \cdot r_{D1} + b$, где коэффициент пропорциональности $k = H / h$ определяет интересующую нас зависимость $\rho = f(\Delta r_{D1})$. При определении влияния параметров $R_И$ и H выражения (2) преобразованы в следующие линейные зависимости: $\rho(R_И) = k \cdot R_И + b$ с угловым коэффициентом $k = |1 - H / h|$ и $\rho(H) = k \cdot H + b$ с угловым коэффициентом $k = (r_{D1} \pm R_И) / h$. Для параметра h выражения (2) преобразованы в зависимость $\rho(h) = k \cdot \frac{1}{h} + b$ с коэффициентом $k = H(r_{D1} \pm R_И)$. Следовательно, при постоянных параметрах H, $R_И$, r_{D1} отношение $\Delta\rho / \Delta h$ будет зависеть от h. Выражения в общем виде с угловыми коэффициентами рассмотрены для оценки влияния на зоны ρ_{const} и ρ_0. Для ρ_{var} оценки проводились численно, см. (2). Таблица условно делится на три основных столбца. В первом столбце показана величина изменения радиуса диафрагмы r_{D1} на 0.1мм при различных значениях остальных параметров в заданных пределах. Во втором столбце представлено минимальное и максимальное изменение радиальных размеров зон ρ_{const}, ρ_{var}, ρ_0 для случая, когда в центре детали толщина максимальна $(d/d_0)_Ц$=1 при заданном Δr_{D1}. В третьем столбце – результаты для случая с минимальной толщиной в центре детали $(d/d_0)_Ц$=0. Знак минус показывает, что при увеличении параметра на Δr_{D1} размер зоны уменьшается на $\Delta\rho$. В таблице также представлены результаты влияния параметров $R_И$, H, h на распределение толщины. Сравнивая полученные данные, можно сказать, что при отклонении рассматриваемых параметров на некоторую величину (0.1мм) и постоянстве других наибольшее влияние на радиальный размер зон оказывает радиус диафрагмы r_{D1}. Из табл. 1.1 следует, что при отклонении r_{D1} на постоянную величину максимально и минимально возможные изменения радиальных размеров зон ρ_{const} и ρ_0 при вариации остальных параметров в заданных пределах (см. выше) совпадают по абсолютному значению в случае с максимальной и минимальной толщиной в центре детали. Исключение составляет изменение зоны с переменным профилем толщины. Параметр $R_И$ оказывает наименьшее влияние на размер зон ρ_{const} и ρ_0. При его отклонении изменения зон ρ_{const} и ρ_0 также совпадают по абсолютной величине для d/d_0=1 и d/d_0=0, табл. 1.2. Из табл. 1.3 и 1.4 следует, что параметры H и h оказывают близкое по абсолютному значению влияние на радиальные размеры зон покрытия, но противоположны по знаку. Однако не следует забывать, что отклонения значений $R_И$, H и h от расчетных во время осаждения являются наибольшими по абсолютной величине.

Итак, показано, что влияние различных технологических факторов может привести к изменению характера распределения покрытия. В некоторой точке подложки толщина градиентного покрытия изменится, вследствие отклонения реальных параметров от расчетных, используемых в процессе моделирования.

1												
$R_И$=215÷235, H=480÷500, h=370÷499, мм	ρ, $(d/d_0)_Ц$=1						ρ, $(d/d_0)_Ц$=0					
ΔrD_1, мм	$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм		$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм	
	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax
0.1	0.100	0.135	0	0	0.100	0.135	-0.100	-0.135	0.200	0.270	0.100	0.135

2												
rD_1=0.5÷60, H=480÷500, h=370÷499, мм	ρ, $(d/d_0)_Ц$=1						ρ, $(d/d_0)_Ц$=0					
$\Delta R_И$, мм	$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм		$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм	
	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax
0.1	-0.0002	-0.035	0.0004	0.070	0.0002	0.035	0.0002	0.035	0	0	0.0002	0.035

3												
rD_1=0.5÷60, $R_И$=215÷235, h=370÷499, мм	ρ, $(d/d_0)_Ц$=1						ρ, $(d/d_0)_Ц$=0					
ΔH, мм	$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм		$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм	
	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax
0.1	-0.032	-0.049	0.086	0.127	0.043	0.080	0.043	0.063	0.0002	0.033	0.045	0.080

4												
rD_1=0.5÷60, $R_И$=215÷235, H=480÷500, мм	ρ, $(d/d_0)_Ц$=1						ρ, $(d/d_0)_Ц$=0					
Δh, мм	$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм		$\Delta\rho_{const}$, мм		$\Delta\rho_{var}$, мм		$\Delta\rho_0$, мм	
	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax	Δmin	Δmax
0.1	0.031	0.065	-0.086	-0.174	-0.043	-0.109	-0.045	-0.086	-0.0002	-0.044	-0.045	-0.108

Таблица 1 Изменение радиального размера зон ρ_{const}, ρ_{var}, ρ_0 покрытия с переменным профилем толщины в зависимости от изменения: 1. rD_1 - радиуса диафрагмы D_1, 2. $R_И$ - расстояния между испарителем и центром вращения подложки, 3. H - расстояния от испарителя И до поверхности подложки, 4. h - расстояния от испарителя И до диафрагмы D_1h.

Для представленных типов распределений (рис.2) изменение толщины на разных участках профиля градиентной пленки различны. Можно выделить несколько участков, которые будут характеризоваться величиной $\Delta d/\Delta\rho$: область, близкая к границе перехода из зоны с постоянной толщиной в зону с переменной толщиной (А, рис. 2), область

перехода переменного профиля в нулевую толщину на краю детали (B, рис. 2) и область переменного профиля толщины (C, рис. 2).

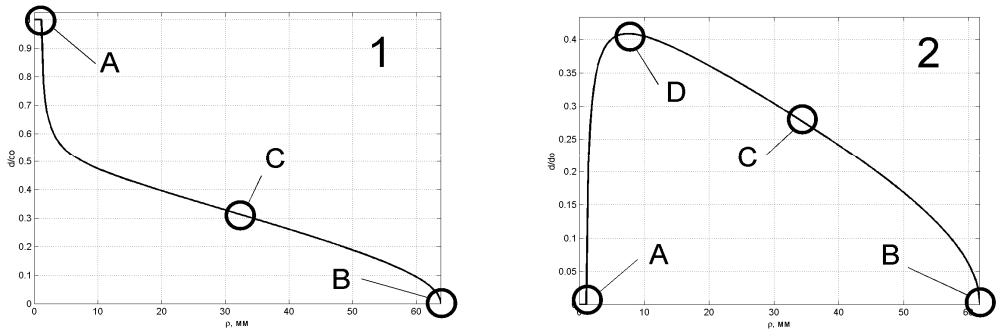


Рис. 2 Типы профилей градиентных слоев: 1. с максимальной толщиной в центре детали, 2. с минимальной толщиной в центре детали, (радиус зоны постоянной толщины ≈1 мм)

$\Delta\rho$, мм	$\Delta(d/d_0)$, $(d/d_0)_Ц$=1		$\Delta(d/d_0)$, $(d/d_0)_Ц$=0	
	A	C	A	C
0.1	≈0.008÷0.25	≈0.0005÷0.07	≈0.001÷0.14	≈0.0002÷0.01

Таблица 2 Изменение относительной толщины $\Delta(d/d_0)$ в зависимости от радиальной координаты ρ с шагом $\Delta\rho$=0.1мм, при различных параметрах оснастки и ∅ подложки с покрытием < 170 мм.

В табл. 2 представлено изменение относительной толщины $\Delta(d/d_0)$ в зависимости от радиальной координаты. Эти результаты характеризуют профиль толщины слоя, т.е. определяют его крутизну на различных участках для случаев с максимальной $(d/d_0)_Ц$=1 и минимальной толщиной $(d/d_0)_Ц$=0 в центре детали. Расчет профилей и оценки проводились при следующих параметрах оснастки: неизменные параметры – $R_И$=225мм, H=490мм; параметры, изменяющиеся в заданных пределах – h=370÷489мм, r_{D1}>1мм. Верхняя граница параметра r_{D1}≈75мм. Установленные параметры оснастки определяются конструкцией оснастки и габаритами вакуумной камеры. В первом столбце – величина изменения радиального размера ρ покрытия. Следующие два основных столбца содержат изменения относительной толщины в зонах A и C (рис. 2), соответствующие рассмотренным вариантам, для профилей толщины с максимальной $(d/d_0)_Ц$=1 и минимальной $(d/d_0)_Ц$=0 толщиной в центре детали, соответственно, первый и второй столбец. Участки профилей толщины A и C являются наиболее интересными. В области A, на участке с переменным профилем после зоны постоянной толщины, наблюдается наибольшее изменение толщины, и в таблице представлены возможные перепады толщины на первых (от зоны ρ_{const}) 0.5мм зоны ρ_{var}. Отмечено, что для профилей, рассчитанных при одинаковых Δh (рис. 1), наибольшие перепады толщины проявляются в тех случаях, когда отношение радиальных размеров зон ρ_{const} к ρ_0 минимально, т.е. чем меньше зона ρ_{const}, тем больше перепад толщины на участке A. Максимальные изменения толщины, представленные в таблице, наблюдаются при минимальном Δh (рис. 1), что связано с минимальным размером зоны ρ_{var} при постоянном шаге Δρ. Эти свойства также относятся к выделенной части профиля B, однако, здесь изменение относительной толщины $\Delta(d/d_0)$ от Δρ в несколько раз меньше. В зоне с переменным профилем ρ_{var} выделен условно линейный участок C, на котором зависимость толщины от радиальной

координаты минимальна. Длина этого отрезка и коэффициент линейности на нем также зависят от отношения зон ρ_{const} и ρ_0. Чем меньше отношение ρ_{const}/ρ_0, тем меньше толщина зависит от ρ и тем больше длина "линейного" участка C. В профиле с минимальной толщиной в центре детали выделена небольшая область D (рис. 2.2), толщина в которой практически не изменяется. Размеры отрезка D обратно пропорциональны размеру зоны ρ_{const} и пропорциональны диаметру диафрагмы D_1, (параметр r_{D1}).

Однако конечной контролируемой характеристикой при создании градиентных пленочных систем является не толщина слоя или слоев, а распределение пропускания $T(\rho)$ или отражения $R(\rho)$. В многослойных диэлектрических системах, содержащих слои с переменным профилем толщины, спектральная характеристика задается сложными математическими выражениями. Так как толщина покрытия в некоторой точке на поверхности подложки определяет величину коэффициента отражения пленочной системы [4], то рассмотренные факторы, влияющие на профиль толщины, будут влиять на распределение $R(\rho)$. Для пленочных систем с разной структурой влияние на $R(\rho)$ различно.

Рассмотрим пример реализации зеркала со следующими параметрами. На поверхности подложки (стекло К8) диаметром 46мм необходимо сформировать пленочную систему, которая обеспечивала бы в центральной зоне, ограниченной радиальным размером $\rho_{const}\approx 6.6$мм, на заданной длине волны λ_0 коэффициент отражения $R_{\lambda 0}\approx 74\%$. На краю детали с радиальным размером $\rho\approx 22$мм необходимо обеспечить остаточный коэффициент отражения $R_{ост}<0.5\%$. Максимальный коэффициент отражения будет обеспечивать 7-слойная диэлектрическая система: $n_S/B_1/H_2/B_3/H_4/B_5/H_6/B_7$, где $n_S=1.52$, $n_B=1.92$, $n_H=1.45$. Были рассмотрены различные варианты зависимостей 7-слойных систем данного типа [5], из которых была выбрана конструкция, удовлетворяющая значениям R^{max} и $R_{ост}$ и при этом содержащая минимальное количество слоев с переменным профилем толщины 1+1(3,6) (рис. 3). Далее, подобрав параметры оснастки H=490мм, h=465мм, $R_И$=225мм, r_{D1}=17.8мм, рассчитываем распределение толщины слоев, при котором на краю детали $R_{ост}<0.5\%$. Для данной конструкции это условие выполняется на участке $\rho\in(21.3;22.6)$мм. Была выбрана дополнительная пленочная конструкция 2+1+1(1,2,5,7) (рис. 3 – нижний ряд), удовлетворяющая условиям R^{max} и $R_{ост}$. В данной конструкции профиль толщины, при котором обеспечивается заданное распределение $R(\rho)$, рассчитан при следующих параметрах: H=490мм, h=460мм, $R_И$=225мм, r_{D1}=20мм. Дополнительным критерием выбора данной системы является то, что условие минимального отражения $R_{ост}<0.5\%$ выполняется на значительно большем участке $\rho\in(20.6;24.6)$мм. Следовательно, влияние различных ошибок, приводящих к отклонению профиля толщины слоев, в последней конструкции будет минимально в зоне с минимальным отражением, т.е. будет выполняться поставленная задача – получение заданного $R(\rho)$.

Характер распределения $R(\rho)$ многослойной диэлектрической системы по поверхности детали (подложки) будет определяться следующим:

- оптической толщиной слоев в центре детали;
- порядковым номером и показателем преломления слоев с переменным профилем толщины;
- характером распределения толщины слоев по поверхности детали.

Первая характеристика определяет величину R в центральной зоне образца. Вторая оказывает влияние как на величину коэффициента отражения, так и на его распределение по поверхности подложки. Особое внимание следует уделить третьему фактору, так как управление распределением толщины слоя или слоев по радиальной координате является главной задачей при формировании покрытий с заданным распределением $R(\rho)$.

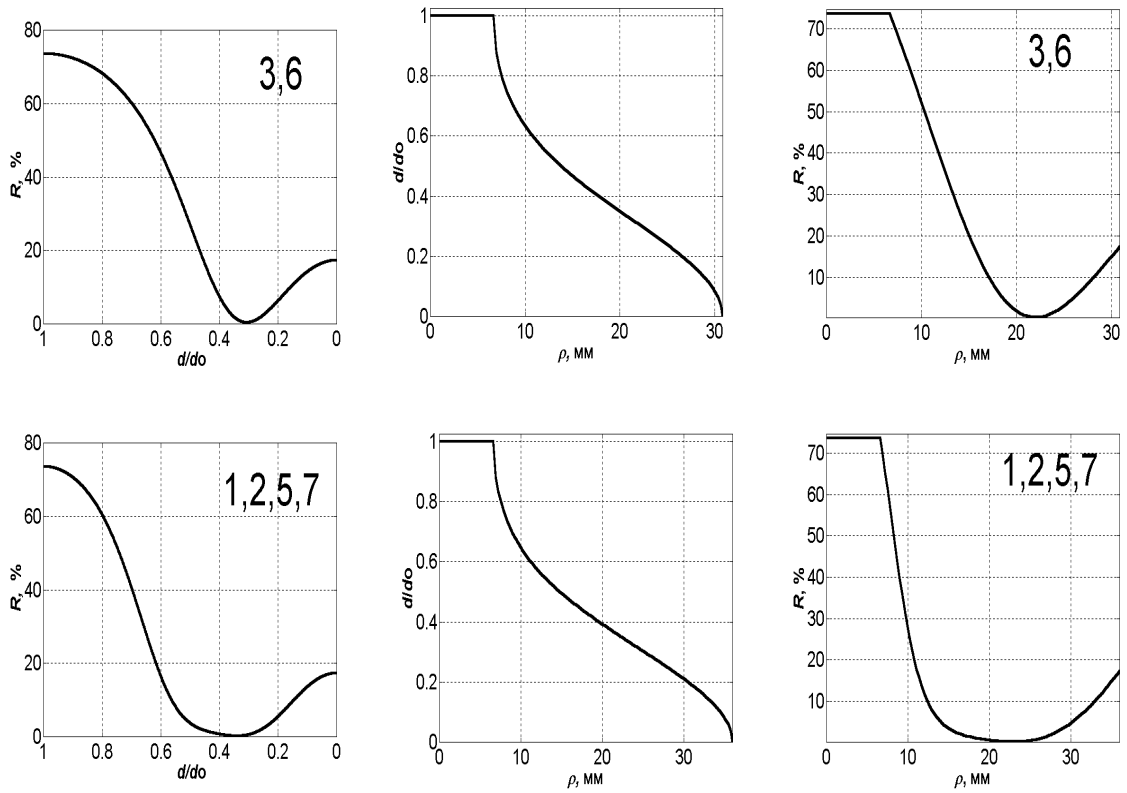


Рис. 3. Варианты конструкций диэлектрических пленочных систем, обеспечивающих: $R^{max}\approx 74\%$ на $\rho_{const}\approx 6.6$мм, $R_{ост}<0.5\%$ на $\rho\approx 22$мм: 3,6 – (верхний ряд) структура 1+1(3,6), $R_{ост}<0.5\%$ при $\rho\in(21.3;\ 22.6)$мм, 1,2,5,7 – (нижний ряд) структура 2+1+1(1,2,5,7), $R_{ост}<0.5\%$ при $\rho\in(20.6;\ 24.6)$мм.

В работе проведена оценка влияния параметров оснастки на зоны градиентных покрытий двух типов: с максимальной и минимальной толщиной в центре детали. Определено, что наибольшее влияние оказывает параметр r_{D1}, наименьшее – $R_И$. Показано, что влияние параметров на профиль толщины покрытия на разных участках различно. Рассмотрен пример выбора пленочных систем, обеспечивающих заданное распределение коэффициента отражения $R(\rho)$.

Литература

1. Большанин А.Ф., Жиглинский А.Г., Парчевский С.Г., Путилин Э.С. Формирование пленок постоянной толщины на осесимметричной подложке // ОМП. 1978. №3. С.39-42.
2. Жиглинский А.Г., Путилин Э.С. Оптимальные условия формирования однородных тонких пленок // ОМП. 1971. №9. С. 46–49.
3. Борн М. , Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
4. P. H. Berning, Theory and calculations of optical thin films // In: "Physics of Thin Films (advanced in research and development)/ Vol.1" Ed. By G. Hass: Academic Press, p. 84-91, 1963.
5. Дмитренко В.А. Технология получения тонкопленочных покрытий с переменным отражением. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. (05.11.07) СПб ГУИТМО, - СПб, 2004. 20 с.

НЕСФЕРИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ИХ АППРОКСИМАЦИИ

В.А. Зверев, Г.Э. Романова

Поверхность вращения образуется вращением плоской кривой вокруг некоторой оси, например, вокруг оси z. При этом в общем случае поверхность вращения определяется уравнением вида:

$$z = f(\sqrt{x^2 + y^2}).$$

Поверхность вращения второго порядка принято определять уравнением

$$x^2 + y^2 = 2r_0 z - (1+\sigma)z^2, \qquad (1)$$

где σ – коэффициент «деформации» сферической поверхности, равный отрицательной величине квадрата эксцентриситета кривой второго порядка, т.е. $\sigma = -e^2$.

Расстояние между вершинами кривой, описываемой уравнением второго порядка, обозначим $O_1O_2 = 2a$, а расстояние между геометрическими фокусами кривой обозначим $F_1F_2 = 2c$. При этом эксцентриситет кривой $e = \frac{c}{a}$. При совмещении геометрических фокусов кривой в одной точке, т.е. при $c = 0$, уравнение (1) определяет сферическую поверхность, наиболее широко применяемую при композиции оптических систем. Поперечные аберрации третьего порядка в изображении точки, образованном лучами в меридиональной и сагиттальной плоскостях, соответственно равны [1]:

$$-2n'\delta g' = \sigma_t'(\sigma_t'^2 + \sigma_s'^2)S_I + (3\sigma_t'^2 + \sigma_s'^2)wS_{II} + \sigma_t' w^2(3S_{III} + J^2 S_{IV}) + w^3 S_V \qquad (2)$$

$$-2n'\delta G' = \sigma_s'(\sigma_t'^2 + \sigma_s'^2)S_I + 2\sigma_t'\sigma_s' wS_{II} + \sigma_s' w^2(S_{III} + J^2 S_{IV}) \qquad (3)$$

где σ_s', σ_t' – апертурные углы, образованные крайними лучами осевого пучка с оптической осью в пространстве изображений в меридиональной и сагиттальной плоскостях; w – угол, образованный главным лучом с оптической осью в пространстве предметов (полевой угол). Коэффициенты S_I, – S_V как функции углов α, образованных осевым виртуальным лучом с оптической осью, расстояний h и H от оптической оси до точек пересечения осевого и главного виртуальных лучей с главными плоскостями оптических поверхностей и коэффициентов «деформации» σ сферических поверхностей определяются выражениями:

$$S_I = \sum_{i=1}^{i=n} h_i Q_i,$$

$$S_{II} = \sum_{i=1}^{i=n} H_i Q_i - J\sum_{i=1}^{i=n} W_i,$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i^2}{h_i} Q_i - 2J\sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i}{h_i} W_i + J^2 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\nu_{i+1}\alpha_{i+1} - \nu_i\alpha_i}{h_i},$$

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\nu_i\alpha_{i+1} - \nu_{i+1}\alpha_i}{h_i},$$

$$S_V = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i^3}{h_i^2} Q_i - 3J\sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i^2}{h_i^2} W_i + J^2 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{H_i}{h_i^2}[3(\nu_{i+1}\alpha_{i+1} - \nu_i\alpha_i) + (\nu_i\alpha_{i+1} - \nu_{i+1}\alpha_i)] - J^3 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\nu_{i+1}^2 - \nu_i^2}{h_i^2},$$

где $Q_i = T_i\sigma_i + P_i$, $W_i = \dfrac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\nu_{i+1} - \nu_i}(\nu_{i+1}\alpha_{i+1} - \nu_i\alpha_i)$, $P_i = \dfrac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\nu_{i+1} - \nu_i}W_i$, $T_i = \dfrac{(n_{i+1}\alpha_{i+1} - n_i\alpha_i)^3}{(n_{i+1} - n_i)^2}$,

$\nu_i = \dfrac{1}{n_i}$. Инвариант Лагранжа –Гельмгольца $J = n'\alpha' l'$.

При известных внешних и внутренних (конструктивных) параметрах оптической системы приведенные соотношения позволяют определить величину аберраций третьего порядка, вносимых оптической системой в образованное ею изображение. Однако применение теории аберраций третьего порядка имеет практический смысл при решении обратной, наиболее сложной, задачи определения конструктивных параметров оптической системы при заданных (или требуемых) значениях аберраций.

Радиус кривизны r_0 в вершине поверхности второго порядка принимает значение в весьма широких пределах: $0 < | r_0 | < \infty$. При больших значениях абсолютной величины радиуса r_0 пользоваться уравнением (1) неудобно. Решив уравнение (1) относительно z, получаем:

$$z = \frac{1}{r_0}\frac{x^2 + y^2}{1 + \sqrt{1 - (1-\sigma)\dfrac{x^2 + y^2}{r_0^2}}}. \qquad (4)$$

Образующую кривую любой несферической поверхности вращения можно рассматривать как эвольвенту некоторой эволюты, при этом любая эволюта определяет семейство эвольвент, включая и исходную. При этом естественно предположить, что поверхности, определяемые уравнениями (1) и (4), не исчерпывают возможностей и свойств других несферических поверхностей. Профессор М.М. Русинов впервые обнаружил весьма важные аберрационные свойства, присущие эвольвентным поверхностям [2].

Обратимся к рис. 1, на котором показаны эвольвента окружности радиуса R. При вращении верхней и нижней ветвей эвольвенты вокруг некоторой линии, принятой в качестве оси вращения (оптической оси), образуются две поверхности вращения, соприкасающиеся вершинами в осевой точке и имеющие одинаковый радиус кривизны в этой точке, равный r_0. Поскольку обе поверхности образуются вращением, по сути дела, одной и той же кривой, их можно назвать бинарной (от лат. *binaris* – двойной) поверхностью.

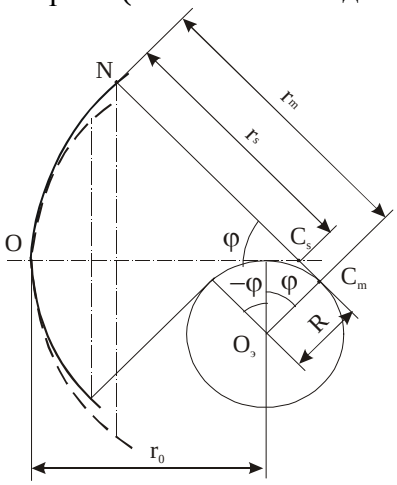


Рис.1. Эвольвентная поверхность

Пусть нормаль к верхней кривой эвольвенты в некоторой точке N образует с оптической осью угол φ. При этом в соответствии с рисунком меридиональный r_t и сагиттальный r_s радиусы кривизны поверхности вращения в точке N равны:

$$r_t = r_0 + R\varphi,\ r_S = r_t - Rtg\frac{\varphi}{2}.$$

Пусть осевая точка предмета расположена на бесконечно большом расстоянии от преломляющей поверхности, образованной вращением эвольвенты и разделяющей среды с показателями преломления n_1 и n_2. При этом луч, выходящий из осевой точки предмета, падает на преломляющую поверхность в точку N параллельно оптической оси на расстоянии m от нее. Пусть нормаль к поверхности в точке N (в точке падения луча) образует угол φ с оптической осью, как показано на рис. 2, и пересекает ее в точке C_s.

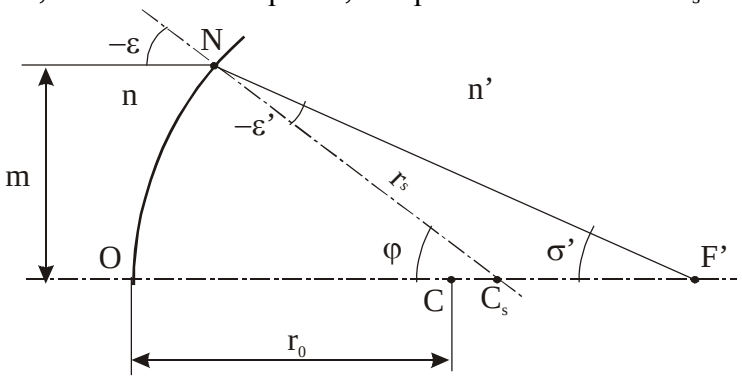


Рис. 2. Аберрации осевого пучка

Преломленный в точке N луч пересекает оптическую ось в точке F' под углом σ′ к ней. Буквой O обозначена вершина преломляющей поверхности. При этом в соответствии с рис. 2 отрезки OC_s и C_sF' равны

$$OC_s = r_0 + Rtg\frac{\varphi}{2} = r_0 + R\frac{\sin\varphi}{1+\cos\varphi}, \tag{5}$$

$$C_sF' = -r_s\frac{\sin\varepsilon'}{\sin\sigma'} = -r_s\frac{\sin\varepsilon'}{\sin(\varphi+\varepsilon')},$$

где угол ε падения луча и угол преломления ε′ взаимосвязаны законом преломления: $n_1\sin\varepsilon = n_2\sin\varepsilon'$. В рассматриваемом случае угол $-\varepsilon = \varphi$. При этом при $n_1 = 1$ и $n_2 = n$ имеем:

$$C_sF' = r_s\frac{\sqrt{n^2-\sin^2\varphi}+\sqrt{1-\sin^2\varphi}}{n^2-1}. \tag{6}$$

В соответствии с рисунком отрезок $OF' = OC_s + C_sF'$. Используя соотношения (5) и (6), получаем:

$$OF' = r_0 + R\frac{\sin\varphi}{1+\sqrt{1-\sin\varphi^2}} + r_s\frac{\sqrt{n^2-\sin^2\varphi}+\sqrt{1-\sin^2\varphi}}{n^2-1}. \tag{7}$$

Выражение, определяющее радиус кривизны в некоторой точке поверхности в сагиттальной плоскости, удобно представить в виде

$$r_s = r_0 + R\left[\arcsin(\sin\varphi) - \frac{\sin\varphi}{1+\sqrt{1-\sin^2\varphi}}\right]. \tag{8}$$

Из выражений (7) и (8) следует, что при φ = 0 радиус $r_s = r_0$, а отрезок $OF_0' = \frac{n}{n-1}r_0$. При этом продольная сферическая аберрация в изображении точки равна $\Delta s' = OF' - OF_0'$

Применив полученные соотношения, находим, что

$$\Delta s' = \frac{r_0}{n-1} + R\frac{\sin\varphi}{1+\sqrt{1-\sin\varphi^2}} + r_s\frac{\sqrt{n^2-\sin^2\varphi}+\sqrt{1-\sin^2\varphi}}{n^2-1}. \tag{9}$$

Естественно предположить, что $\left|\frac{R}{r_0}\right| < 1$ и $|\sin\varphi| < 1$. Тогда, используя выражения (9) и (8), продольную сферическую аберрацию можно определить степенным рядом Маклорена в виде

$$\Delta s' = \frac{1}{2}\frac{n}{n-1}R\sin\varphi - \frac{1}{2n}\frac{r_0}{n-1}\sin^2\varphi + \frac{1}{8}\left(1+\frac{1}{3n}\frac{n-6}{n-1}\right)R\sin^3\varphi -$$
$$-\frac{1}{8}\frac{n^3+1}{n^3}\frac{r_0}{n^2-1}\sin^4\varphi + \frac{1}{16}\left(1+\frac{1}{15n}\frac{3n-5}{n-1}-\frac{1}{n^2-1}\frac{n^3+1}{n^3}\right)R\sin^5\varphi - \ldots \qquad (10)$$

В соответствии с рисунком имеем: $\varphi = \varepsilon = \varepsilon' + \sigma'$. При этом

$$n\sin\varphi = \sin\varphi\cos\sigma' + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}\,\sin\sigma'$$

Отсюда находим, что

$$\frac{n^2 - \sin^2\varphi}{\sin^2\varphi} = \frac{(n-\cos\sigma')^2}{\sin^2\sigma'}.$$

Эти выражения легко преобразовать к виду

$$\sin\varphi = \frac{n\sin\sigma'}{\sqrt{1+n^2-2n\cos\sigma'}}.$$

Будем приближенно считать, что

$$\sin\varphi = \frac{n\sigma'}{n-1}. \qquad (11)$$

Заметим, что вносимая в изображение точки эвольвентной поверхностью вращения продольная сферическая аберрация не должна зависеть от знака угла σ'. Поэтому, используя соотношение (11), поперечную сферическую аберрацию, вносимую в изображение осевой точки поверхностью вращения, в соответствии с выражением (10) определим степенным рядом вида

$$\delta g' = \frac{1}{2}\frac{n^2}{(n-1)^2}R\sigma'\sqrt{\sigma'^2} - \frac{1}{2n}\frac{n}{(n-1)^3}r_0\sigma'^3 + \frac{1}{8}\left(1+\frac{1}{3n}\frac{n-6}{n-1}\right)\frac{n^3}{(n-1)^3}R\sigma'^3\sqrt{\sigma'^2} -$$
$$-\frac{1}{8}\frac{n}{n^2-1}\frac{n^3+1}{(n-1)^4}r_0\sigma'^5 + \ldots \qquad (12)$$

Поперечная сферическая аберрация в изображении точки, образованном традиционной несферической поверхностью вращения, определяется степенным рядом, содержащим нечетные степени функции $\sin\sigma'$. Степенной ряд (12), определяющий сферическую аберрацию в изображении точки, образованном бинарной поверхностью вращения, включает члены, содержащие не только нечетные, но и четные степени функции $\sin\sigma'$.

Пусть сферическая аберрация определяется первыми двумя членами ряда (12):

$$\delta g' = \frac{1}{2}\frac{n^2}{(n-1)^2}R\sigma'\sqrt{\sigma'^2} - \frac{1}{2n}\frac{n}{(n-1)^3}r_0\sigma'^3. \qquad (13)$$

Положив при некотором (выбранном) значении $\sigma' = \sigma'_k$ сферическую аберрацию $\delta g'(\sigma'_к) = 0$, получаем:

$$R = \frac{r_0}{n-1}\frac{\sqrt{\sigma'^2_k}}{n}.$$

При $\sigma'_k = k\sigma'_{кр}$ выражение (13) можно представить в виде

$$\delta g' = \frac{1}{2}\frac{nr_0}{(n-1)^3}\left(k\sqrt{\sigma'^2_{кр}\sigma'^2} - \sigma'^2\right)\sigma'$$

Пусть, например, $k = \frac{3}{4}$. При этом

$$\delta g' = \frac{1}{8}\frac{nr_0}{(n-1)^3}\left(3\sqrt{\sigma'^2_{кр}\sigma'^2} - 4\sigma'^2\right)\sigma' \qquad (14)$$

Возможный вид кривой сферической аберрации, определяемой выражением (14), показан на рис. 3.

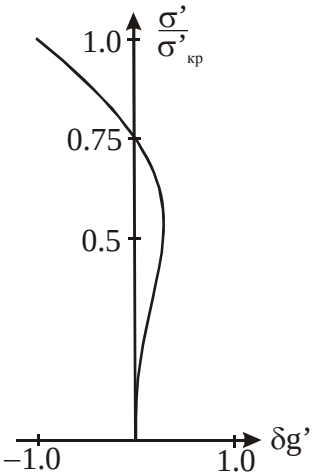


Рис. 3. Сферическая аберрация эвольвентной поверхности

Заметим, что сферическая аберрация в изображении точки, образованном поверхностью, полученной вращением нижней ветви эвольвенты, т.е. при отрицательных значениях угла φ, определяется выражением (12), если при этом знаки перед членами, содержащими угол σ′ в четной степени, изменить на обратные.

Заметим, что при $R = 0$ члены в выражении (12), содержащие угол σ′ в четной степени, обращаются в нуль.

Фокусное расстояние $f' = \frac{m}{\sin\sigma'}$, на рис. 2 равное отрезку NF', находим в соответствии с теоремой синусов из треугольника NC_sF':

$$NF' = \frac{\sin\varphi}{-\sin\varepsilon'}C_sF' = nC_sF'.$$

Используя формулу (6), получаем:

$$f' = nr_s\frac{\sqrt{n^2-\sin^2\varphi}+\sqrt{1-\sin^2\varphi}}{n^2-1}. \qquad (15)$$

При $\varphi = 0$: $f_0' = \frac{n}{n-1}r_0$. При этом отступление от условия синусов δ определяется соотношением

$$\delta = \frac{f'-f_0'}{f_0'} = \frac{r_s}{r_0}\frac{\sqrt{n^2-\sin^2\varphi}+\sqrt{1-\sin^2\varphi}}{n+1}. \qquad (16)$$

Выражение (16) можно представить степенным рядом Маклорена в виде:

$$\delta = \frac{1}{2}\frac{R}{r_0}\sin\varphi - \frac{1}{2n}\sin^2\varphi + \frac{n-6}{24n}\frac{R}{r_0}\sin^3\varphi - \frac{1}{n+1}\frac{n^3+1}{8n^3}\sin^4\varphi + \ldots \qquad (17)$$

Применив приближенное соотношение (11), получаем:

$$\delta = \frac{1}{2}\frac{n}{n-1}\frac{R}{r_0}\sigma' - \frac{1}{2}\frac{n}{(n-1)^2}\sigma'^2 + \frac{n^2}{24}\frac{n-6}{(n-1)^3}\frac{R}{r_0}\sigma'^3 - \frac{1}{8}\frac{n}{n+1}\frac{n^3+1}{(n-1)^4}\sigma'^4 + \ldots \qquad (18)$$

При малой линейной величине y' изображения меридиональная кома определя-

ется формулой [3]:

$$\delta g'_k = y' \frac{d}{d(\sin\sigma')} \left\{ \delta \sin\sigma' + \frac{\delta g'}{s'_p - s'_0} \right\} \tag{19}$$

Здесь $\delta g'$ – поперечная сферическая аберрация, s'_0 – расстояние от вершины поверхности до параксиального изображения осевой точки предмета, s'_p – расстояние от вершины поверхности до осевой точки выходного зрачка. Заметим, что меридиональная кома, вносимая в изображение внеосевой точки эвольвентной поверхностью, не должна зависеть от знака угла σ'.

В рассматриваемом случае удобно принять $s'_p = \infty$. Полагая при этом $\sin\sigma' \approx \sigma'$, получаем:

$$\delta g'_k = y' \left[\frac{n}{n-1} \frac{R}{r_0} \sqrt{\sigma'^2} - \frac{3}{2} \frac{n}{(n-1)^2} \sigma'^2 + \frac{n^2}{6} \frac{n-6}{(n-1)^3} \frac{R}{r_0} \sigma'^2 \sqrt{\sigma'^2} - \frac{5}{8} \frac{n}{n+1} \frac{n^3+1}{(n-1)^4} \sigma'^4 + \ldots \right]. \tag{20}$$

Меридиональная кома в изображении точки, образованном традиционной несферической поверхностью вращения, определяется степенным рядом, содержащим четные степени функции $\sin\sigma'$. Степенной ряд (20), определяющий меридиональную кому в изображении точки, образованном бинарной поверхностью вращения, включает члены, содержащие не только четные, но и нечетные степени функции $\sin\sigma'$.

Пусть меридиональная кома в изображении точки определяется первым двумя членами ряда (20):

$$\delta g'_k = y' \left[\frac{n}{n-1} \frac{R}{r_0} \sqrt{\sigma'^2} - \frac{3}{2} \frac{n}{(n-1)^2} \sigma'^2 \right]. \tag{21}$$

Положив при некотором значении $\sigma' = \sigma'_k$ меридиональную кому $\delta g'_k(\sigma'_k) = 0$, получаем:

$$R = \frac{3}{2} \frac{r_0}{n-1} \sqrt{\sigma'_k}\ .$$

При $\sigma'_k = k\sigma'_{кр}$ выражение (21) можно представить в виде

$$\delta g'_k = \frac{3}{2} \frac{n}{(n-1)^2} (k\sqrt{\sigma'^2_{кр}} - \sqrt{\sigma'^2})\, y' \sqrt{\sigma'^2}\ .$$

Положение оптически сопряженных точек для бесконечно узких пучков лучей в меридиональной плоскости определяется формулой

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{s'_m} - \frac{n \cos^2 \varepsilon}{s_m} = \frac{n' \cos\varepsilon' - n \cos\varepsilon}{r_m}\ , \tag{22}$$

а в сагиттальной плоскости – формулой:

$$\frac{n'}{s'_s} - \frac{n}{s_s} = \frac{n' \cos\varepsilon' - n \cos\varepsilon}{r_s}\ . \tag{23}$$

Здесь r_m и r_s – радиусы кривизны несферической поверхности в точке падения луча в меридиональной и сагиттальной плоскостях соответственно. Для предмета, расположенного на бесконечно большом расстоянии, из формул (22) и (23) находим:

$$s'_m = \frac{n' \cos\varepsilon' + n \cos\varepsilon}{n'^2 - n^2} n' \cos^2 \varepsilon' r_m\ , \tag{24}$$

$$s'_s = \frac{n' \cos\varepsilon' + n \cos\varepsilon}{n'^2 - n^2} n' r_s\ . \tag{25}$$

Отсутствие астигматизма в изображении точки определяется равенством $s'_m = s'_s$, что равносильно условию

$$r_s = r_m \cos^2 \varepsilon' \qquad (26)$$

Это условие, справедливое для несферической поверхности любой формы, применительно к поверхности вращения второго порядка определяет необходимость совмещения выходного зрачка с одним из геометрических фокусов кривой [4]. Таким образом, для любой поверхности второго порядка существуют два положения анастигматических выходных зрачков. Однако в случае поверхностей, образующих анаберрационное изображение осевой точки, устранение астигматизма в изображении внеосевых точек возможно лишь при одном положении входного зрачка.

Представим условие (26) в виде

$$r_m - r_s = r_m \sin^2 \varepsilon' .$$

Для поверхности с эвольвентным профилем:

$$r_m - r_s = Rtg\frac{1}{2}\varphi .$$

При этом получаем:

$$\sin\varepsilon' = \sqrt{\frac{R}{r_m} tg\frac{\varphi}{2}} = \sqrt{\frac{R}{r_0 + R\varphi}\frac{\sin\varphi}{1+\cos\varphi}} .$$

Применив закон преломления $n'\sin\varepsilon' = n\sin\varepsilon$, можно определить угол ε, а вслед за этим можно найти углы главного луча с осью, w и w',

$$w = \varphi \pm \varepsilon ,\ w' = \varphi \pm \varepsilon' , \qquad (27)$$

которые и определяют два положения анастигматических зрачков эвольвентной поверхности.

На рис. 4 показан эвольвентный профиль преломляющей поверхности, разделяющий среды с показателями преломления $n_1 = 1$, $n_2 = n$. Осевая точка входного зрачка расположена в точке P, определяющей телецентрический ход главного луча в пространстве изображений.

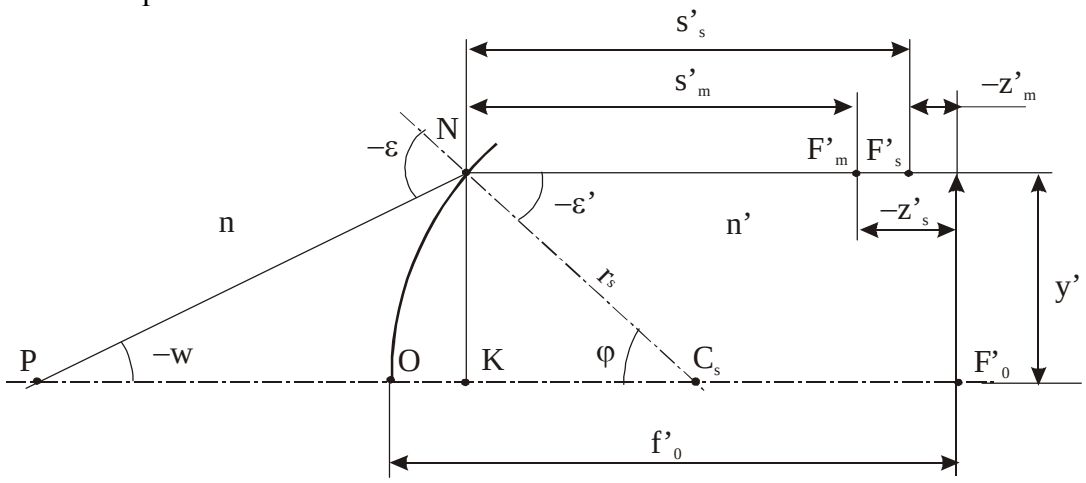


Рис. 4. Астигматизм эвольвентной поверхности

Нормаль к поверхности в точке N падения луча на поверхность образует с оптической осью угол φ, равный углу преломления луча в этой точке, т.е. $\varphi = -\varepsilon'$. Главный луч пересекает гауссову плоскость изображения в точке F'_w на расстоянии y' от оптической оси. В рассматриваемом случае формулы (24) и (25) можно переписать в виде

$$s'_m = \frac{n\cos\varepsilon' + \cos\varepsilon}{n^2 - 1} n\cos^2\varepsilon'(r_0 + R\varphi) , \qquad (28)$$

$$s'_s = \frac{n\cos\varepsilon' + \cos\varepsilon}{n^2 - 1} n(r_0 + R\varphi - Rtg\frac{\varphi}{2}) . \qquad (29)$$

Применяя закон преломления в виде $n\sin\varepsilon' = \sin\varepsilon$ и учитывая тот факт, что $\sin\varphi = -\sin\varepsilon'$, выражения (28) и (29) можно представить степенным рядом Маклорена:

$$s'_m = \frac{n}{n-1}r_0 + \frac{n}{n-1}R\sin\varphi - \frac{1}{2}\left(1+\frac{3}{n-1}\right)nr_0\sin^2\varphi - \frac{1}{6}\frac{3n+5}{n-1}nR\sin^3\varphi - \\ -\frac{1}{8}\left(n-\frac{3}{n-1}\right)n^2 r_0\sin^4\varphi + \ldots, \tag{30}$$

$$s'_s = \frac{n}{n-1}r_0 + \frac{1}{2}\frac{n}{n-1}R\sin\varphi - \frac{1}{2}\frac{n^2}{n-1}r_0\sin^2\varphi - \frac{1}{24}\frac{6n-1}{n-1}nR\sin^3\varphi - \\ -\frac{1}{8}\frac{n^3+1}{n^2-1}n^2 r_0\sin^4\varphi + \ldots \tag{31}$$

В соответствии с рис. 4 отрезок $NF'_w = OF'_0 - OK = f'_0 - OC_s + KC_s$, где $f'_0 = \frac{n}{n-1}r_0$, $KC = r_s\cos\varphi$. Используя формулу (5), в результате преобразований получаем:

$$NF'_w = \frac{r_0}{n-1} - R\sin\varphi + (r_0 + R\varphi)\cos\varphi.$$

Полученное выражение можно представить степенным рядом вида:

$$NF'_w = \frac{n}{n-1}r_0 - \frac{1}{2}r_0\sin^2\varphi - \frac{1}{3}R\sin^3\varphi - \frac{1}{8}r_0\sin^4\varphi - \ldots \tag{32}$$

При этом осевая составляющая искривления поверхности изображения, образованного узкими пучками лучей в меридиональной плоскости, равна

$$z'_m = s'_m - NF'_w = \frac{n}{n-1}R\sin\varphi - \frac{1}{2}\frac{n^2+n+1}{n-1}r_0\sin^2\varphi - \frac{1}{6}\frac{3n^2+3n+2}{n-1}R\sin^3\varphi - \\ -\frac{1}{8}\frac{(n-1)(n^3-1)-3n^2}{n-1}r_0\sin^4\varphi + \ldots \tag{33}$$

Сагиттальная составляющая искривления поверхности изображения равна:

$$z'_s = s'_s - NF'_w = \frac{1}{2}\frac{n}{n-1}R\sin\varphi + \frac{1}{2}\left(1-\frac{n^2}{n-1}\right)r_0\sin^2\varphi + \frac{1}{24}\left(8-n-\frac{5n^2}{n-1}\right)R\sin^3\varphi - \\ -\frac{1}{8}\frac{n^5+1}{n^2-1}r_0\sin^4\varphi + \ldots \tag{34}$$

Из рисунка следует, что $-\varepsilon' = \varphi = w - \varepsilon$. Применив закон преломления, находим, что $\sin\varphi = \sin w\sqrt{1-n^2\sin^2\varphi} + \cos w \cdot n\sin\varphi$. Это выражение легко преобразовать к виду:

$$\sin\varphi = \frac{\sin w}{\sqrt{1-2n\cos w + n^2}}.$$

Приближенно будем считать, что

$$\sin\varphi \approx \frac{w}{1-n}. \tag{35}$$

Меридиональная и сагиттальная составляющая искривления поверхности изображения не зависят от знака угла *w*. Поэтому соотношение (35) запишем в виде

$$\sin\varphi \approx \frac{1}{1-n}\sqrt{w^2}$$

Подставив это соотношение в формулы (33) и (34), получаем:

$$z'_m = \frac{n}{(n-1)^2} R\sqrt{w^2} - \frac{1}{2}\frac{n^3-1}{(n-1)^4} r_0 w^2 - \frac{1}{6}\frac{3n^3-4}{(n-1)^5} R w^2 \sqrt{w^2} - \\ - \frac{1}{8}\frac{(n-1)(n^3-1)-3n^2}{(n-1)^5} r_0 w^4 + \ldots \tag{36}$$

$$z'_s = \frac{1}{2}\frac{n}{(n-1)^2} R\sqrt{w^2} - \frac{1}{2}\frac{n^2-n+1}{(n-1)^3} r_0 w^2 - \frac{1}{24}\frac{6n^2-9n+8}{(n-1)^4} R w^2 \sqrt{w^2} - \\ - \frac{1}{8}\frac{n^5+1}{(n+1)(n-1)^5} r_0 w^4 + \ldots \tag{37}$$

В области аберраций третьего порядка осевая составляющая пецвалевой кривизны z'_p поверхности изображения определяется соотношением [5]:

$$z'_p = \frac{3z'_s - z'_m}{2} \tag{38}$$

Будем считать, что меридиональная и сагиттальная составляющая кривизны поверхности изображения определяются первыми двумя членами соответствующих выражений (36) и (37). Подставив при этом соответствующие выражения в соотношение (38), получаем:

$$z'_{p_э} = \frac{n}{4(n-1)^2} R\sqrt{w^2} - \frac{1}{2}\frac{r_0}{n-1} w^2 = z'_p + \frac{n}{4(n-1)^2} R\sqrt{w^2} \,. \tag{39}$$

Отсюда следует, что замена сферической поверхности эвольвентной приводит к некоторой компенсации кривизны поверхности изображения без изменения ее пецвалевой составляющей.

Из рис. 4 следует, что $y' = r_s \sin\varphi$. Это выражение можно представить степенным рядом вида:

$$y' = r_0 \sin\varphi + \frac{1}{2} R \sin^2\varphi + \frac{1}{24} R \sin^4\varphi + \ldots \tag{40}$$

Вполне очевидно, что величина изображения не изменится, если эвольвентную поверхность дополнить плоской, образовав таким образом плосковыпуклую линзу. При этом номинальная величина изображения определяется соотношением

$$y'_0 = -f'_0 tg w \approx -f'_0\left(w + \frac{1}{3}w^3 + \ldots\right),$$

где $f'_0 = \dfrac{r_0}{n-1}$.

Применив приближенное соотношение (35), выражение (40) можно представить в виде

$$y' = -\frac{r_0}{n-1} w + \frac{1}{2}\frac{R}{(n-1)^2} w^2 + \frac{1}{24}\frac{R}{(n-1)^4} w^4 + \ldots$$

Тогда дисторсия $\Delta y'$ изображения, образованного плосковыпуклой линзой с эвольвентным профилем выпуклой поверхности, равная разности $y' - y'_0$, определится выражением

$$\Delta y' = \frac{1}{2}\frac{R}{(n-1)^2} w\sqrt{w^2} + \frac{1}{3}\frac{r_0}{n-1} w^3 + \frac{1}{24}\frac{R}{(n-1)^4} w^3\sqrt{w^2} + \ldots \tag{41}$$

Профессор М.М. Русинов показал [2], что в изображении, образованном плосковыпуклой линзой с эвольвентным профилем выпуклой поверхности, при плоской поверхности, обращенной к предмету, и при телецентрическом ходе главного луча в пространстве изображений можно получить нулевое значений дисторсии для некоторой

(выбранной) величины полевого угла w. Однако и в рассматриваемом случае возможно решение этой задачи. Действительно, если предположить, что выпуклая поверхность образована вращением нижней ветви эвольвенты окружности, то в выражении (41) перед членами, содержащими четные степени угла w, следует изменить знак на обратный (отрицательный). При этом при $\Delta y' = 0$ получаем:

$$R = \frac{2}{3}\frac{(n-1)\sqrt{w^2}}{1+\frac{1}{12}\frac{w^2}{(n-1)^2}} r_0 \approx 2\frac{n-1}{3} r_0 \sqrt{w^2}\,.$$

Из анализа полученных соотношений следует, что эффективность влияния эвольвентного профиля поверхности вращения на аберрации изображения определяется прежде всего величиной радиуса R. При $R = 0$ эти соотношения определяют аберрации изображения, образованного сферической преломляющей поверхностью.

Как показал профессор А.П. Грамматин [6], поперечными аберрациями второго порядка обладает изображение, образованное оптическими поверхностями, которые получены путем вращения любой плоской кривой вокруг нормали в некоторой ее точке, когда нормаль не является осью симметрии этой кривой. Таким образом, поверхность вращения с эвольвентным профилем можно считать частным случаем несферических поверхностей этого вида.

Образующую кривую такой поверхности можно определить уравнением вида:

$$z = a_1\rho^2 + a_2\rho^3 + \ldots + a_n\rho^{n+1}. \qquad (42)$$

При $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ вращение этой кривой образует одну поверхность, а при $\rho = -\sqrt{x^2 + y^2}$ – другую, как показано на рис. 5. Следовательно, и в этом случае вращение кривой (42) образует бинарную поверхность. При анализе аберраций второго порядка достаточно ограничиться рассмотрением поверхности, представленной уравнением

$$z = a_1\rho^2 + a_2\rho^3.$$

Будем считать, что в рассматриваемом случае

$$z = a_1\rho^2 + a_2\rho^2\sqrt{\rho^2}\,.$$

При этом можно показать [7, 8], что меридиональная и сагиттальная составляющие поперечной аберрации второго порядка определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\delta g' = Q[&s^4m^2(m^2+M^2) + s_p^2s^2l^2(6m^2+M^2) - \\ &- 2s_ps^3lm(2m^2+M^2) - 4s_p^3sl^3m + s_p^4l^4]^{1/2}\operatorname{sign} y,\end{aligned} \qquad (43)$$

$$\delta G' = Q[s^4M^2(m^2+M^2) - 2s_ps^3lmM^2 + s_p^2s^2l^2M^2 + s_p^4l^4]^{1/2}\operatorname{sign} x, \qquad (44)$$

где m и M – координаты падающего луча на входном зрачке в меридиональной и в сагиттальной плоскостях; s и s_p – расстояние от вершины несферической поверхности до плоскостей предмета и входного зрачка, соответственно; $Q = -\frac{3a_2(n'-n)s'}{n'(s_p-s)^2}$ – коэффициент, зависящий от характера деформации поверхности, положения предмета, входного зрачка и плоскости изображения Гаусса (расстояния s′) относительно вершины поверхности.

Весьма обстоятельный анализ свойств геометрических аберраций второго порядка, вносимых в образованное изображение рассматриваемой поверхностью, выполнен профессором А.П. Грамматиным и представлен в работе [9].

Наиболее широко в практике композиции оптических систем применяются несферические поверхности вращения второго порядка, образующую плоскую кривую которых можно определить уравнением

$$\rho^2 = 2r_0 z - (1+\sigma)z^2 \qquad (45)$$

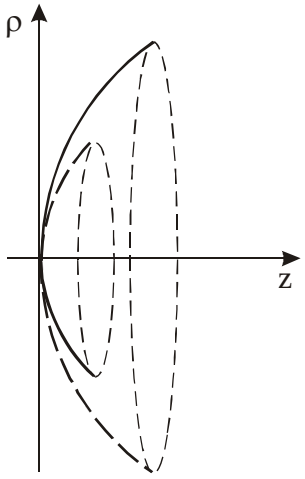


Рис. 5. Бинарная поверхность

Следуя методу, предложенному профессором А.П. Грамматиным, образуем несферическую поверхность путем вращения кривой, определяемой уравнением (45), вокруг нормали к ней в некоторой внеосевой точке $N(\rho_j, z_j)$. При параллельном переносе системы координат ρOz в положение $\rho' Nz'$ в соответствии с рис. 6 имеем:

$\rho = \rho' + \rho_j$, $\rho = z' + z_j$.

В системе координат $\rho' Nz'$ уравнение (45) принимает вид

$$\rho'^2 + 2\rho_j \rho' = 2[r_0 - (1+\sigma)z_j]z' - (1+\sigma)z'^2. \qquad (46)$$

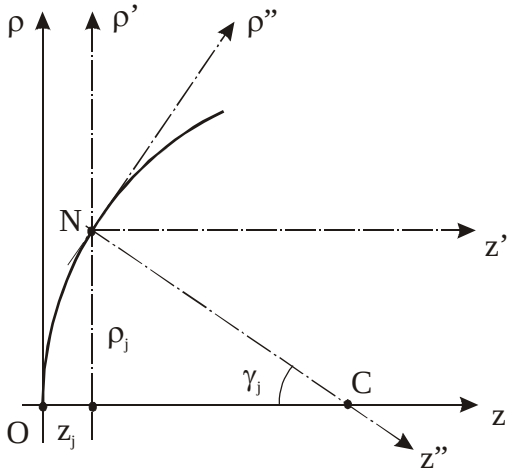


Рис. 6. Образующая кривая второго порядка бинарной поверхности

Нормаль к кривой в произвольной точке образует с ее осью угол γ, тангенс которого в соответствии с уравнением (45) равен:

$$tg\gamma = \frac{dz}{d\rho} = \frac{\rho}{r_0 - (1+\sigma)z}.$$

При этом для точки N имеем:

$$tg\gamma_j = \frac{\rho_j}{r_0 - (1+\sigma)z_j}, \ \sin\gamma_j = \frac{tg\gamma_j}{\sqrt{1+tg^2\gamma_j}}, \ \cos\gamma_j = \frac{\sin\gamma_j}{tg\gamma_j} = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2\gamma_j}}..$$

Повернем систему координат $\rho' N z'$ на угол γ_j в положение $\rho'' N z''$ до совмещения оси Nz'' с нормалью к кривой в точке N. Координаты ρ' и z' произвольной точки в системе координат $\rho'' N z''$ равны:

$$\begin{pmatrix} \rho' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma_j & -\sin\gamma_j \\ \sin\gamma_j & \cos\gamma_j \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \rho'' \\ z'' \end{pmatrix}.$$

При этом уравнение (45) в системе координат $\rho'' N z''$ принимает вид:

$$a\rho''^2 + b\rho'' + c\rho'' z'' + dz'' + ez''^2 = 0, \tag{47}$$

где $a = 1 + \sigma \sin^2 \gamma_j$, $b = 2[(1+\sigma) z_j \sin\gamma_j + \rho_j \cos\gamma_j - r_0 \sin\gamma_j]$, $c = 2\sigma \sin\gamma_j \cos\gamma_j$, $b = 2[(1+\sigma) z_j \cos\gamma_j - \rho_j \sin\gamma_j - r_0 \cos\gamma_j]$, $a = 1 + \sigma \cos^2 \gamma_j$.

При $\rho'' = \sqrt{x^2 + y^2}$ уравнение (47) в форме

$$a(x^2 + y^2) \pm b\sqrt{x^2 + y^2} \pm cz\sqrt{x^2 + y^2} + dz + ez^2 = 0 \tag{48}$$

определяет бинарную поверхность вращения. Заметим, что уравнение (48) представляет собой неявно заданную функцию. Может оказаться удобным представить уравнение (48) в виде

$$z = -\frac{x^2 + y^2 \pm a_1\sqrt{x^2 + y^2} + a_2 z^2}{b_0 \pm b_1\sqrt{x^2 + y^2}}. \tag{49}$$

Уравнение поверхности в форме (49) позволяет определить, например, координаты точки падения луча на поверхность методом итераций. Вполне очевидно, что при $\gamma_j = 0$ коэффициенты $a = 1$, $b = \rho_j = 0$, $c = 0$, $d = 2(1+\sigma) z_j - 2r_0 = -2r_0$, $e = 1$. При этом уравнение (47) принимает вид уравнения (45) (штрихи при соответствующих величинах за ненадобностью опускаем). С другой стороны, при $\gamma_j = \frac{\pi}{2}$ разность $r_0 - (1+\sigma) z_j = 0$. При этом:

$$z_j = \frac{r_0}{1+\sigma}, \quad \rho_j = \sqrt{2r_0 z_j - (1+\sigma) z_j^2} = \frac{\sqrt{1+\sigma}}{1+\sigma} r_0, \quad a = 1+\sigma, \quad b = 2[(1+\sigma) z_j - r_0] = 0,$$

$$c = 0,\ d = -2\rho_j = -2\frac{\sqrt{1+\sigma}}{1+\sigma} r_0,\ e = 1.$$

Подставив эти значения коэффициентов в выражение (47), получаем

$$\rho^2 = 2r_{0\perp} z - (1 + \sigma_\perp) z^2, \tag{50}$$

где $r_{0\perp} = \frac{\sqrt{1+\sigma}}{(1+\sigma)^2}$, $1 + \sigma_\perp = \frac{1}{1+\sigma}$.

Полученное уравнение определяет вещественные значения величины при $\sigma > -1$. При этом при $\rho^2 = x^2 + y^2$ уравнение (50) определяет эллипсоид вращения; если при $\gamma_j = 0$ эллипсоид был вытянутым, то при $\gamma_j = \frac{\pi}{2}$ получаем сплющенный эллипсоид, и наоборот. В общем случае вращение эллипса вокруг нормали к кривой в произвольной точке образует бинарную поверхность, как показано на рис. 7.

Применение несферических поверхностей вращения второго порядка при композиции оптических систем позволяет успешно решать задачу исправления аберраций третьего порядка образованного ими изображения. Однако при сравнительно больших светосиле и угловом поле оптических систем остаточные аберрации высшего порядка принимают нередко недопустимо большие значения, для исправления которых несферические поверхности второго порядка заменяют поверхностями более высокого порядка.

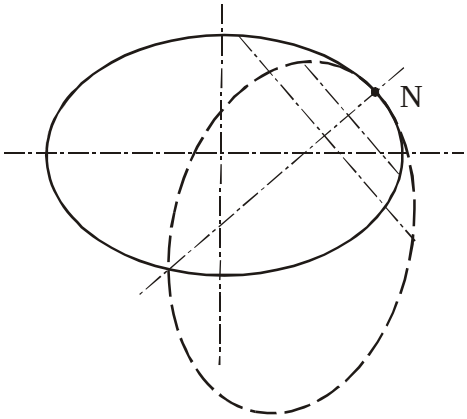


Рис. 7. Сечение бинарной поверхности, образованной вращением эллипса

Такие поверхности традиционно принято представлять уравнениями вида

$$\rho^2 = a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \ldots + a_{n-1} z^{n-1} + a_n z^n, \tag{51}$$

$$z = a_1 \rho^2 + a_2 \rho^4 + \ldots + a_{n-1} \rho^{2(n-1)} + a_n \rho^{2n} \tag{52}$$

или

$$z = \frac{c\rho^2}{1 + \sqrt{1 - (1+\sigma)c^2\rho^2}} + a_1 \rho^2 + \ldots + a_n \rho^{2n}, \tag{53}$$

где $c = \dfrac{1}{r_0}$, $\rho^2 = x^2 + y^2$.

В том случае, когда изменение аберраций в пределах светового пучка лучей имеет весьма нелинейный характер, применение традиционной формы представления несферических поверхностей не всегда решает задачу требуемого исправления аберраций. В этом случае приходится прибегать к поиску другого вида уравнения для аппроксимации формы несферической поверхности.

При контроле несферических отражающих поверхностей астрономических зеркал широко применяется автоколлимационная схема с линзовым компенсатором. Применение такой схемы всегда сопряжено с необходимостью так или иначе решать проблему аттестации компенсатора, поскольку погрешности его изготовления непосредственно влияют на форму волнового фронта, отраженного от контролируемой поверхности, причем как в прямом, так и в обратном ходе лучей. Для проверки точности изготовления деталей и сборки двухлинзового компенсатора схеме контроля формы отражающей поверхности зеркального параболоида диаметром 6.5 м при относительном отверстии 2A = 1:1.25 было использовано эталонное зеркало с несферической поверхностью, имитирующей отражающую поверхность контролируемого параболоида [10], при этом каждый луч, выходящий из компенсатора, падает на поверхность эталонного зеркала по нормали к ней и отражается обратно к компенсатору, как показано на рис.8.

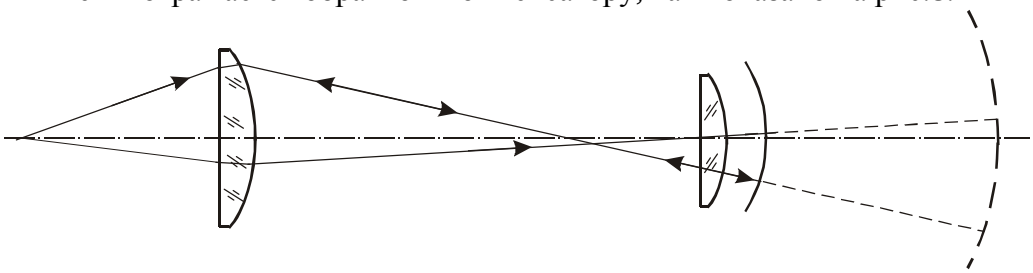


Рис. 8. Оптическая схема контроля компенсатора

Расположенное в непосредственной близости от компенсатора, эталонное зеркало имеет сравнительно небольшой диаметр, что определило возможность обработки его

отражающей поверхности методом алмазного точения на станке с программным управлением. Профиль отражающей поверхности эталонного зеркала, по сути дела, представляет собой эвольвенту эволюты профиля контролируемого параболоида, расположенную вблизи каустики нормалей к поверхности параболоида. Важно заметить, что при постоянном размахе отклонений эвольвенты от окружности с уменьшением диаметра эталонного зеркала нелинейность профиля его отражающей поверхности растет. Поэтому попытка традиционной аппроксимации отражающей поверхности эталонного зеркала уравнением вида (53) даже при использовании десяти коэффициентов степенного ряда привела к огромной величине остаточной деформации волнового фронта [11]. Замена этого уравнения неявной функцией вида

$$F(R,z) = -z + aR^2 + bR^4 + cR^6 + dR^2 z + eR^4 z + \\ + fz^2 + gR^2 z^2 + hz^3 + jR^2 z^3 + kz^4 = 0, \quad (54)$$

где $R = (x^2 + y^2)^{1/2}$, при том же числе коэффициентов позволила уменьшить размах остаточной волновой аберрации на четыре порядка.

Неявная форма представляет собой наиболее общую форму уравнения несферической поверхности. Однако, кроме традиционной, существуют и другие формы уравнений, определяющих несферические поверхности в явном виде.

Так, например, в афокальной оптической системе для расширения лазерного пучка лучей, образованной сочетанием двух светосильных отражающих поверхностей, при сферической форме отражающей поверхности большого зеркала поверхность малого зеркала была аппроксимирована явной функцией вида [11]:

$$F(\rho, z) = -z + b_1\rho^{4/3} + b_2\rho^{6/3} + b_3\rho^{8/3} + b_4\rho^{10/3} + \ldots + b_n\rho^{2(n+1)/3}, \quad (55)$$

где $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$.

Оказалось, что при относительном отверстии поверхностей 2А = 1:1 и аппроксимации отражающей поверхности малого зеркала функцией (55) рассматриваемая афокальная система обладает лучшей коррекцией аберраций, чем при аппроксимации уравнением традиционной формы. Однако при подобной аппроксимации отражающей поверхности малого зеркала в двухзеркальной системе кассегреновского типа при относительном отверстии сферического зеркала 2А = 1:0.7 остаточные аберрации оказались больше, чем при аппроксимации той же поверхности неявной функцией (54) и при традиционном описании поверхности.

Профессор Д.Т. Пуряев показал [12], что при сферической форме большого зеркала форма поверхности малого зеркала в афокальной оптической системе определяется эквидистантной отражающему параболоиду поверхностью, т.е. профиль отражающей поверхности малого зеркала представляет собой эвольвенту эволюты параболы. На рис. 9 показано сечение оптической системы из двух отражающих поверхностей произвольной форма меридиональной плоскостью. На рисунке с вершиной сечения малого зеркала совмещено начало системы координат *yoz*, а с вершиной сечения большого зеркала – начало системы *YOZ*.

В соответствии с рисунком и принципом таутохронизма имеем:

$$ABMN = z + BM - d - Z = -2d, \quad (56)$$

где d – расстояние между отражающими поверхностями.

Из рис. 9 следует, что отрезок ВМ

$$BM = \frac{-d + z - Z}{\cos 2\varphi}. \quad (57)$$

Подставив соотношение (57) в равенство (56) и преобразовав его, получаем

$$Z - z = -d \cdot tg^2\varphi. \quad (58)$$

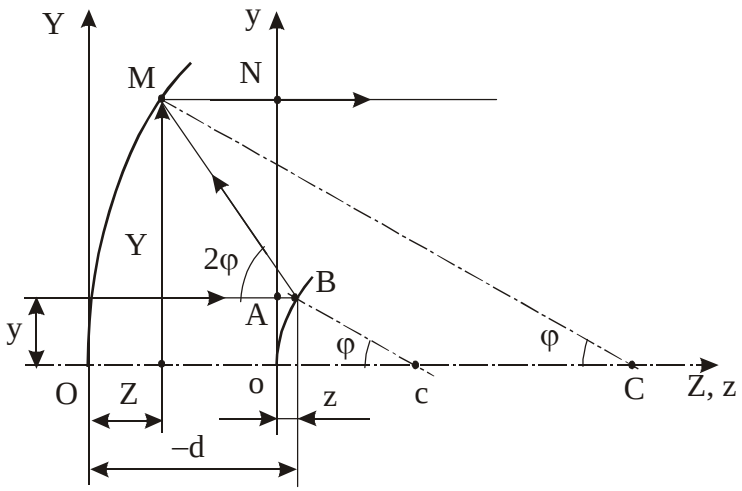


Рис. 9. Афокальная двухзеркальная система со стигматической коррекцией аберраций

Из того же рисунка находим, что

$$Y - y = (-d + z - Z)tg2\varphi. \quad (59)$$

Выполнив в этом выражении в соответствии с соотношением (58) замену величин и преобразовав его, получаем

$$Y - y = -2d \cdot tg\varphi. \quad (60)$$

Для большого зеркала имеем

$$Y = R \cdot \sin\varphi,\ Z = R - R \cdot \cos\varphi,$$

где R – радиус кривизны сферической поверхности. При этом

$$y = R \cdot \sin\varphi + 2d \cdot tg\varphi, \quad (61)$$

$$y = R - R \cdot \cos\varphi + d \cdot tg^2\varphi. \quad (62)$$

Пусть некоторая кривая задана уравнением $y_0 = f_0(z_0)$. Пусть φ – угол между нормалью к кривой и осью z_0. Тогда для эквидистантной кривой $y_э = f(z_э)$, каждая точка которой смещена по нормали к поверхности $y_0 = f_0(z_0)$ на расстояние L, имеем:

$$y_0 - y_э = L \cdot \sin\varphi,$$

$$z_0 - z_э = L - L \cdot \cos\varphi.$$

Пусть кривая $y_0 = f_0(z_0)$ описывает параболу: $y_0^2 = 2r_p z_0$. Для параболы справедливо соотношение: $y_0 = r_p \cdot tg\varphi$. При этом $z_0 = \dfrac{y_0^2}{2r_p} = \dfrac{1}{2} r_p \cdot tg^2\varphi$. В этом случае имеем

$$y_э = y_0 - L \cdot \sin\varphi = r_p \cdot tg\varphi - L \cdot \sin\varphi, \quad (63)$$

$$z_э = z_0 - L + L \cdot \cos\varphi = \frac{1}{2} r_p \cdot tg^2\varphi - L + L \cdot \cos\varphi. \quad (64)$$

Положив $r_p = 2d$, а $L = -R$, получаем

$$y_э = R \cdot \sin\varphi + 2d \cdot tg\varphi, \quad (65)$$

$$z_э = R - R \cdot \cos\varphi + d \cdot tg^2\varphi. \quad (66)$$

Сопоставив выражения (61), (62) и выражения (65), (66), приходим к выводу, что кривая, определяемая формулами (61) и (62), представляет собой кривую, эквидистантную параболе с радиусом кривизны при вершине $r_p = 2d$ и удаленную от последней на расстояние $L = -R$. При этом в выражениях (63) и (64) естественно принять $y_э = y$, $z_э = z$.

Из выражений (63) и (64) соответственно находим, что

$$L \cdot \sin\varphi = r_p \cdot tg\varphi - y\,,$$

$$L \cdot \cos\varphi = z + L - \frac{1}{2} r_p \cdot tg^2\varphi\,.$$

Отсюда следует, что

$$tg\varphi = \frac{r_p \cdot tg\varphi - y}{z + L - \frac{1}{2} r_p \cdot tg^2\varphi}$$

или

$$y = (r_p - L - z)tg\varphi + \frac{1}{2} r_p \cdot tg^3\varphi\,. \qquad (67)$$

Из выражения (63) получаем

$$(r_p tg\varphi - y)^2 (1 + tg^2\varphi) - L^2 tg^2\varphi = 0 \qquad (68)$$

или в развернутом виде

$$r_p^2 tg^4\varphi - 2yr_p tg^3\varphi + (r_p^2 + y^2 - L^2)tg^2\varphi) - 2yr_p tg\varphi + y^2 = 0\,. \qquad (69)$$

Для краткости записи удобно обозначить $tg\varphi = \psi$. Тогда, выразив линейные величины в масштабе радиуса r_p при вершине параболоида, выражения (67) и (69) можно представить в виде

$$\psi^3 + 2(1 - L - z)\psi - 2y = 0\,, \qquad (70)$$

$$\psi^4 - 2y\psi^3 + (1 - L^2 + y^2)\psi^2 - 2y\psi + y^2 = 0\,. \qquad (71)$$

Запишем уравнение (70) в виде

$$\psi^3 + 3p\psi + 2q = 0\,, \qquad (72)$$

где $p = \frac{2}{3}(1 - L - z)$, $q = -y$.

Из уравнения (72) следует, что

$$\psi^3 = 2y - 3p\psi\,,$$

$$\psi^4 = 2y\psi - 3p\psi^2$$

Подставив эти соотношения в выражение (71), получаем:

$$(m - 3p)\psi^2 + 6py\psi - 3y^2 = 0, \qquad (74)$$

где $m = 1 - L^2 + y^2$.

Заметим, что $m - 3p \neq 0$. При этом выражение (74) можно представить в виде

$$\left(\psi + 3\frac{py}{m - 3p}\right)^2 = 9\frac{p^2 y^2}{(m - 3p)^2} + \frac{3y^2}{m - 3p}.$$

Отсюда следует, что

$$\psi = -3\frac{py}{m - 3p} + \sqrt{9\frac{p^2 y^2}{(m - 3p)^2} + 3\frac{y^2}{m - 3p}} = -3\frac{py}{m - 3p}\left(1 - \sqrt{1 + \frac{m - 3p}{3p^2}}\right). \qquad (75)$$

Заменив в этом выражении координату y координатой $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, в результате очевидных, но весьма громоздких преобразований получаем уравнение несферической поверхности, эквидистантной параболоиду вращения, в виде:

$$a_{11}\rho^2 + a_{12}\rho^4 + a_{13}\rho^6 + a_{21}\rho^2 z + a_{31}\rho^2 z^2 + a_{41}\rho^2 z^3 + a_{22}\rho^4 z + a_{32} p^4 z^2 +$$

$$+ b_{11}z + b_{12}z^2 + b_{13}z^3 + b_{14}z^4 = 0, \qquad (76)$$

где

$$a_{11} = 4L(L - r_p)^3\,,$$

$$a_{12} = (r_p - L)^2 - 9L(2r_p + L),$$
$$a_{13} = 4,$$
$$a_{21} = 4(r_p - L)\left(4L^2 + 15Lr_p - r_p^2\right),$$
$$a_{31} = 8\left[(2r_p - L)^2 - 2L(r_p + L)\right],$$
$$a_{41} = -16r_p$$
$$a_{22} = 4(2L - 5r_p),$$
$$a_{32} = 4,$$
$$b_{11} = 8L(r_p - L)^4,$$
$$b_{12} = 4(r_p - L)^2\left[(r_p - L)^2 - 8Lr_p\right],$$
$$b_{13} = 8r_p\left[4Lr_p - (r_p - L)^2\right],$$
$$b_{14} = 16r_p^2.$$

Литература

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
2. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение 1989. 383 с.:
3. Слюсарев Г.Г. Геометрическая оптика.. М.-Л.: АН СССР, 1946. 332 с.
4. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
5. Зверев В.А. Основы геометрической оптики..СПб: СПбГИТМО, 2002. 218 с.
6. Грамматин А.П. Асферические оптические поверхности. // ОМП. 1990. № 2. С. 36, 58, 72.
7. Грамматин А.П., Марчук С.М. Аберрации второго порядка асферической поверхности вращения. // ОМП. 1990. № 6. С. 40-41.
8. Грамматин А.П., Марчук С.М. Асферические оптические поверхности нового типа и их аберрационные свойства. // ОМП. 1990. № 11. С. 55–57.
9. Грамматин А.П. Свойства геометрических аберраций второго порядка. // Оптический журнал. 1994. № 8. С 34-38.
10. J.M. Sasian, S.A. Lerner, and J. Burge. Certification of a null corrector via a diamond turned asphere: design and implementation. // Proc. SPIE 3749, 284-285 (1999).
11. S.A. Lerner, J.M. Sasian. Use of implicitly defined optical surfaces for the design of imaging and illumination systems. // Optical Engineering. 2000. V. 39. № 7. 1796-1801.
12. D.T. Puryayev. Afocal two-mirror system. // Optical Engineering. 1993. V. 32. № 61325-1327.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НА ДИОПТРИМЕТРЕ

А. В. Бахолдин, М. В. Погумирский

Как гласит инструкция по эксплуатации, «диоптриметр оптический служит для измерения задней вершинной рефракции» [1]...

На наш взгляд, прежде чем говорить о приборе, широко применяемом как офтальмологами, так и оптотехниками, следует сказать несколько слов о некоторых особенностях понимания и трактовки базовых понятий и терминов, неразрывно связанных с процессом измерения рефракции линз. К таковым, безусловно, относятся понятия очковой линзы, рефракции, диоптрии и другие. Сегодня, по нашему мнению, имеется разное понимание этих терминов у расчетчиков оптических систем, технологов, изготовляющих очковые линзы и офтальмологов.

Термин «очковая линза». По представлениям офтальмологов, очковые линзы являются пунктуальными: «в очках применяются так называемые пунктуальные линзы, специальная менискообразная форма которых устраняет астигматизм косого падения. Благодаря применению пунктуальных линз угловой размер поля зрения, дающего четкое изображение на сетчатке, увеличивается более чем в три раза по сравнению с угловым размером четкого поля зрения при сферических линзах»[2].

С точки зрения расчетчика оптических систем, у очковых линз исправлен астигматизм (астигматизм наклонных пучков, или изоастигматизм). Данный вопрос описан у Слюсарева [3], который опирается на труды Чернина 1899 года. В действительности в 60-е годы прошлого века был подготовлен и утвержден ГОСТ 4994-68, в котором были указанны точные значения геометрических параметров пунктуальных линз (радиусы поверхностей R_1 и R_2, толщина по центру d, световой диаметр линзы D). Конструктивные параметры были оптимизированы в соответствии с задачей исправления астигматизма наклонных пучков, причем именно для системы очковая линза – глаз.

Для технологов с введением ГОСТ 23265-78 и ГОСТ Р 51044-97 отменено обязательное использование конструктивных параметров, указанных в ГОСТ 4994-68. С введением в действие новых ГОСТов изготавливаемые очковые линзы могут быть не только пунктуальными: «очковая линза – линза, предназначенная для коррекции зрения. Очковая линза характеризуется оптической силой, выражаемой рефракцией»[4]. Основным параметром новых ГОСТов является «задняя вершинная рефракция (выражается в диоптриях) – величина, обратная заднему фокальному отрезку, измеренному в метрах»[4]. Величина задней вершинной рефракции измеряется диоптриметром. Установлены допуски на абсолютное номинальное значение задней вершинной рефракции.

Понятие «рефракция». В учебной литературе по офтальмологии [2, 5] вводится понятие рефракции. Медики различают рефракцию физическую и клиническую. «Физическая рефракция – это преломляющая сила оптической системы глаза, выраженная в условных единицах – диоптриях (дптр). Клиническая рефракция характеризует положение главного фокуса оптической системы глаза по отношению к сетчатой оболочке» [6].

Для расчетчика «рефракция» обозначает, в первую очередь, свойство различных сред и объектов преломлять свет. Вместо термина «рефракция», применяемого в офтальмологии, принято использовать термин «оптическая сила», которая измеряется в диоптриях.

Для технолога «рефракция – величина, обратная фокусному расстоянию очковой линзы, измеренному в метрах» [4].

Понятие «диоптрия». В офтальмологии определения понятия диоптрии и диоптрического исчисления были введены Гульстрандом. В основе этого исчисления лежит понятие конвергенции (сходимости) пучка лучей: «конвергенция, соответствующая главному фокусному расстоянию линзы, характеризует ее преломляющую силу. Если

главное фокусное расстояние измерено в воздухе и выражено в метрах, то соответствующая преломляющая сила линзы выразится в диоптриях. Диоптрия, *D*, есть единица преломляющей силы, равная преломляющей силе линзы, главное фокусное расстояние которой в воздухе равно 1 м» [2]. «За одну диоптрию (дптр) принимается преломляющая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м» [6]. В диоптриях измеряют силу выписываемых линз в рецепте. В диоптриях измеряется также оптическая сила любой системы. Для технолога диоптрия – это величина, которая измеряется им на диоптриметре для контроля очковой линзы на соответствие рецепту врача с допуском по ГОСТ Р 51044-97.

Если теперь обратится к ГОСТ Р 51044-97, то, в свете всего выше сказанного, основным параметром, характеризующим очковую линзу, является задняя вершинная рефракция. «Линза имеет две вершинные рефракции: задняя вершинная рефракция (выражается в диоптриях) – величина, обратная заднему фокальному отрезку, измеренному в метрах; передняя вершинная рефракция – величина, обратная переднему фокальному отрезку, измеренному в метрах». Под передним (задним) фокальным отрезком принято понимать расстояние от первой (последней) поверхности системы до переднего (заднего) фокуса, как это показано на рис. 1. На величину задней вершинной рефракции устанавливаются допуски в зависимости от ее абсолютного номинального значения. Задняя вершинная рефракция измеряется на диоптриметре.

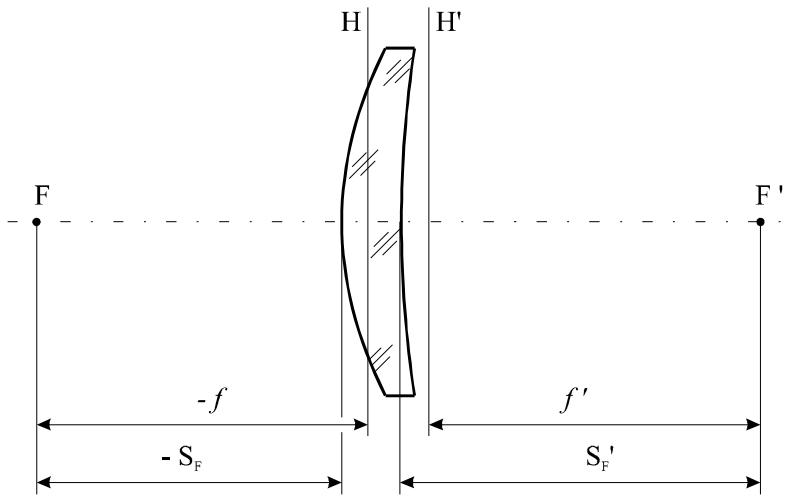


Рис.1. Фокусное расстояние и фокальные отрезки одиночной линзы

Следует заметить, что в инструкции по эксплуатации определено, что: «назначением диоптриметра служит измерение задней вершиной рефракции» [1]. В том же источнике написано, что «значение заднего фокуса очковой линзы определяет значение ее задней вершинной рефракции». Складывается впечатление, что у разработчиков ДО-3 смешались два разных понятия. Значение заднего фокуса линзы f' и заднего фокального отрезка S'_F не являются равными в общем случае.

Было выбрано несколько линз, для которых по конструктивным параметрам были рассчитаны оптическая сила (Ф), а также значения, обратные переднему ($1/S_F$) и заднему ($1/S_F$`) фокальным отрезкам. Далее были измерены значения передней ($F_V$) и задней ($F_V$`) вершинных рефракций исследуемых линз на диоптриметре ДО-3. Полученные данные приведены в табл. 1.

Оптическая сила и величины, обратные переднему и заднему фокальным отрезкам, рассчитаны по широко известным формулам параксиальной оптики:

$$\Phi = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) + \frac{(n-1)^2\, d}{n\, R_1\, R_2}, \qquad (1)$$

$$\frac{1}{S_F} = -\Phi \frac{1}{1 + \frac{(n-1)\, d}{n\, R_2}}, \qquad (2)$$

$$\frac{1}{S'_F} = -\Phi \frac{1}{1 - \frac{(n-1)\, d}{n\, R_1}}. \qquad (3)$$

№	R_1 мм	R_2 мм	D мм	n_e	Ф дптр	$1/S_F$ дптр	F_V дптр	$1/S_F$` дптр	F_V` дптр
1	72,3	198,6	6,1	1,49	4,38	4,33	4,33	4,50	4,50
2	69,3	252,6	8,0	1,49	5,21	5,15	5,20	5,41	5,40
3	63,4	192,5	7,3	1,49	5,28	5,21	5,25	5,49	5,50
4	73,9	252,6	6,6	1,56	5,43	5,38	5,20	5,61	5,45
5	49,7	107,0	9,1	1,49	5,56	5,41	5,50	5,92	6,00
6	63,9	239,2	8,7	1,49	5,71	5,64	5,70	5,98	6,00
7	59,6	192,5	7,9	1,49	5,79	5,71	5,75	6,05	6,10
8	59,8	203,7	7,1	1,49	5,88	5,82	5,80	6,12	6,13
9	61,3	376,9	7,1	1,52	7,16	7,11	7,12	7,45	7,45
10	55,9	138,8	7,7	1,65	7,20	7,05	7,10	7,61	7,63
11	47,5	187,9	7,8	1,52	8,34	8,22	8,25	8,83	8,87
12	51,4	376,9	9,7	1,52	8,83	8,75	8,75	9,43	9,50
13	55,9	∞	9,6	1,65	11,63	11,63	11,60	12,47	12,38

Таблица 1. Конструктивные параметры исследуемых линз

На основе всего вышеизложенного, а также на основе данных таблицы можно сделать следующие очевидные выводы:

- диоптриметр не измеряет оптическую силу линзы, как это по какой-то причине принято считать;
- диоптриметр определяет величину задней вершинной рефракции линзы;
- в процессе измерения рефракции необходимо очковую линзу правильно устанавливать на прибор.

Важность последнего пункта, на наш взгляд, следует пояснить дополнительно. Корректная установка линзы описана в инструкции по эксплуатации диоптриметра ДО-3: «отдельную очковую линзу или линзу, вмонтированную в оправу, положить на подвижную гильзу той поверхностью, которая должна быть обращена к глазу» [1]. В процессе измерения очковых линз, уже вставленных в оправу, офтальмолог переворачивает их для удобства проведения аттестации линзы [7]. Особенно часто это происходит при определении задней вершинной рефракции элементов бифокальных линз. Это связано, в первую очередь, с конструкцией самого диоптриметра и конструкцией оправы очков. В большинстве случаев результат получается «приблизительно близким». Но если сравнить разность получаемых результатов (Δ) с допуском (δ) на величину задней вершинной рефракции по ГОСТ Р 51044-97, то становится ясно, что подобный подход недопустим. Данные сравнения для рассматриваемого нами набора линз приведены в табл. 2.

№	$1/S_F$` дптр	F_V дптр	F_V` Дптр	Δ дптр	δ дптр
1	4,50	4,33	4,50	0,17	0,12
2	5,41	5,20	5,40	0,20	0,12
3	5,49	5,25	5,50	0,25	0,12
4	5,61	5,20	5,45	0,25	0,12
5	5,92	5,50	6,00	0,50	0,12
6	5,98	5,70	6,00	0,30	0,12
7	6,05	5,75	6,10	0,35	0,12
8	6,12	5,80	6,13	0,33	0,12
9	7,45	7,12	7,45	0,33	0,12
10	7,61	7,10	7,63	0,53	0,12
11	8,83	8,25	8,87	0,62	0,12
12	9,43	8,75	9,50	0,75	0,18
13	12,47	11,60	12,38	0,78	0,25

Таблица 2. Ошибки при некорректной установке линз на диоптриметр

Систему измерения задней вершинной рефракции на диоптриметре ДО-3 можно назвать компенсационной, так как в процессе измерения необходимо компенсировать оптическую силу линзы или найти такое положение предмета – сетки коллиматора, при котором ее изображение системой коллиматор – очковая линза будет строиться на бесконечности. Оптическая схема диоптриметра приведена на рис. 2.

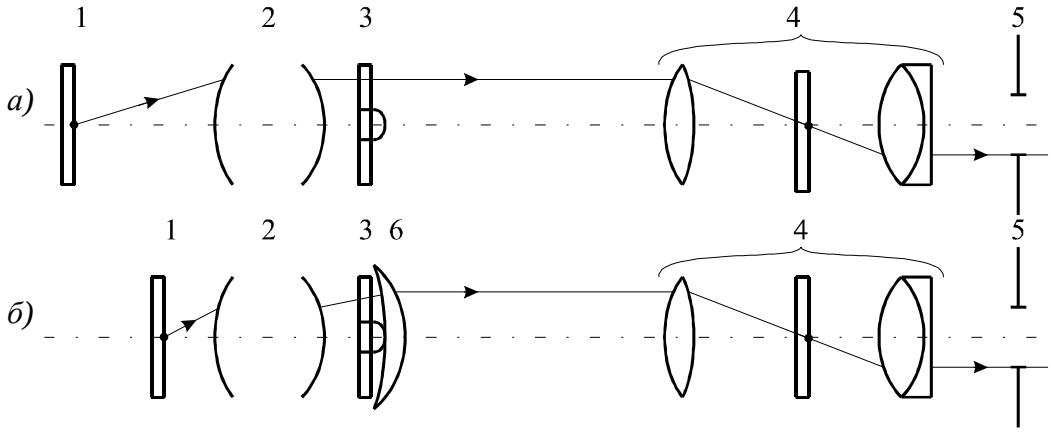


Рис. 2. Оптическая схема диоптриметра а) без контролируемой очковой линзы и б) с введе нной в ход лучей очковой линзой: 1 – сетка коллиматора, 2 – коллиматор диоптриметра, 3 – защитное стекло с агатовым стержнем, 4 – зрительная труба с сеткой, 5 – выходной зрачок диоптриметра, 6 – контролируемая очковая линза.

Вначале производится выставление системы диоптриметра без линзы «на ноль». Далее устанавливается очковая линза и производится «перефокусировка» системы коллиматор – линза, которая должна давать изображение на бесконечности.

Здесь следует отметить, что немаловажную роль играет положение исследуемой линзы относительно коллиматора. На рис. 3 показана возможность различной установки контролируемой линзы в диоптриметре.

В процессе измерения задней вершинной рефракции очковая линза должна опираться на агатовый стержень покровного стекла. На практике очень часто линза не ставится на опорный торец. Это связано, например, с появлением полимерных линз. Такие

линзы легко царапаются агатовым стержнем диоптриметра в процессе измерения. В этом случае операторы приподнимают линзу или вводят прокладку между опорным торцом и ее поверхностью. Более того, в некоторых мастерских агатовый наконечник специально спиливают.

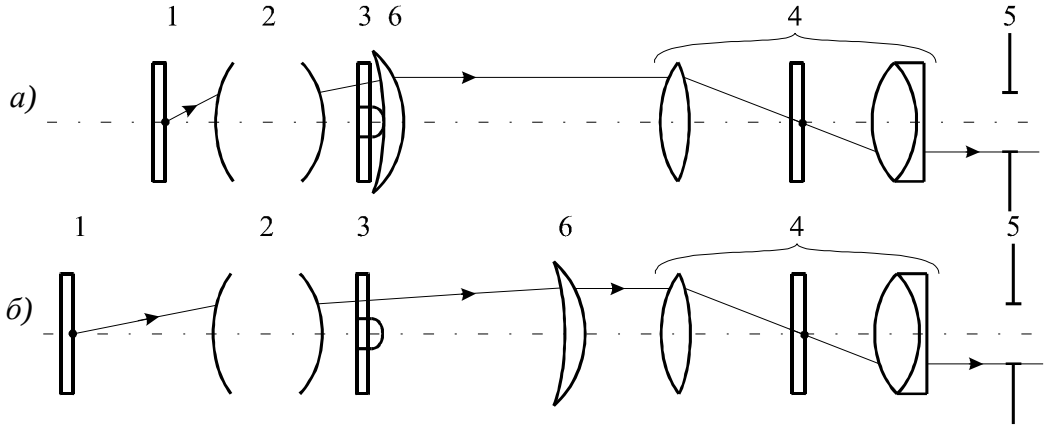


Рис. 3. Варианты различного расположения очковой линзы в диоптриметре. а) правильный; б) неправильный.

Резкое изображение сетки коллиматора на сетке зрительной трубы может быть получено только в случае, когда предмет (сетка коллиматора) находится в переднем фокусе системы коллиматор – очковая линза.

В соответствии с формулой (2) для одиночной линзы можно уверенно предположить, что передний отрезок системы коллиматор – очковая линза определяется через оптическую силу этой системы. Как известно, оптическая система, состоящая из двух силовых элементов, находящихся на расстоянии *d* друг от друга, имеет оптическую силу, равную

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 \, d \, . \qquad (4)$$

При изменении расстояния между элементами будет изменяться и оптическая сила всей системы. В зависимости от расстояния до первой поверхности контролируемой линзы необходимо вносить различную величину корректировки для четкого наблюдения сетки коллиматора.

Интересно рассмотреть вопрос о том, какую же величину задней вершинной рефракции линзы мы получим, если будем устанавливать очковую линзу на расстоянии $d' \neq d$ от последней поверхности коллиматора. Исследуя работу системы коллиматор – очковая линза, устанавливая на разные расстояния различные по силе линзы, можно добиться одинаковой оптической силы всей системы коллиматор – очковая линза. Следовательно, можно записать:

$$\begin{cases} \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 \, d \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2' - \Phi_1 \Phi_2' \, d' \end{cases}, \qquad (5)$$

где $\Phi_2 \neq \Phi_2'$ и $d \neq d'$. Приравнивая первое и второе равенства системы (5), получаем:

$$\frac{\Phi_2'}{\Phi_2} = \frac{1 - \Phi_1 \, d}{1 - \Phi_1 \, d'} \,.. \qquad (6)$$

Вследствие того, что величина оптической силы Φ_1 коллиматора в процессе измерений остается постоянной, как и величина начальной установки линзы *d*, соотношение оптических сил линз будет зависеть только от расстояния *d*'.

Были произведены измерения на диоптиметре ДО-3 задней вершинной рефракции различных линз при установке на агатовый стержень (F_{V0}`) и через прокладное кольцо толщиной 2,7 мм ($F_{V1}$`). На основе полученных данных была рассчитана величина ошибки

измерения задней вершинной рефракции очковых линз Δ и сопоставлена с допуском δ для данной линзы, определенным ГОСТ Р 51044-97. Данные приведены в табл. 3.

№	$1/S_F$` дптр	F_{V0}` дптр	F_{V1}` дптр	Δ дптр	δ дптр
1	4,50	4,50	4,51	0,01	0,12
2	5,41	5,40	5,55	0,15	0,12
3	5,49	5,50	5,65	0,15	0,12
4	5,61	5,45	5,63	0,18	0,12
5	5,92	6,00	6,14	0,14	0,12
6	5,98	5,95	6,13	0,18	0,12
7	6,05	6,10	6,13	0,03	0,12
8	6,12	6,13	6,20	0,07	0,12
9	7,45	7,45	7,63	0,18	0,12
10	7,61	7,60	7,75	0,15	0,12
11	8,83	8,88	9,13	0,25	0,12
12	9,43	9,45	9,75	0,30	0,18
13	12,47	12,25	12,88	0,63	0,25

Таблица 3. Ошибки при измерении задней вершиной рефракции при использовании прокладного кольца

Как видно из табл. 3, при таком незначительном изменении положения аттестуемой линзы только некоторые из рассмотренных образцов будут давать величину задней вершинной рефракции с ошибкой меньше допуска.

Бытует заблуждение о том, что вследствие параллельного хода между коллиматором и зрительной трубой линзу можно поднимать (опускать) вдоль оптической оси прибора, не ухудшая точность измерения. Следует признать, что это мнение ошибочно.

Подытоживая все выше изложенное, необходимо отметить, что:

- с помощью диоптриметра измеряют не рефракцию (оптическую силу) очковой линзы, а заднюю вершинную рефракцию – величину, обратную заднему фокальному отрезку (S_F’);
- принцип действия диоптриметра основан на эффекте компенсации коллиматором оптической силы, внесенной линзой;
- в процессе измерения задней вершинной рефракции линзы следует правильно позиционировать линзу, прижимая к агатовому стержню поверхность, которая должна быть обращена к глазу.

Литература

1. Диоптриметр оптический ДО-3, техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЗОМЗ. 1986.
2. Кравков С.В. Глаз и его работа. Издательство академии наук СССР. Москва. 1950.
3. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Машиностроение (Ленинградское отделение). Ленинград. 1975.
4. ГОСТ Р 51044-97. Линзы очковые. Общие технические условия.
5. Ковалевский Е.И. Офтальмология. Медицина. Москва. 1995.
6. Ерошевский Т.И., Бочкорева А.А. Глазные болезни. Медицина. Москва. 1983.
7. Автоматический диоптриметр HUMPHREY. Анализатор линз. Модель 330. Инструкция по эксплуатации.

ОПЫТ РАБОТЫ С ТЕСТАМИ ПО ДИСЦИПЛИНЕ "ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА" В СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

Г.И. Цуканова, О.В. Багдасарова, Г.И. Карпова, В.Г. Карпов, А.В. Бахолдин

Рассматривается содержание обучающих и аттестующих тестов и сценариев по дисциплине «Прикладная оптика», описываются принципы построения обучающих и аттестующих сценариев, приводятся примеры тестов закрытой и открытой форм, тестов на соответствие и установление правильной последовательности, анализируется опыт работы с тестами.

Использование тестов в системе дистанционного обучения становится в последние годы неотъемлемой частью учебного процесса. Тесты для обучения и аттестации по дисциплине «Прикладная оптика» используются уже в течение двух лет. Их применение укрепляет навыки самостоятельной работы, повышает организованность студентов.

Обучающие и аттестующие тесты охватывают практически весь курс дисциплины «Прикладная оптика» (1), общий объем которой составляет 255 часов. Тесты составлены по следующим разделам программы «Прикладная оптика»:

1) Основные характеристики оптических систем.
2) Элементная база оптики. Оптические элементы и детали.
3) Глаз как оптическая система.
4) Оптические системы микроскопа.
5) Телескопические оптические системы.
6) Проекционные и репродукционные оптические системы.
7) Оптика фотографических, оптико-электронных и телевизионных систем.
8) Осветительные оптические системы.

По дисциплине запланировано 18 сценариев, из них 9 обучающих и 9 аттестующих. В настоящее время действуют 8 обучающих и 8 аттестующих сценариев (2):

1) Основные характеристики оптических систем.
2) Оптические элементы и детали.
3) Линзы.
4) Глаз как оптическая система.
5) Телескопические системы.
6) Проекционные системы.
7) Фото-кинооптика.
8) Осветительные системы.

В ближайшее время добавятся обучающий и аттестационный сценарии по теме «Микроскоп».

Сценарии определяют последовательность предъявления заданий и информационных материалов, временные ограничения, правила выставления оценок. В системе дистанционного обучения предусмотрены три вида сценариев: вариант, группа и уровень (3). Сценарии для аттестации по «Прикладной оптике» составлены по типу: группа. Сценарий по типу группа содержит определенную последовательность групп кадров. Задания внутри группы имеют одинаковый уровень сложности, а группа от группы отличается сложностью или тематикой материала, в данном случае тематикой материала. Студенту предъявляется заданное количество случайно выбранных кадров из каждой группы, а последовательность групп задается преподавателем.

Аттестующий сценарий «Оптические элементы и детали» содержит восемь групп тестов по следующим разделам: плоскопараллельные пластинки, клинья, зеркала, призмы, анаморфоты, световоды, апланатические линзы, асферические линзы. Количество вариантов внутри группы 7. Минимальное время на ответы при прохождении всего сценария должно быть не менее 60–80 минут. При этом время ответа на отдельный

вопрос не ограничивается в связи с различным уровнем сложности и типом вопросов в одном сценарии.

В зависимости от объема изучаемого материала сценарии отличаются друг от друга количеством групп тестов и количеством вариантов. Минимальное количество групп тестов и вариантов внутри группы 5 (в сценарии «Глаз»). Время на ответы в этом случае составляет 20–30 минут.

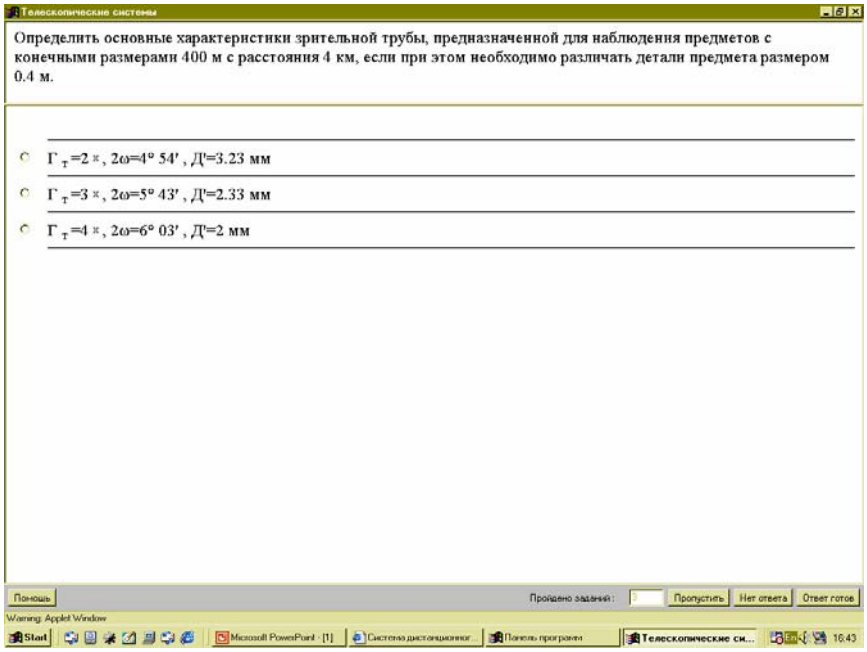


Рис.1 Тестовое задание закрытой формы.

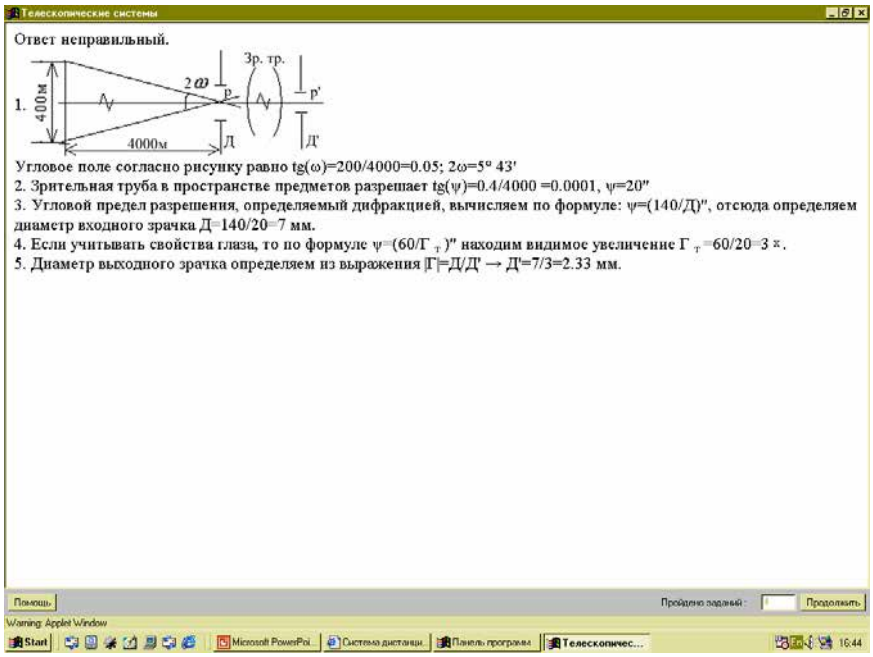


Рис. 2. Пример решения задачи рис.1.

Обучающие сценарии построены также по типу группа, только в них, как правило, предусмотрено большее количество групп тестов. Это сделано для того, чтобы при обучении студенты могли проверить себя и получить информацию практически по всей тематике задач, встречающихся в аттестующем тесте. Если в аттестующем сценарии «Оптические элементы и детали» 8 групп тестов, то в обучающем их уже 11. Обучаю-

щие сценарии содержат также информационные кадры и примеры решения задач. Вариантов внутри группы один.

Тестовые задания сформулированы в одной из четырех возможных форм:

- **закрытой**, предусматривающей выбор обучаемым одного или нескольких правильных ответов из предложенного набора (рис.1)

В обучающем сценарии приводятся примеры решения задач (рис. 2),

- **открытой,** предусматривающей ввод ответа студентом в виде целого числа, вещественного числа или текстовое выражение (рис. 3).

Ответ, полученный студентом в ходе расчета, не должен отличаться от верного более чем на 10%. На рис. 4 представлено решение задачи, приведённой на рис. 3.

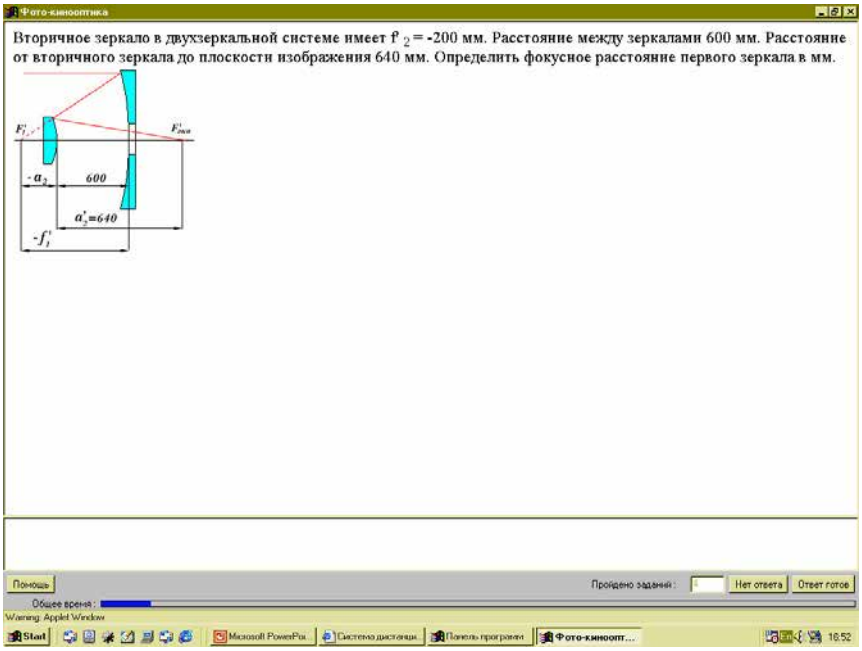


Рис.3. Тестовое задание открытой формы.

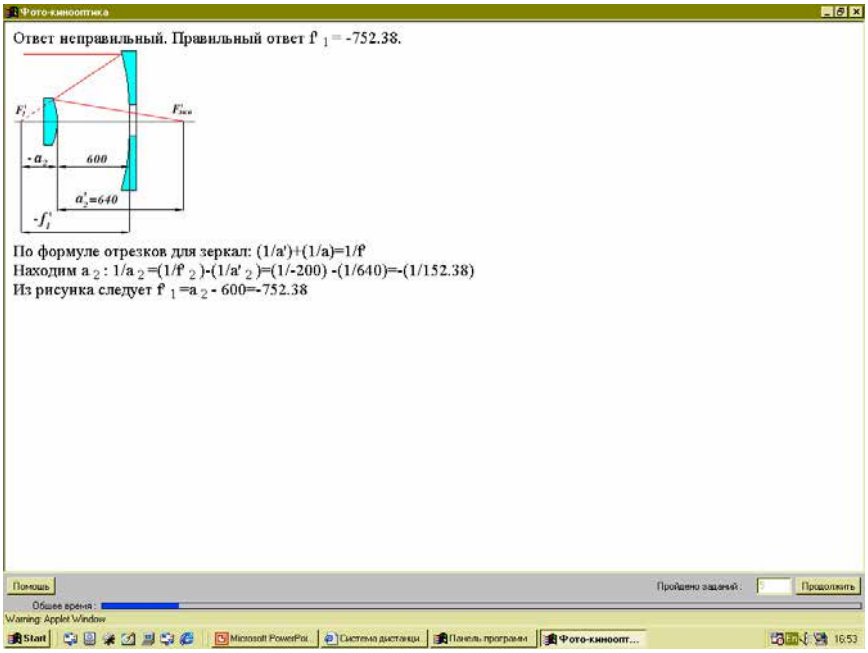


Рис.4. Пример решения задачи рис.3

- **на соответствие,** предусматривающей установление студентом правильного соответствия между элементами (рис. 4),

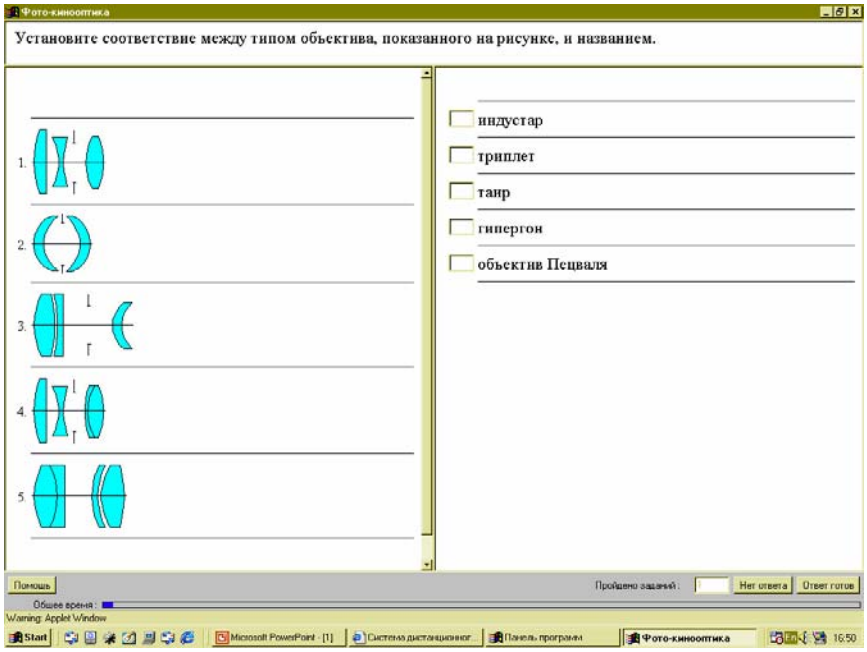


Рис.4. Тестовое задание на соответствие

- **на установление правильной последовательности,** предусматривающей указание студентом правильного порядка в перечисленном наборе элементов (рис. 5).

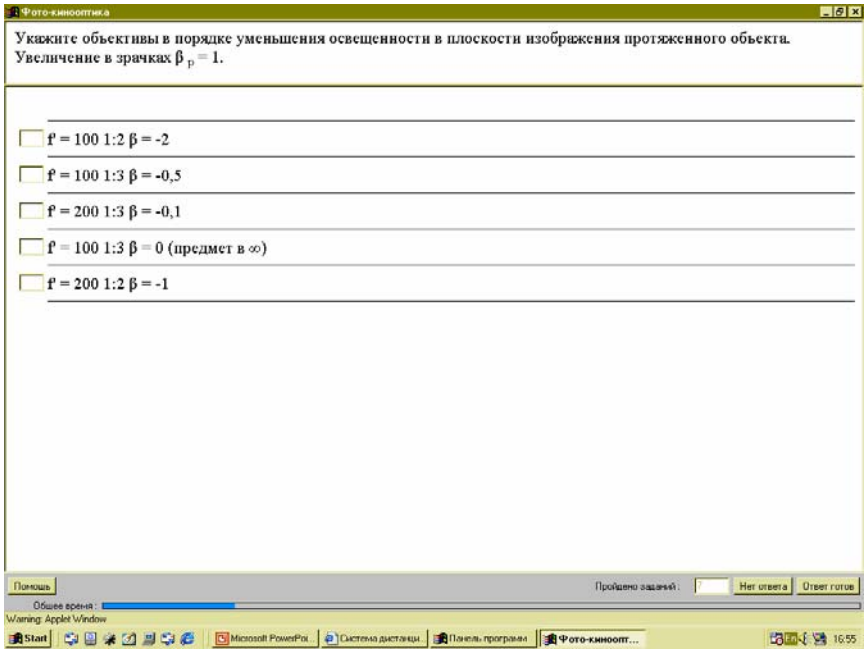


Рис.5. Тестовое задание на установление правильной последовательности.

Студенты третьего курса, изучающие дисциплину «Прикладная оптика» в течение двух семестров, в осеннем семестре проходят обучение и аттестацию по трем сценариям: «Линзы», «Оптические элементы и детали», «Глаз». В весеннем семестре также запланировано три тестирования по темам: «Проекционные системы», «Телескопические системы», «Основные характеристики оптических систем».

Обучающие и аттестующие сценарии «Прикладной оптики» используются также в дисциплине «Специальные разделы прикладной оптики» на пятом курсе в качестве проверки остаточных знаний, а также для закрепления основ геометрической оптики на новом уровне понимания студентом курса дисциплин, определяющих специальность «Оптотехника».

Опыт работы с тестами в течение нескольких лет показал, что их использование способствует приобретению навыков самостоятельной работы, ритмичной работе в течение семестра, закреплению теоретического материала. Проведение в течение семестра нескольких аттестаций позволяет преподавателю контролировать знания студентов и облегчает оценку их знаний в течение семестра.

Литература

1. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов / Н.П.Заказнов, С.И. Кирюшин, В.Н. Кузичев. 3-е изд., перераб. И доп. М.: Машиностроение, 1992.. 448с.
2. Сборник задач по теории оптических систем: Учебное пособие для оптических специальностей вузов / Л.Н. Андреев, А.П. Грамматин, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. М., Машиностроение, 1987. 192стр.
3. Лисицына Л.С., Лямин А.В., Чежин М.С. Руководство пользователя компьютерной сетевой системы для проведения обучения и аттестаций. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2002. 44с.

РАЗРАБОТКА СПРАВОЧНОЙ СРЕДЫ ПО ЭЛЕМЕНТАМ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ КОНСТРУКТОРА ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Толстоба Н.Д., Чернова А.А.

В статье рассматривается комплекс программ, разработанный для конструкторов оптических приборов, работающих в среде автоматизированного конструирования. Предлагается модель справочной среды по элементам оптического прибора для оптика-конструктора, основанная на открытой базе таблиц, доступных для редактирования и дополнения.

Введение

В процесс проектирования современных оптических приборов довольно сложно включить элементы автоматизации, так как существует множество возможных решений как в плане проектирования прибора, так и в конструкторском направлении. В оптическом приборостроении можно выделить довольно большое количество разрозненных типовых процедур, которые спокойно можно перепоручить исполнять не разработчику конструкции прибора, а компьютеру. Но в целом последнее слово остается за конструктором, который владеет современными компьютерными технологиями и использует для работы среду автоматизированного конструирования.

Для проектирования оптических систем применяется ряд современных программ компьютерного проектирования оптики, а для конструирования оптических деталей используются программы на основе CAD-систем. Работая в системе в пользовательском режиме, конструктор тратит много времени на ознакомление со справочными и нормативными данными, которые зачастую находятся в разных источниках и не всегда доступны и не всегда удобны в использовании.

Основы проектирования оптических деталей и узлов

Совершенство конструкций оптических деталей характеризуется их соответствием своему функциональному назначению, удобством и надежностью работы в приборе, а также тем, в какой мере учтены и использованы возможности наиболее прогрессивных методов и средств их изготовления и контроля.

Возможность применения прогрессивных технологических процессов изготовления и сборки оптических деталей во многом определяется их конструкцией. Поэтому при конструировании оптических деталей всегда должны учитываться не только служебное назначение, но и технологические возможности изготовления. Поэтому при проектировании оптической детали (линзы) нужно проверять конструктивные данные. В программах расчета оптики проведение таких проверок невозможно, и конструктору приходиться каждый раз просчитывать все это вручную, что очень замедляет и усложняет процесс конструирования.

Для упрощения и автоматизации работы со справочной литературой предлагается модель справочной среды по элементам оптического прибора для конструктора оптико-механических приборов, работающая с открытой базой таблиц, доступных для прямого редактирования и дополнения.

Данные справочника

После того как была изучена литература по правилам построения конструкторской документации на изготовление оптических деталей [1, 2] и произведен анализ и

систематизация нормативной документации, справочной литературы [3, 4], ГОСТов, ОСТов, был сформирован набор таблиц, куда вошли 25 наиболее часто используемых:

- наименьшая толщина линзы по краю,
- наименьшая толщина двояковогнутой линзы по оси по ОСТ 3-490-83,
- ширина фаски в зависимости от диаметра,
- угол наклона фаски в зависимости от отношения диаметра к радиусу,
- зависимость децентрировки с от фокусного расстояния $f'_{об}$,
- допуски на соединение круглых оптических деталей с оправами,
- допуски на толщину линзы в зависимости от их диаметра,
- размеры элементов оправ под завальцовку,
- соотношения между световым и полным диаметрами линз (ОСТ 3-490-71),
- размеры резьбовых колец в зависимости от диаметра линз,
- сравнительные соотношения размеров колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров промежуточных колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров пружинных колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров пружинных колец по рис.
- сравнительные соотношения размеров оправ по рис.
- сравнительные соотношения размеров оправ по рис.
- сравнительные соотношения размеров оправ по рис.
- сравнительные соотношения размеров оправ по рис.
- кольца резьбовые для крепления оптических деталей,
- кольца гладкие промежуточные, для крепления оптических деталей,
- наименьшая толщина выпукловогнутой линзы по оси по ОСТ 3-490-83.

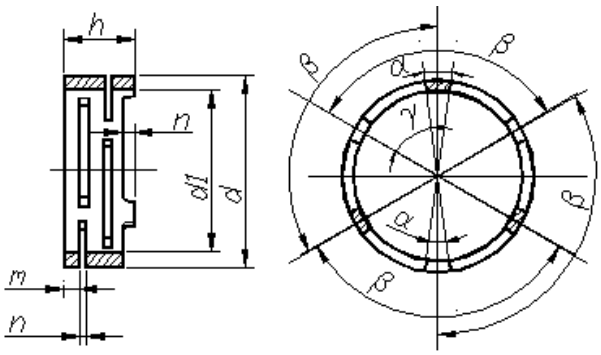


Рис 1. Пружинное кольцо для крепления линзы в оправе

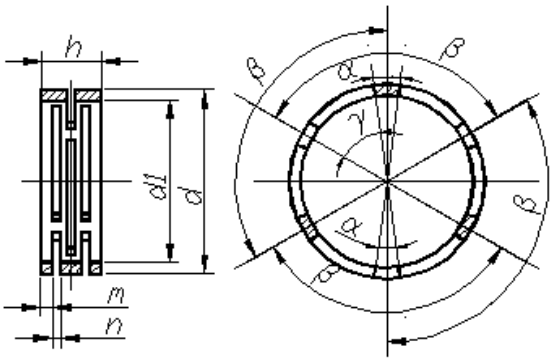


Рис 2. Пружинное кольцо для крепления линзы в оправе

В статье как пример приведены табл. 1 и 2.

d пос. h11	d_1 пос. H11	n	m	h		α	β	γ
				по рис. 15	по рис. 16			
от 30 до 50	(d-2)	0,6	1	4,8	5,8	10°	120°	60°
от 50 до 80	(d-2,5)	0,8	1	5,4	6,4	10°	120°	60°
от 80 до 120	(d-3)	1	1,5	7.5	9	10°	120°	60°
от 120 до 180	(d-4)	1	2	9	11	10°	120°	60°
от 180 до 260	(d-5)	1,5	2	9,6	11,6	10°	120°	60°

Таблица 1. Сравнительные соотношения размеров пружинных колец по рис.1–2.

Характеристика линзы		Наименьшие толщины по оси (мм) при допуске ΔN на местные ошибки			
Форма	Диаметр D, мм	До 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 2,0	Св. 2,0
Двояко-вогнутая	До 50	0,15D / 0.1D	0,12D / 0,08D	0,12D / 0,07D	0,10D / 0,07D
	50 – 120	0,12D / 0,08D	0,12D / 0,08D	0,10D / 0,07D	0,08D / 0,06D
	120 – 260	0,10D / 0,07D	0,10D / 0,07D	0,08D / 0,06D	0,08D / 0,06D
	260 – 500	0,10D / 0,07D	0,08D / 0,07D	0,08D / 0,06D	0,08D / 0,05D

Таблица 2. Наименьшая толщина двояковогнутой линзы по оси.

Математический аппарат

Задача автоматизации состоит из основных этапов: 1 – поиск необходимой таблицы среди созданного набора, 2 – получение данных. Но для осуществления этих этапов необходимо реализовать библиотеку функций работы с базой. Она осуществляет обработку поступившей информации, в результате которой мы и получаем данные для чертежа.

Таким образом, создана программа, позволяющая конструктору, используя диалоговые окна и следуя простым указаниям, найти интересующую его информацию. Функционально программа-справочник предоставляет следующие возможности:

- работа с данными таблиц в диалоговом режиме,
- поиск таблиц среди созданного набора,
- организация вывода содержимого таблиц в текстовом режиме,
- работа с данными таблиц из командной строки,
- вывод слайдов-подсказок по окончании работы с диалогом.

Алгоритм поиска таблицы и ее содержимого

1. Ввод ключевых слов из названия таблицы.
2. Перебор имеющегося набора таблиц по запросу пользователя.

3. Вывод списка названий таблиц, в которых встречаются слова, введенные в запросе.
4. Выбор нужной таблицы.
5. Ввод запрашиваемых данных.
6. Поиск по этим данным нужной информации.
7. Вывод информации в диалоговое окно. Если к табличным цифрам необходимо пояснение, то рядом в соответствующем окошке выводится иллюстрация.
8. Отображение (или нет) слайда-подсказки.

Результат автоматизации

Справочник оптика-конструктора предназначен для получения справочной или нормативной информации в наглядной форме в диалоговом режиме. Пакет представляет собой диалоговый интерфейс, наложенный на базу таблиц. Для каждой из нормативных таблиц разработаны окна опроса и вывода результата.

d пос. h11	d_1 пос. H11	n	m	h		α	β	γ
				по рис. 26	по рис. 27			
от 30 до 50	(d-2)	0,6	1	4,8				
св.50 „ 80	(d-2,5)	0,8	1	5,4				
„ 80 „ 120	(d-3)	1	1,5	7.5				
„ 120 „ 180	(d-4)	1	2	9				
„ 180 „ 260	(d-5)	1,5	2	9,6				

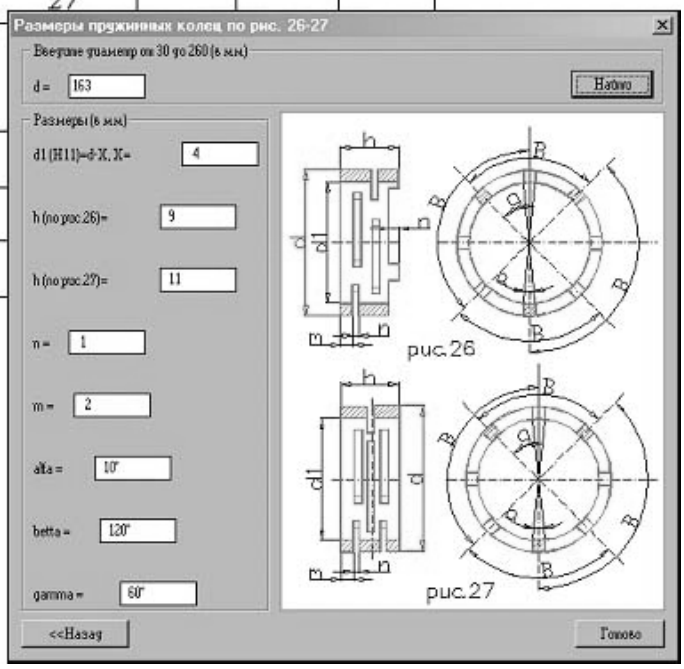


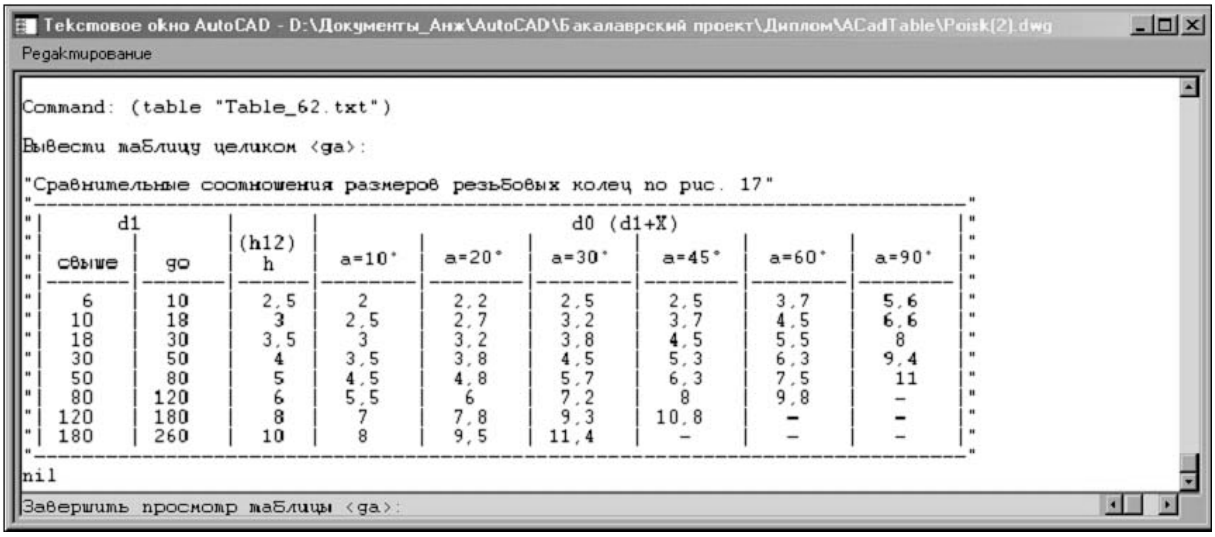
Рис. 3. Пример таблицы и диалогового окна справочной системы

Созданный пакет программ позволяет по введенным данным найти необходимую информацию и иллюстрацию к ней. В качестве примера на рис. 3 приведена таблица «Размеры пружинных колец» и данные из нее же в форме диалога.

Кроме диалогового режима, естественно, пакет программ осуществляет извлечение данных из всех таблиц и работу с ними в режиме программирования и автоматизации. По желанию пользователя можно просмотреть всю таблицу (рис. 4) или вывести табличные данные списком, с помощью функции из библиотеки, указав имя файла с таблицей (рис. 5).

Можно отметить, что справочник имеет дополнительные возможности:

- возможность редактировать все таблицы
- возможность добавлять в таблицы новые данные
- возможность создавать новые файлы с таблицами



Текстовое окно AutoCAD - D:\Документы_Анж\AutoCAD\Бакалаврский проект\Диплом\ACadTable\Poisk(2).dwg

Редактирование

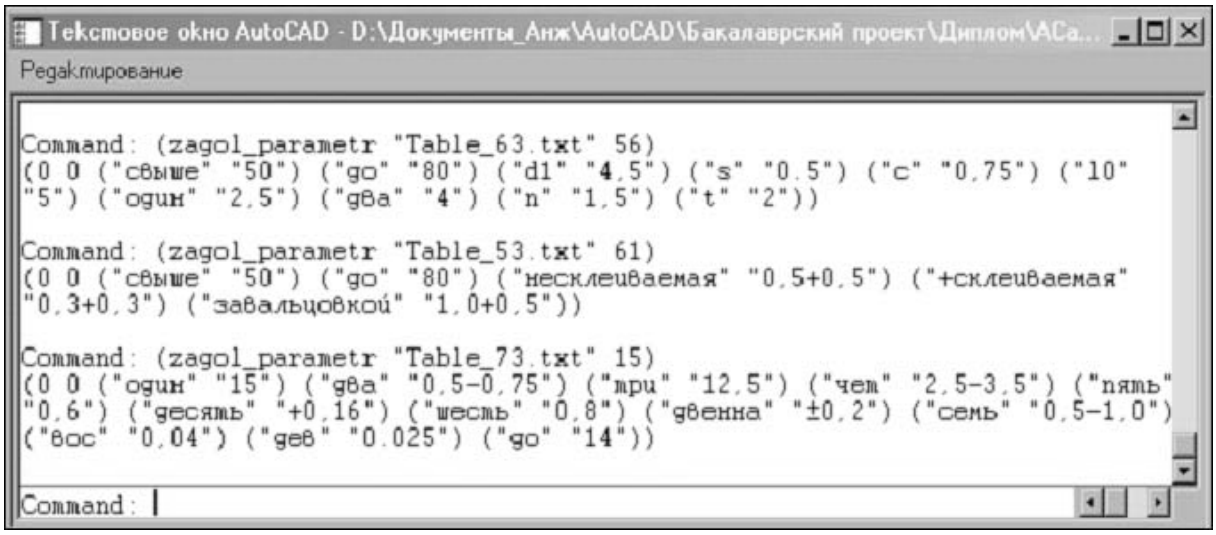
```
Command: (table "Table_62.txt")

Вывести таблицу целиком <да>:

"Сравнительные соотношения размеров резьбовых колец по рис. 17"
"-----------------------------------------------------------------------------------"
"|      d1        |                          d0 (d1+X)                              |"
"|                |  (h12)  |                                                        |"
"| свыше | до     |   h     | a=10° | a=20° | a=30° | a=45° | a=60° | a=90°          |"
"|-------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|"
"|   6   |  10    |  2,5    |  2    | 2,2   | 2,5   | 2,5   | 3,7   | 5,6   |"
"|  10   |  18    |  3      | 2,5   | 2,7   | 3,2   | 3,7   | 4,5   | 6,6   |"
"|  18   |  30    |  3,5    |  3    | 3,2   | 3,8   | 4,5   | 5,5   | 8     |"
"|  30   |  50    |  4      | 3,5   | 3,8   | 4,5   | 5,3   | 6,3   | 9,4   |"
"|  50   |  80    |  5      | 4,5   | 4,8   | 5,7   | 6,3   | 7,5   | 11    |"
"|  80   | 120    |  6      | 5,5   | 6     | 7,2   | 8     | 9,8   | -     |"
"| 120   | 180    |  8      |  7    | 7,8   | 9,3   | 10,8  |  -    |  -    |"
"| 180   | 260    |  10     |  8    | 9,5   | 11,4  |  -    |  -    |  -    |"
"-----------------------------------------------------------------------------------"
nil
```

Завершить просмотр таблицы <да>:

Рис. 4. Пример вывода таблицы целиком в текстовом окне AutoCAD



Текстовое окно AutoCAD - D:\Документы_Анж\AutoCAD\Бакалаврский проект\Диплом\ACa...

Редактирование

```
Command: (zagol_parametr "Table_63.txt" 56)
(0 0 ("свыше" "50") ("до" "80") ("d1" "4,5") ("s" "0.5") ("c" "0,75") ("l0"
"5") ("один" "2,5") ("два" "4") ("n" "1,5") ("t" "2"))

Command: (zagol_parametr "Table_53.txt" 61)
(0 0 ("свыше" "50") ("до" "80") ("несклеиваемая" "0,5+0,5") ("+склеиваемая"
"0,3+0,3") ("завальцовкой" "1,0+0,5"))

Command: (zagol_parametr "Table_73.txt" 15)
(0 0 ("один" "15") ("два" "0,5-0,75") ("три" "12,5") ("чем" "2,5-3,5") ("пять"
"0,6") ("десять" "+0,16") ("шесть" "0,8") ("двенна" "±0,2") ("семь" "0,5-1,0")
("вос" "0,04") ("дев" "0.025") ("до" "14"))
```

Command:

Рис. 5. Пример вывода таблиц списком

Литература

1. Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора. Л: Машиностроение, (1983).
2. Ключникова Л.В., Ключников В.В. Проектирование оптико-механических приборов: Учеб. пособие для сред. спец. учеб. заведений. СПб.: Политехника, (1994).
3. Латыев С.М., Егоров Г.В., Тимощук И.Н. Конструирование деталей и сборочных единиц оптико-электронных приборов. Часть 1. СПб, 2001.
4. Панов В.А. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л.: Машиностроение, 1980.

СВОЙСТВА ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОГО ТИПА

А.П. Грамматин, Е.А. Демидова

Рассмотрены свойства зеркально-линзовых объективов автоколлимационного типа, а именно связь между апертурой, линейным полем, рабочим расстоянием и габаритами системы в целом.

Рассматриваемые зеркально-линзовые объективы работают по схеме автоколлимации с линейным увеличением -1, когда плоскости предмета и изображения совпадают, и построены на базе объектива «Микронар» (рис.1) с использованием свойств концентрических систем и с применением апланатических поверхностей [1].

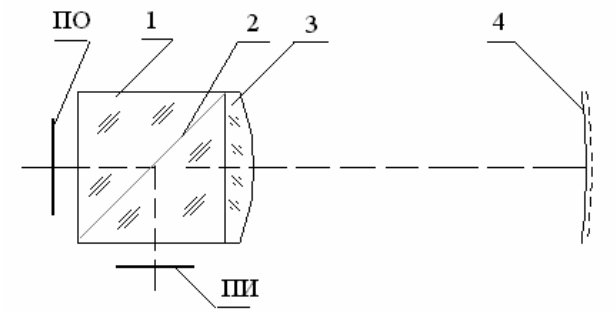


Рис.1. Принципиальная оптическая схема объектива «МИКРОНАР»: ПО – плоскость объекта; 1 – куб-призма с полупрозрачным слоем 2; 3 – линза; 4 – зеркало; ПИ – плоскость изображения

Для разделения плоскостей предмета и изображения в схеме зеркально-линзового объектива «Микронар» установлена призма-куб 1 со светоделительной гипотенузной гранью 2. К призме-кубу приклеена плоско-выпуклая линза 3, выполненная из того же материала, что и призма-куб. За линзой находится вогнутое зеркало 4, оправа которого является апертурной диафрагмой.

Существенным недостатком описанной конструкции объектива является наличие светоделительной грани в призме-кубе, которая приводит к 80% потере света. Для устранения этого дефекта в рассматриваемых объективах призма-куб заменяется двумя прямоугольными призмами 1,4 (рис. 2), осуществляющими пространственное разделение плоскостей предмета и изображения путем выделения кольцевого сектора из круглого поля изображения.

Зеркально-линзовый объектив, представленный на рис. 2, нашел применение в установках (видеоанализаторах изображений), предназначенных для диагностики наследственных и инфекционных заболеваний путем анализа фрагментов ДНК, и работает в узком спектральном интервале 0.680–0.720 мкм. Предметом служит биочип, представляющий собой предметное стекло от биологического микроскопа, на поверхности которого расположены ячейки геля, в каждой из которых находится особый реактив (например, ДНК болезнетворных бактерий или вирусов). Размер ячейки составляет 0.1 мм, а межосевое расстояние между соседними ячейками равно 0.3 мм. На поверхность биочипа наносят исследуемый люминесцентно меченый материал (например, кровь или слюну пациента) и наблюдают специфическое свечение, которое является результатом взаимодействия препарата с реактивом и служит показателем наличия тех или иных болезней у больного. Приемником изображения служит ПЗС-матрица. Главное требование к объективу состоит в том, чтобы построенное изображение одной ячейки не накладывалось на соседние ячейки. Таким образом, качество изображения рассматриваемого объектива можно оценивать по диаметру геометрического пятна рассеяния (геометрическим поперечным аберрациям $\delta g'$=0.04), которое должно быть не более 0.08 мм.

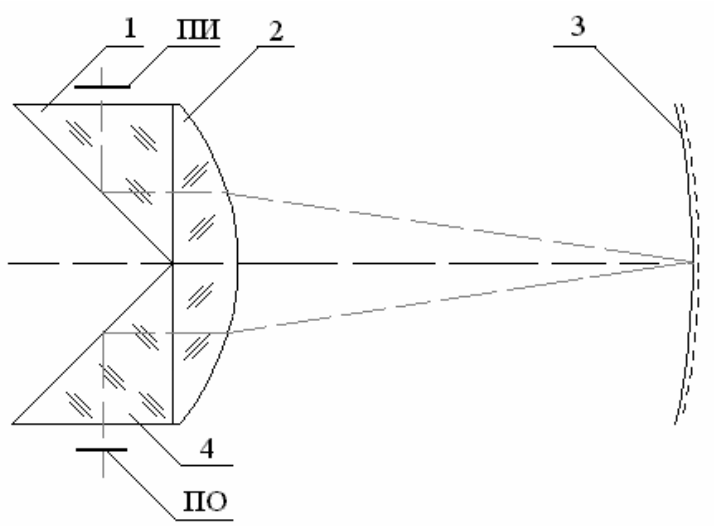


Рис.2. Принципиальная оптическая схема ЗЛ объектива: ПО – плоскость объекта; 1,4 – прямоугольные призмы; 2 – линза; 3 – зеркало, ПИ – плоскость изображения

Первоначально рассмотрим случай, когда плоскость предмета располагается на катете прямоугольной призмы, а центры кривизны выпуклой поверхности линзы и зеркальной поверхности зеркала лежат в этой плоскости. В этом случае поверхности являются апланатическими и составляют концентрическую систему, свободную от сферической аберрации, комы и хроматизма положения, поскольку лучи осевого пучка при любой числовой апертуре проходят через систему без преломления. Хроматизм увеличения и дисторсия устраняются за счет симметрии хода главных лучей. Система не свободна только от одной аберрации – меридиональной составляющей астигматизма. Для устранения астигматизма III порядка, как показано в работе [2], необходимо иметь афокальную систему, для чего вершину зеркала надо совместить с задним фокусом линзы. Таким образом, мы имеем концентрическую афокальную систему, качество изображения которой будет определяться меридиональной составляющей астигматизма V порядка.

Выведем формулу для вычисления меридиональной составляющей астигматизма V порядка. Поскольку система афокальна, то

$$r_1 = r_2 \frac{n-1}{n}. \qquad (1)$$

Когда плоскость предмета проходит через центр системы и главный луч в пространстве предметов идет параллельно оптической оси (телецентрический ход) на высоте y, а вышедший из системы главный луч образует с осью угол σ' и пересекает плоскость изображения в точке с ординатой y', можно меридиональную составляющую астигматизма представить в виде

$$Z'_m = y \cdot \sin\sigma' \cos\sigma'. \qquad (2)$$

Для определения связей между меридиональной составляющей астигматизма и конструктивными параметрами в концентрической системе, когда плоскость предмета проходит через ее центр и когда в пространстве предметов имеет место телецентрический ход главных лучей, удобно воспользоваться формулой Л.В. Романовой [3]:

$$\sigma'_p = \sigma'_1 + \sum_{i=1}^{i=p} \left[\arcsin\left(\frac{n_1 H}{n_{i+1} r_i}\right) - \arcsin\left(\frac{n_1 H}{n_i r_i}\right) \right], \qquad (3)$$

где $H=(r_1-S_1)\sin\sigma_1$, а при $\sigma_1=0$, $H=y$.

Разложим arcsin в ряд ($\arcsin x = x + x^3/6 + 3x^5/40 + \ldots$) и ограничимся первыми двумя членами. Тогда получим:

$$\sigma'_{III} = n_1 y_1 \sum_1^p \frac{1}{r_i}\left(\frac{1}{n_{i+1}} - \frac{1}{n_i}\right), \qquad (4)$$

$$\sigma'_V = \frac{(n_1 y_1)^3}{6} \sum_1^p \frac{1}{r_i^3}\left(\frac{1}{n_{i+1}^3} - \frac{1}{n_i^3}\right), \qquad (5)$$

где σ'_{III} обусловливает появление третьих порядков величины Z'_m, а σ'_V обусловливает появление пятых порядков величины Z'_m.

На основании формул (1), (2) и (5) получим

$$Z'_{mV} = \frac{y^4}{r_1^3}(n-1). \qquad (6)$$

Оптимальная коррекция меридиональной составляющей астигматизма достигается при $Z'_{мкр}=0$ на краю поля. Для получения $Z'_{мкр}=0$ необходимо ввести некоторую аберрацию III порядка, что приведет к некоторому изменению Z'_{mV}. Пренебрежем этим изменением. Тогда при $Z'_{мкр}=0$, максимальное значение Z'_m на зоне будет равно $Z'_{mV}/4$. Учитывая, что смещением плоскости установки можно уменьшить меридиональную составляющую вдвое, имеем $Z'_m = Z'_{mV}/8$. Поперечная аберрация в меридиональном сечении в данном случае будет определяться выражением

$$\delta g' = Z'_m \cdot \mathrm{tg}\sigma'. \qquad (7)$$

В объективах, которые являются основой видеоанализаторов изображений, рабочие расстояния в пространствах предмета и изображения должны составлять не менее 20 мм. Введение рабочих расстояний в рассматриваемом случае приведет к появлению сферической аберрации и хроматизма положения. Для компенсации сферической аберрации можно установить концентрический мениск между плоско-выпуклой линзой и зеркалом (рис.4), который концентричен главному лучу и, следовательно, свободен от астигматизма и комы. Параметром, обеспечивающим устранение сферической аберрации, является толщина мениска. Коррекция хроматизма положения без особого труда осуществляется простым подбором марок стекол.

На этапе габаритного расчета, зная технические характеристики объектива (апертуру A, линейное поле $2y$ и рабочее расстояние s), можно определить габариты системы, а также приблизительно оценить качество изображения.

В соответствии с рис. 3, толщина призмы d_1 (рис.3) может быть найдена по формуле

$$d_1 = \frac{2 \cdot y + 2 \cdot s \cdot tg\sigma}{1 - 2 \cdot tg\sigma'}, \qquad (8)$$

где σ – апертурный угол в пространстве предметов, σ' – апертурный угол в пространстве изображений.

$$r_1 = -(n_2/n_3 \cdot s + d_1 + d_2), \qquad (9)$$

где d_2 – толщина плоско-выпуклой линзы, выбранная из конструктивных соображений; n_2 – показатель преломления призмы; n_3 – показатель преломления плоско-выпуклой линзы.

Радиус поверхности зеркала r_2 можно найти по формуле (1).

Расстояние d_3 между плоско-выпуклой линзой и зеркалом равно

$$d_3 = S'_f = -\frac{r_1}{n_1 - 1}. \qquad (10)$$

На первом этапе оценки качества изображения предположим, что плоскость предмета располагается на катете призмы, тогда, как было указано выше, система обладает только меридиональной составляющей астигматизма V порядка. По формуле (6) определим Z'_{mV}, а по формуле (7) вычислим поперечную аберрацию $\delta g'$. Сравниваем

полученное значение $\delta g'$ с заданным значением (в нашем случае $\delta g'$=0.04). Если оно не превышает заданное, то можно приступать к устранению сферической аберрации и хроматизма положения. С помощью автоматизированной программы *САРО* был получен объектив 1×0.35 с линейным полем 10×12 мм^2, рабочим расстоянием 20 мм (рис.4).

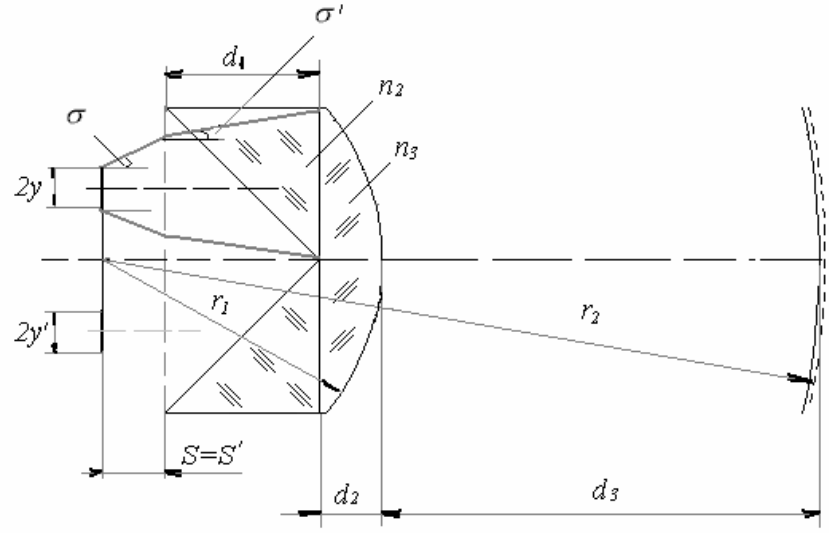


Рис. 3. Вспомогательная схема для вывода формул, позволяющих определить конструктивные параметры системы на этапе габаритного расчета

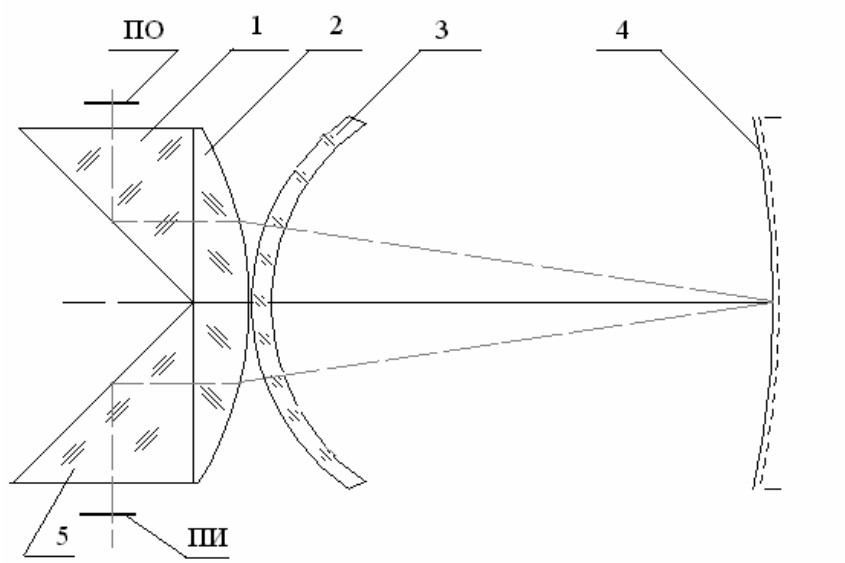


Рис. 4. Принципиальная оптическая схема ЗЛ объектива 1x0.35: ПО – плоскость объекта; 1,5 – прямоугольные призмы; 2 – плоско-выпуклая линза; 3 – концентрический мениск; 4 – зеркало, ПИ – плоскость изображения

Литература

1. Русинов М.М., Грамматин А.П. и др. Вычислительная оптика: Справочник // Под общ. Ред. Русинова М.М. Л.: Машиностроение, 1984. С.110–115.
2. Грамматин А.П. Некоторые свойства концентрических оптических систем.//ОМП. 1971. № 4. С26.
3. Романова Л.В. О возможности исправления аберраций в концентрической системе на основании рассмотрения хода действительного луча. / Сборник статей ЛИТМО, вып.19, 1956.

КОМПЛЕКС ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕЛАКСАЦИИ, ТРЕНИРОВОК И КОНТРОЛЯ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА ОПЕРАТОРА

В.В. Георгиади, И.А. Карасева, В.А. Лукашвили, В.В. Нечипоренко, Д.Н. Черкасова

В настоящее время не только значительно расширились традиционные области зрительной работы операторов, но и появились новые, что вызвано, в частности, увеличением номенклатуры оптических приборов. В качестве характерного примера можно привести видеосистемы различного назначения, крупногабаритные наблюдательные комплексы, наголовные приборы ночного видения, спортивные и охотничьи прицелы. Весьма актуальными стали задачи по оснащению наблюдательными оптическими приборами и системами безопасности на базе оптических приборов подразделений специального назначения. Проблема отбора, подготовки и поддержания в норме зрительных анализаторов операторов оптических приборов и систем самого разного назначения, на наш взгляд, представляет интерес не только для тех профессионалов, в основе деятельности которых лежит напряженная зрительная работа, но и для пользователей видеосистем широкого профиля.

Успешное выполнение зрительной работы осуществляется путем взаимодействия отделов коры головного мозга и обоих (парных) глаз. Сетчатки парных глаз, приемники лучистой энергии этой сложной биологической оптической системы, называют иногда частями зрительного мозга, вынесенными на периферию. Реализация функций зрения осуществляется с помощью тонкой мышечной системы, управляющей согласованным движением глаз и изменением диаметров зрачков, аккомодативной конвергенцией, рефракцией, гидродинамикой и другими параметрами с целью приспособиться к условиям наблюдения.

Анализ публикаций [1–5] и нормативной документации [1, 2, 6, 7] по вопросам эргономики зрительной деятельности показал, что при отборе операторов обязательно производится медицинское исследование зрения претендентов. В результате такого исследования выявляется соответствие зрительного анализатора принятой "норме" на основе пороговых параметров следующих наиболее показательных зрительных функций:

- **наличие стереоскопического зрения**, т.е. способности оценить расположение объектов по принципу "дальше – ближе" при наблюдении двумя глазами;
- **острота зрения**, т.е. способность различать два расположенных рядом объекта;
- **клиническая рефракция,** т.е. способность получить резкое изображение объекта, наблюдая как каждым глазом, так и двумя глазами, в том числе с применением средств оптической коррекции;
- **аккомодативная конвергенция**, т.е. способность видеть каждым глазом или двумя глазами одинаково резко объекты, расположенные на разных расстояниях;

Вообще же состояние зрения "в норме" всегда носит динамический характер и обеспечивается целым комплексом взаимосвязанных функций зрения. В частности, острота зрения значительно колеблется при изменении цвета и снижении контраста объекта и фона, на котором объект предъявляется, т.е. зависит от передаточной функции зрительного анализатора. А способность к аккомодации всегда зависит от возраста оператора. Доказана эффективность сочетания зрительных функций со звуковыми, кинестетическими и тактильными функциями. Эти очевидные для офтальмологов факторы, приводящие к росту или снижению эффективности зрительной работы оператора, недостаточно учитываются при выработке принципов подхода к подготовке операторов.

Общеизвестно отрицательное влияние на зрение некоторых видов профессиональной деятельности операторов. Причиной этого является большое и одностороннее мышечное и эмоциональное напряжение в течение длительного времени. Так, при работе с видеосистемами операторы подвергаются воздействиям экрана монитора,

влияющим, в частности, на внутриглазное давление и раздражающим слизистые оболочки глаз. Длительное наблюдение за объектом одного цвета вызывает психофизическое напряжение и имеет следствием спазм аккомодации глаз, снижение остроты зрения и физическое неприятие данного цвета, двоение изображения. Длительное и одностороннее напряжение зрения зачастую имеет место и при цикле тренировок на тренажерах различного назначения. В результате физиологические возможности зрения оператора постепенно снижаются. Если не принять специальных мер, например, не проводить регулярно отдых, не поддерживать, не контролировать и не тренировать зрение как таковое, снижение его параметров может приобрести необратимый характер, что приводит к преждевременной профессиональной непригодности.

Более того, в результате сочетания правильных и регулярных тренировок и профессиональной деятельности можно достичь индивидуальных предельных параметров зрения, превосходящих "норму". Особенностью профессиональной деятельности любого оператора является выполнение зрительной работы не в некоторых стандартных, а в самых разнообразных условиях. Поэтому целесообразно приводить в соответствие условия тренировок зрения и его работы в реальных условиях.

Таким образом, функции зрения можно оптимизировать и поддерживать на должном уровне только в условиях бережного и грамотного отношения к своим глазам.

Чтобы не только не ухудшить зрение оператора, но и достичь индивидуальной "нормы", применяют методы релаксации и тренировки зрения. Как показал анализ публикаций, существует два подхода к вопросу релаксации и тренировок зрения.

Профессиональный подход, который наиболее характерен для авиации и наземного транспорта, ориентирован на создание дорогостоящих тренажеров, в том числе виртуальных, для отбора и тренировок летчиков, авиадиспетчеров и водителей. В Вооруженных Силах СССР практиковалось проведение тренировок остроты зрения дальнометристов, осуществлявших наведение при стрельбе из дальнобойных орудий, на специальных тренажерах. К таким тренажерам можно отнести также тиры и полигоны. Любые специально разработанные тренажеры имитируют условия профессиональной деятельности операторов в ограниченных пределах. Они реализуют узкопрофессиональный, т.е. однобокий подход, и с трудом поддаются медицинской экспертизе. В них вообще не предусматриваются этапы расслабления, отдыха, снятия зрительного и эмоционального напряжения и контроля общего состояния зрительного анализатора. Но высоких результатов тренировок можно достичь только при комплексном подходе к зрению, т.е. при гармоничном восстановлении, поддержании и тренировках всех его функций.

Гуманистический подход основан на принципе "не навреди" **и** направлен на поддержание и контролируемую оптимизацию всех функций зрения вне зависимости от рода профессиональной деятельности.. Такой подход наиболее характерен, например, для детской офтальмологии, т.е. он ориентирован на тот возраст человека, когда большинство функций зрения только формируется и клиническая апробация наиболее наглядно демонстрирует как позитивные, так и негативные результаты, оцениваемые через контроль основных функций зрения. Гуманистический подход нашел ограниченное применение и в области космонавтики, в частности, при поддержании здоровья космонавтов во время работы на орбите.

К настоящему времени создан, прошел клиническую апробацию и получил разрешение Минздрава РФ к применению целый ряд оптических приборов, устройств и комплексов, направленных на решение отдельных задач поддержания работоспособности зрения. Каждый из компонентов этого ряда представляет собой некоторую автономную систему, функции которой имеют ограниченный характер. Причем для этапов релаксации, контроля и тренировок функций зрения характерно применение компьютерных технологий. Авторами предложена оригинальная методика, основанная на целевом объединении таких приборов, устройств и компьютерных технологий в единые

комплексы, позволяющие решать конкретные задачи поддержания и тренировки функций зрения операторов самого разного профиля. При этом методика построена на использовании положительных сторон как профессионального, так и гуманистического подходов. В ее основе лежит следующая идея: обеспечить снятие эмоционального напряжения, отдых, поддержание и тренировку, а также регулярный контроль зрения операторов без нанесения вреда их здоровью. Мобильный комплекс компонуется из оптических приборов, устройств и компьютерных программ, которые уже прошли тщательную клиническую апробацию, и имеет разрешение Минздрава РФ к применению вне клиники. Подтверждением этого является наличие соответствующих сертификатов Минздрава РФ и научных публикаций. Авторами предложен алгоритм действий при эксплуатации комплекса в виде периодически повторяющегося замкнутого цикла. Повторяющийся тренировочный цикл состоит из 20 одинаковых этапов и длится около 20 дней, после чего делается перерыв протяженностью не менее одной недели, что обеспечивает его эксплуатацию без вынужденных простоев. По нашему мнению, такой подход позволит в значительной мере превзойти результативность ранее существовавших тренажеров и не требует проведения новых дорогостоящих разработок и длительных клинических испытаний.

Разработанные комплекс и методика его использования построены таким образом, что допускается самостоятельная работа с приборами, без присутствия врача, по прилагаемым инструкциям и под контролем оператора, знакомого с эксплуатацией комплектующих приборов, компьютера и монитора. При этом условия выполнения этапов приводятся в соответствие с реальными условиями профессиональной деятельности. Любой врач-офтальмолог сможет следить за состоянием зрения каждого оператора, опираясь на результаты этапа контроля.

Тренировочный комплекс включает в себя:

- **релаксационные приборы и устройства**: лазерный стимулятор, аппарат массажа, прибор световой стимуляции, а также две компьютерных программы релаксации;
- **тренирующие приборы и устройства**: комплекс оптимизации зрительных функций на базе телевизора с видеоприставкой и набор учебных видеофильмов (формируемый с учетом особенностей деятельности операторов); комплекс компьютерных программ;
- **компьютерные программы оптометрического контроля** состояния зрительного анализатора оператора, включая получение передаточной функции центрального зрения;
- **приборы обеспечения**: два телевизора; два видеоплеера с набором видеофильмов; два компьютера, выбранные таким образом, чтобы соответствовать нормативным требованиям валеологии.

Предлагаемый комплекс приборов, устройств и компьютерных программ ориентирован на зрительный анализатор человека как такового. Это означает, что комплекс можно использовать при подготовке операторов любого профиля, деятельность которых основана на зрительной работе.

Разработка комплекса является первой попыткой привлечь внимание к проблемам профилактики, регулярного контроля и оптимизации функций зрительного анализатора, находящегося "в норме", т.е. здорового. Необходимость решения этой проблемы связана и со все возрастающим применением персональных компьютеров и оптических приборов, оснащенных мониторами.

Литература

1. Волков В.В., Луизов А.В., Овчинников Б.В., Травникова Н.П. Эргономика зрительной деятельности человека. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1976. 215 с.
2. Попов С. Н. Видеосистема *PC*. СПб: Арлит, 2000.- 400 с.
3. Урмахер Л.С., Айзенштат Л.И. Офтальмологические приборы. М.: Медицина, 1988288 с.
4. Черкасова Д.Н. Офтальмологическая оптика. Курс лекций. СПб.: ИТМО (ТУ), 2001. 190 с.
5. Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума "Технические и медицинские проблемы создания аппаратуры для массовых исследований функций зрения". М., 1979.
6. ГОСТ 21034-75. Рабочее место человека-оператора.
7. ГОСТ 21036. Тренажеры.

РАСЧЕТ КОМПЕНСАТОРА ШМИДТА

А.П. Грамматин

Зеркально-линзовый объектив Шмидта [1, 2] состоит из сферического зеркала и компенсатора сферической аберрации, выполненного в виде пластины с одной плоской, а другой деформированной поверхностями, установленной в центре кривизны зеркала. Входной зрачок объектива совмещен с оправой пластины. Поэтому в нем отсутствуют кома, астигматизм и дисторсия. Сферическая аберрация зеркала устраняется за счет деформации одной из поверхностей пластины. Хроматизм положения и сферохроматическая аберрация невелики благодаря малым величинам отступления асферической поверхности от плоскости. Размер безаберрационного поля ограничивается кривизной изображения, радиус поверхности которой равен фокусному расстоянию объектива. Достоинствами объектива Шмидта являются высокая светосила при дифракционном качестве изображения и возможность работы в широкой области спектра, не свойственная обычно зеркально-линзовым объективам. Основные недостатки – большая длина, равная двум фокусным расстояниям, кривизна изображения и технологические проблемы, связанные с изготовлением асферической поверхности.

Как будет показано ниже, объектив Шмидта может найти достойное применение для приборов, работающих в ИК области спектра, интерес к которым проявляется в последние годы весьма интенсивно. Однако и для видимой области спектра, благодаря достижениям в технологии изготовления асферических поверхностей, он не является бесполезным. Кроме того, компенсатор Шмидта может использоваться в сочетании с более сложными системами, чем одиночное зеркало, например, с двухзеркальными системами [1].

Расчет объектива Шмидта с помощью современных оптимизационных программ не представляет принципиальных трудностей, поскольку коррекции подлежат лишь аберрации осевого пучка лучей. Целью настоящей публикации является получение формул, выражающих зависимости волновых аберраций и максимальной деформации асферической поверхности при оптимальной коррекции от фокусного расстояния, диафрагменного числа и спектрального диапазона. Наличие таких зависимостей позволяет оценить возможности объектива Шмидта, не прибегая к выполнению коррекционного расчета.

Ограничимся рассмотрением поперечной сферической аберрации третьего порядка. Тогда в волновой мере эта аберрация w для сферического зеркала может быть представлена так:

$$w = b_1 m^2 + b_2 m^4, \qquad (1)$$

где m – координата луча на входном зрачке, b_1 – коэффициент, соответствующий смещению плоскости установки относительно плоскости Гаусса, b_2 – коэффициент, соответствующий сферической аберрации третьего порядка. Плоский волновой фронт после прохождения через пластину, у которой вторая поверхность деформирована и описывается уравнением

$$z = a_2 y^2 + a_4 y^4 , \qquad (2)$$

примет форму, соответствующую волновой аберрации

$$w = (n - 1) (a_2 y^2 + a_4 y^4)/\lambda. \qquad (3)$$

Поскольку волновая аберрация при обращении хода лучей сохраняет свою величину, то аберрация зеркала в ходе лучей от изображения к предмету также описывается уравнением (1). Поэтому для компенсации сферической аберрации зеркала волновые фронты, описываемые уравнением (1) и уравнением (3), должны совпадать. Принимая во внимание, что $y = m$, получаем

$$a_2 = b_1\lambda / (n - 1), \qquad (4)$$

$a_4 = b_2\lambda / (n - 1)$, (5)

где n – показатель преломления материала пластины для основной длины волны.

Минимизируем волновую аберрацию зеркала, введя плоскость установки. Если пренебречь аберрациями высших порядков, то, как известно [3], минимальное значение волновой сферической аберрации имеет место, когда для края отверстия она равна нулю. Из уравнения (1) следует, что при этом волновая аберрация достигает максимума w_m для луча с координатой $m_3 = \sqrt{0.5}\, m_1$, где m_1 – радиус входного зрачка, и равняется

$w_m = -0.25\, b_2\, m^4$. (6)

В этом случае достигается наименьшая деформация второй поверхности компенсационной пластины. Максимальное значение деформации Δz (рис. 1) имеет место там, где волновая аберрация достигает максимума, т.е. на основании формулы (6) для координаты на зрачке m_3. Очевидно, что на краю входного зрачка толщина пластины такая же, что и по оптической оси. По этой причине сферохроматическая аберрация для любых длин волн будет отсутствовать на краю отверстия и достигать максимума на зоне с координатой m_3, что соответствует оптимальной коррекции. Принимая во внимание, что сферическая аберрация для основной длины волны и зоны зрачка отсутствует, нетрудно получить зависимости сферохроматической волновой аберрации от величины максимальной деформации пластины Δz:

$w_1 = \Delta z\, (n - n_1)/\lambda_1$, (7)

$w_2 = \Delta z\, (n - n_2)/\lambda_2$, (8)

где n_1 – показатель преломления пластины для длины волны λ_1, n_2 – то же для длины волны λ_2.

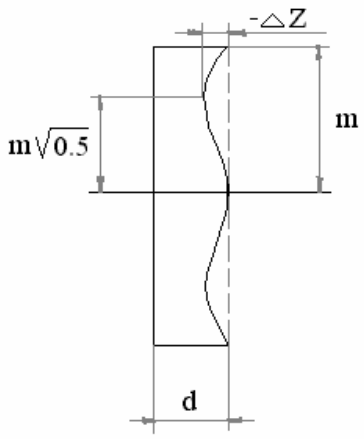


Рис. 1. К оценке максимального значения деформации

Волновая сферическая аберрация четвертого порядка w сферического зеркала с фокусным расстоянием f' и радиусом входного зрачка m для лучей с длиной волны λ может быть представлена в виде

$w = m^4 / 32\, \lambda\, f'^3$. (9)

Сопоставляя формулы (1) и (5), нетрудно получить

$a_4 = 1/32 f'^3\, (n - 1)$. (10)

Из уравнения (1) и (4) нетрудно найти также, что

$a_2 = -\, a_4\, m^2$. (11)

Максимальная деформация второй поверхности пластины может быть вычислена по формуле

$\Delta z = m^4 / 128 f'^3\, (n - 1)$, (12)

что позволяет оценить технологичность асферической поверхности пластины, не прибегая у подробному коррекционному расчету.

Коррекционный расчет системы Шмидта рекомендуется выполнять, используя формулы (10) и (11) для определения исходных значений коррекционных параметров. Поскольку при выводе вышеприведенных формул использовалась теория аберраций третьего порядка, а сферическая аберрация пятого порядка проявляется у сферического зеркала даже при небольшой светосиле, необходимо в качестве дополнительного коррекционного параметра использовать коэффициент a_6 при y^6 в уравнении асферической поверхности.

Предельное значение светосилы (диафрагменного числа) объектива Шмидта ограничивается сферохроматической аберрацией в соответствии с формулами (7) и (8). Практически при любом диафрагменном числе сферическая аберрация может быть полностью устранена. Проанализируем сферохроматическую аберрацию для различных диапазонов длин волн. Предварительно преобразуем формулу (7), подставив в нее значение Δz из формулы (12). Для некоторой длины волны λ_i рабочего спектрального диапазона при исправленной волновой сферической аберрации для основной длины волны волновая аберрация w_i составит

$$w_i = (n - n_i)\, m^4/128(n-1)\, \lambda_i\, f'^3. \qquad (13)$$

При $w_i = 0.25$, что обеспечивает апохроматическую коррекцию и число Штреля, равное 0.8 для длины волны λ_i , из формулы (13) следует, что радиус входного зрачка m_i равен

$$m = 2.38\, f'^{0.75}\, [(n-1)\, \lambda_i/|n - n_i|]^{0.25}. \qquad (14)$$

Для видимой области спектра, когда основная длина волны $\lambda = 546.1$ нм (спектральная линия *e*), спектральный диапазон ограничен длинами волн 479.99 нм (линия *F'*) и 643.85 (линия *C'*), а в качестве материала пластины использовано стекло К8, меньшее значение выражения, заключенного в квадратные скобки, имеет место для линии *F'* . Выражение (14) при этом принимает вид

$$m = 1.18 f'^{0.75}. \qquad (15)$$

Проверим полученные выше формулы на численном примере. Пусть фокусное расстояние объектива равно $f' = 500$ мм. Тогда из выражения (15) получаем, что $m = 125$ мм. Пластину выполним из стекла К8. Воспользовавшись формулами (10) и (11), находим приближенные значения коэффициентов уравнения асферической поверхности пластины $a_4 = 4.83\cdot10^{-10}$, $a_2 = -7.55\cdot10^{-6}$. При этом на краю отверстия волновые аберрации составляют $w_e = -0.75$, $w_{C''} = -0.64$, $w_{F'} = -0.85$, что свидетельствует об удовлетворительной точности вышеприведенных формул. После автоматизированной коррекции, выполненной при условиях, приведенных выше, коэффициенты уравнения асферической поверхности приняли значения $a_2 = -7.60\cdot10^{-6}$, $a_4 = 4.75\cdot10^{-10}$, $a_6 = 7.39\cdot10^{-16}$. Волновая аберрация w_e не превышает нескольких тысячных длины волны, максимальные значения волновых аберраций для дополнительных длин волн имеют место на зоне и составляют $w_{F'} = -0.26$, $w_{C'} = 0.19$. На краю отверстия величины этих аберраций практически равны нулю. Числа Штреля составляют 100% (*e*), 79% (*F'*), 89%(*C'*). Кома полностью отсутствует. Максимальная деформация второй поверхности, вычисленная по формуле (12), составляет 0.029 мм, реальная - 0.03 мм.

Для дальней инфракрасной области спектра $\lambda = 8$–14 мкм, когда в качестве материала компенсатора используется германий, формула (15) приобретает вид:

$$m = 6 f'^{0.75}, \qquad (16)$$

откуда следует, что при диафрагменном числе $K = f'/2m = 1$ максимальное фокусное расстояние, при котором достигается число Штреля, не меньшее 0.8 для всего диапазона длин волн, равно $f' = 20736$ мм. При меньших фокусных расстояниях и меньшей светосиле гарантируется лучшее качество изображения.

По сравнению с объективом Максутова, не содержащим асферических поверхностей, рассматриваемая система обладает несравненно большей светосилой. Линейное

поле изображения y' обеих сравниваемых систем ограничивается кривизной, которая в волновой мере может быть представлена в виде:

$$w = y'^2/16\,K^2 f'\lambda\,, \qquad (17)$$

где K – диафрагменное число.

Линейное поле параболоидального зеркала ограничивается комой, которая выражается формулой

$$w = y'/32K^3\lambda. \qquad (18)$$

В соответствии с выводами Марешаля [3] допустимое значение кривизны изображения, обеспечивающее дифракционное качество изображения, составляет 0.25, а допустимое значение комы 0.6. Подставив эти значения в формулы (17) и (18) соответственно, получаем

$$y' = 2K(f'\lambda)^{0.5}. \qquad (19)$$

$$y' = 19.2K^3\lambda. \qquad (20)$$

Так, при f' = 1000 мм, K = 2 и λ = 500 нм безаберрационное поле объектива Шмидта составит y' = 3 мм, а безаберрационное поле параболоидального зеркала y' = 0.08 мм. Преимущество объектива Шмидта очевидно.

Литература

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 638 с.
2. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М.: Логос, 2000. 581 с.
3. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М.: Мир, 1964. 295 с.

ЗАВИСИМОСТЬ АБЕРРАЦИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА АПЛАНАТИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ ВХОДНОГО ЗРАЧКА

Л. Н. Андреев, Н. А. Лаптева

Рассмотрена теорема Г.Г. Слюсарева в общем случае, когда и предмет, и изображение находятся на конечном расстоянии от оптической системы. Найдена зависимость сумм Зейделя S_{III} и S_V, а также астигматизма и дисторсии третьего порядка апланатических систем от перемещения входного зрачка. Приведены числовые примеры расчета.

В [1] приведены выражения для сумм Зейделя, определяющие все монохроматические аберрации третьего порядка, в виде, удобном для изучения влияния перемещения входного зрачка на аберрации:

$$\begin{aligned}
&\overline{S_I} = s_1;\\
&\overline{S_{II}} = gs_1 + Js_2;\\
&\overline{S_{III}} = g^2 s_1 + 2Jgs_2 + J^2 s_3;\\
&\overline{S_{IV}} = s_4;\\
&\overline{S_V} = g^3 s_1 + 3g^2 Js_2 + gJ^2(3s_3 + s_4) + J^3 s_5;
\end{aligned} \tag{1}$$

где $\overline{S_I}$, $\overline{S_{II}}$, $\overline{S_{III}}$, $\overline{S_{IV}}$ и $\overline{S_V}$ – приведенные суммы Зейделя, определяющие все монохроматические аберрации третьего порядка, для случая, когда предмет расположен на бесконечности; J – инвариант Лагранжа-Гельмгольца; g – отношение H_1/h_1, где h_1 и H_1 – высоты пересечения первого и второго параксиальных лучей с первым компонентом; s_1, s_2, s_3, s_4 и s_5 – величины, определяемые параметрами P и W и не зависящие от положения входного зрачка.

Из рассмотрения (1) вытекает известная теорема Г.Г. Слюсарева:

1. если $s_1 = 0$, то $\overline{S_I} = 0$ и $\overline{S_{II}}$ не зависит от g (положение зрачка)
2. если $\overline{S_I} = 0$ и $\overline{S_{II}} = 0$, то $\overline{S_{III}} = J^2 s_3$ не зависит от g.;
3. $\overline{S_{IV}}$ от g не зависит;
4. если $\overline{S_I} = \overline{S_{II}} = \overline{S_{III}} = \overline{S_{IV}} = 0$, то $s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = 0$, а, следовательно, $\overline{S_V} = J^3 s_5$ не зависит от положения зрачка.

Эта теорема имеет важное практическое значение при расчете оптических систем.

Ниже рассмотрен общий случай, когда и предмет и изображение находятся на конечном расстоянии. При следующих условиях нормирования:

$$\alpha_1 = \beta^{ч};\ \alpha' = 1;\ \beta_1 = 1;\ n = n' = 1;\ h_1 = s_1\alpha_1 = s_1\beta^x;\ H_1 = s_p\beta_1 = s_p;$$

$$J = n_1\alpha_1 y_1 = \beta^x(s_p - s_1);\ \Phi = (\alpha' - \alpha)/h_1 = (1 - \beta^x)/s_1\beta^x$$

выражения для аберраций третьего порядка и сумм Зейделя имеют вид:

$$\begin{aligned}
&\Delta s' = -1/2tg^2\sigma' S_I;\\
&\Delta y'_k = -3/2tg^2\sigma' tg^2\omega_1 S_{II};\\
&\eta = -1/2tg^2\sigma'/JS_{II};\\
&z'_s - z'_m = tg^2\omega_1 S_{III} = y_1^2/(s_p - s_1)^2 S_{III};\\
&\Delta y_D' = -1/2tg^3\omega_1 S_V = -1/2y_1^3/(s_p - s_1)^3 S_V,
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\Delta s'$ – продольная сферическая аберрация; $\Delta y_k'$ – меридиональная кома; η – отступление от условия изопланатизма; $z_s' - z_m'$ – астигматизм; $\Delta y_D'$ – дисторсия; σ' – апертурный угол в пространстве изображения; ω_1 – полевой угол в пространстве предметов; y_1

– величина предмета; s_1 и s_P – положение предмета и входного зрачка от первой поверхности (компонента) соответственно.

$$S_I = \sum hP;$$
$$S_{II} = \sum HP - J\sum W;$$
$$S_{III} = \sum H^2/hP - 2J\sum H/h\cdot W + J^2\sum\Phi; \qquad (3)$$
$$S_{IV} = \pi\sum\Phi;$$
$$S_V = \sum H^3/h^2\cdot P - 3J\sum H^2/h^2\cdot W + J^2\sum H/h(3+\pi)\Phi;$$

Для одного компонента формулы (3) принимают вид:

$$S_I = hP;$$
$$S_{II} = HP - JW;$$
$$S_{III} = H^2/h\cdot P - 2JH/h\cdot W + J^2\Phi \qquad (4)$$
$$S_{IV} = \pi\Phi;$$
$$S_V = H^3/h^2\cdot P - 3JH^2/h^2\cdot W + J^2H/h(3+\pi)\Phi;$$

Используя формулы (2) и (4), проведем исследование влияния перемещения входного зрачка на аберрации для тонкого апланатического мениска с увеличением $\beta = n^x$, у которого первая поверхность – второго рода (концентрическая), а вторая – третьего рода. Для апланатического мениска величины P и W равны нулю, т.е. отсутствуют сферическая аберрация и кома.

Рассмотрим величины S_{III} и $z_s' - z_m'$ при условии, что $S_I = S_{II} = 0$. Из (2) и (4), учитывая принятые условия нормирования, получим:

$$S_{III} = J^2\Phi = \frac{\beta^{x2}(s_P - s_1)^2(1-\beta^x)}{s_1\beta^x} = \frac{(s_P - s_1)^2\beta^x(1-\beta^x)}{s_1} \qquad (5)$$

$$z'_s - z'_m = \frac{y_1^{\,2}}{(s_P - s_1)^2}S_{III} = \frac{y_1^{\,2}}{(s_P - s_1)^2}\cdot\frac{(s_P - s_1)^2\beta^x(1-\beta^x)}{s_1} = y_1^{\,2}\frac{\beta^x(1-\beta^x)}{s_1} \qquad (6)$$

Из рассмотрения (5) и (6) следует, что в случае расположения предмета на конечном расстоянии $S_{III} = f(s_P)$, несмотря на то, что $S_I = S_{II} = 0$, а астигматизм не зависит от перемещения зрачка. Рассмотрим теперь S_V и $\Delta y_D'$.

$$S_V = J^2\cdot H/h\cdot(3+\pi)\Phi = \frac{\beta^{x2}(s_P - s_1)^2 s_P(1-\beta^x)}{s_1\beta^x\cdot s_1\beta^x}\cdot(3+\pi) = \frac{(s_P - s_1)^2 s_P(1-\beta^x)(3+\pi)}{s_1^{\,2}} \qquad (7)$$

$$\Delta y'_D = -1/2\frac{y_1^{\,3}}{(s_P - s_1)^3}S_V = -1/2\frac{y_1^{\,3}s_P(1-\beta^x)(3+\pi)}{(s_P - s_1)s_1^{\,2}} \qquad (8)$$

s_P	S_{III}	z_m'	z_s'	$z_s' - z_m'$	S_V	$\Delta y'/y'$ %
-95	0,19	-1,38	-0,63	0,75	0,44	-11,61
-90	0,75	-1,38	-0,63	0,75	1,65	-5,50
-50	18,75	-1,38	-0,63	0,75	22,92	-0,61
0	75	-1,38	-0,63	0,75	0	0
10	90,75	-1,38	-0,63	0,75	-22,18	0,06
20	108	-1,38	-0,63	0,75	-52,80	0,10
∞	675	-1,38	-0,63	0,75	-495	0,61

Таблица 1.Числовые значения сумм Зейделя S_{III} и S_V и аберраций третьего порядка, дисторсии и астигматизма при различных положениях входного зрачка

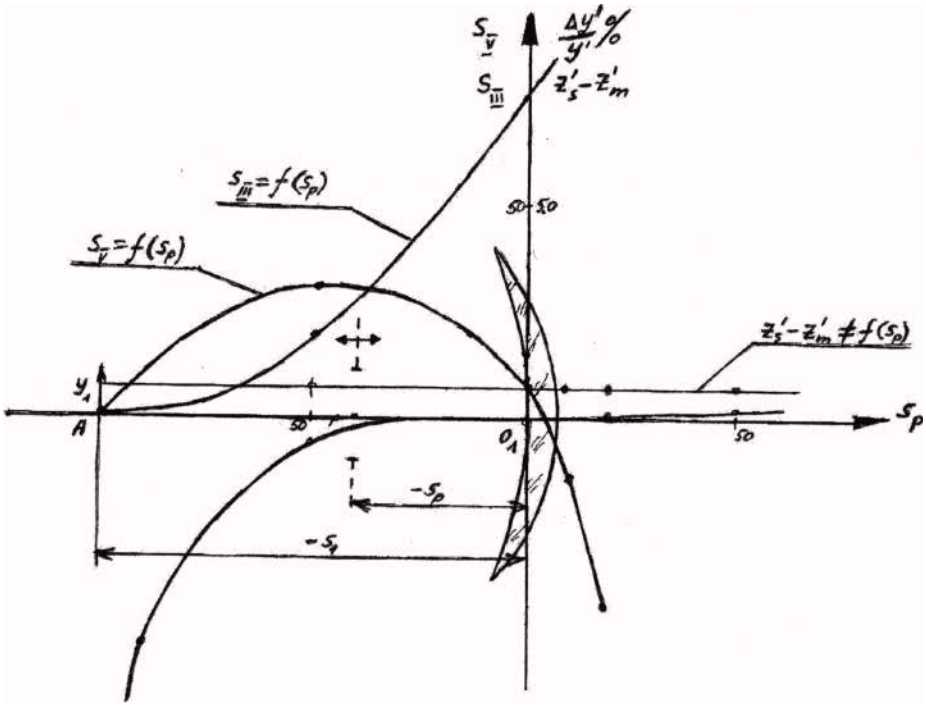


Рис. 1. Графики зависимости $S_{III} = f(s_P)$; $S_V = f(s_P)$; $z_s' - z_m' = f(s_P)$; $\Delta y'/y'\% = f(s_P)$ для апланатического мениска $\beta = n^X$

Из рассмотрения (7) и (8) видно, что $S_V = f(s_P)$ и $\Delta y_D' = f(s_P)$, т.е. они зависят от положения зрачка. Если же в апланатическиой системе Ф=0, то все суммы Зейделя и аберрации третьего порядка равны нулю.

Для иллюстрации сказанного в табл.1. и рис.1 приведены результаты расчета сумм Зейделя и аберраций третьего порядка для тонкого апланатического мениска с увеличением $\beta = n^x = 1.5$ со следующими конструктивными элементами: r_1 = -100, r_2 = -60, n = 1.5, s_1 = -100, y_1 =10 при различных положениях входного зрачка s_P

В заключение следует отметить, что теорема Г.Г. Слюсарева справедлива и в случае, когда и предмет, и изображение находятся на конечном расстоянии. Однако для апланатических систем ($S_I = S_{II} = 0$) сумма Зейделя S_{III} является функцией положения входного зрачка (5). Графически это парабола, вершина которой совпадает с точкой предмета А (рис.1). В то же время астигматическая разность является величиной постоянной (6) и не зависит от перемещения входного зрачка.

Что касается суммы S_V и дисторсии, то они обе являются зависимыми от положения входного зрачка и определяются выражением (7) и (8), рис.1.

В случае, если и оптическая сила Ф =0, то все суммы Зейделя и аберрации третьего порядка равны нулю.

Литература

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969.

ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ И СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ.

Н. А. Лаптева

Рассмотрены оптические системы – монохроматы для преобразования лазерного излучения, которые могут быть использованы в широкой спектральной области, т.е. имеющие полимонохроматическую коррекцию аберраций. Указаны свойства этих систем и область применения. Для иллюстрации приведены результаты расчетов объективов для оптической записи и считывания информации, обладающих дифракционным качеством изображения на разных длинах волн.

Введение

В последнее время оптическая память становиться одной из перспективных альтернатив магнитной или полупроводниковой памяти. Под оптической памятью понимается такое устройство, в котором хотя бы один из видов выборки информации (запись, стирание, считывание) осуществляется с использованием лучистой энергии. Преимуществом оптической памяти является быстрый доступ к массивам информации, высокая надежность хранения, отсутствие потребления энергии в статическом состоянии и другие. Плотность записи информации в оптическом запоминающем устройстве принципиально ограничена только дифракционным пределом применяемой оптики [1].

Принципиальная схема устройства для оптической записи включает лазер (источник излучения), оптический диск (приемник излучения), фокусирующий объектив, а также различные электронные и прецизионные механические устройства. Одним из основных узлов устройства является фокусирующий объектив, от числовой апертуры и качества изображения которого зависит плотность записи на оптическом диске.

Для оптической записи и считывания информации необходимы линзовые фокусирующие объективы с высокой числовой апертурой и увеличенным, по сравнению с обычными микрообъективами, рабочим расстоянием (не менее 4 мм). Кружок рассеяния в этих системах, в зависимости от решаемых задач, не должен превышать 0,6–2 мкм, а качество изображения для точки на оси должно быть близким к дифракционному. Линейные поля таких объективов, как правило, не превышают 0,1–0,2 мм, что вполне достаточно для слежения за информационной дорожкой. Важное требование к таким объективам – минимальная общая масса. [1]

Проведенный анализ литературы [3] показал, что за рубежом сначала велись расчеты многолинзовых систем состоящих из положительных и отрицательных линз, что приводило к жестким допускам на центрировку линз, потом при расчете объективов широко использовались однолинзовые системы с одной или двумя асферическими поверхностями высшего порядка. Такие объективы сложны в изготовлении, сложен контроль формы асферических поверхностей, поэтому большой процент от общей стоимости оптической системы записи и считывания информации составляет стоимость объектива.

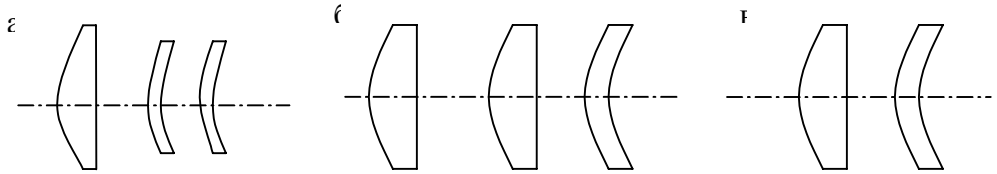


Рис. 1. Различные оптические схемы объективов со сферическими поверхностями A = 0,4-0,45: а) плосковыпуклая линза и два апланатических мениска; б) две плосковыпуклых линзы и апланатический мениск; в) плосковыпуклая линза с n ≥ 2,0 и апланатический мениск

В ЛИТМО в 80-е годы были рассчитаны объективы с апертурой А = 0.4–0.45, имеющие только сферические поверхности (рис.1), но они состояли из 2–3 линз.

Целью работы является разработка однолинзового объектива с числовой апертурой 0.35-0.45 с асферической поверхностью 2-го порядка.

Базовая схема объектива включает в себя два оптических модуля (рис. 2): защитно-коррекционный элемент (оптический диск) в виде плоскопараллельной пластинки и масштабно-компенсационной части, состоящий из одной линзы. Оптический диск (плоскопараллельная пластинка толщиной 1,2 мм) выполняет роль защитного слоя и вносит в оптическую систему положительную сферическую аберрацию.[1]

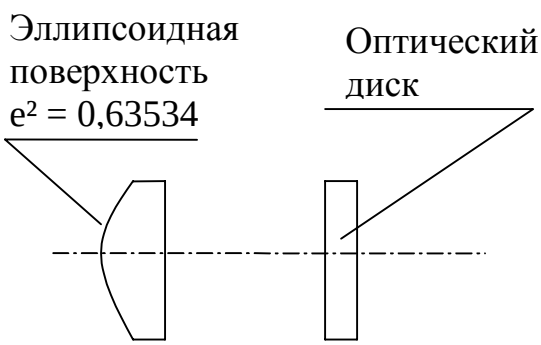


Рис. 2. Асферический однолинзовый объектив А = 0,4.

Теоретическая часть и реализация

У объективов для записи информации, учитывая их применение, прежде всего, должны быть исправлены сферическая аберрация (ΔS') и кома ($\Delta y'_к$).

$$\Delta S' = -1/2\, f' \cdot tg^2\sigma' \cdot \overline{S}_I ,$$

$$\Delta y'_k = -3/2 \cdot f' \cdot tg^2\sigma' \cdot tg\omega_1 \cdot \overline{S}_{II} .$$

Для объектива с одной асферической поверхностью второго порядка выражения для сумм Зейделя выглядят следующим образом:

$$\overline{S}_I = \overline{P} + \Delta\overline{P} = \overline{P}_A ,$$

$$\overline{S}_{II} = \overline{H} \cdot (\overline{P} + \Delta\overline{P}) + \overline{W} = \overline{H} \cdot \overline{P}_A + \overline{W} ,$$

где $\Delta\overline{P} = \dfrac{(\alpha' \cdot n' - \alpha \cdot n)^3}{(n' - n)^2} e^2$, e – эксцентриситет деформации поверхности. Тогда

$$y^2 = 2r_o x - (1 - e^2)x^2 .$$

В табл. 1 приведены результаты расчета основных параметров $\overline{P}_A$ и $\overline{W}$ для выпуклоплоской линзы в зависимости от e^2 и *n*.

e^2	0		0,5		1,0		1,5	
n	$\overline{W}$	$\overline{P}_A$	$\overline{W}$	$\overline{P}_A$	$\overline{W}$	$\overline{P}_A$	$\overline{W}$	$\overline{P}_A$
1,5	-0,33	2,33	-0,33	0,33	-0,33	-1,67	-0,33	-3,67
1,75	0,24	1,25	0,24	0,37	0,24	-0,52	0,24	-1,41
2,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0	0,50	-0,50

Таблица 1. Результаты расчета основных параметров $\overline{P}_A$ и $\overline{W}$ для выпуклоплоской линзы в зависимости от e^2 и *n*

На рис. 3 представлен график зависимости $\overline{P}_A$ = f (e^2,n). Связь между $\overline{P}_A$ и e^2 линейна, поэтому можно предварительно найти e^2, т.е. определить форму асферической поверхности: при $e^2 = 0$ – сфера, $e^2 = 1$ – параболоид, $0 < e^2 < 1$ – эллипсоид, $e^2 > 1$ – гиперболоид.

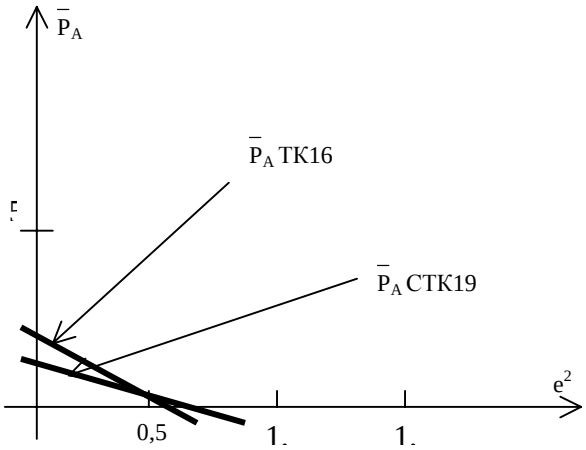


Рис. 3. Зависимости $\overline{P}_A$ = f(e^2,n) для выпуклоплоских линз из стекол ТК16 и СТК19

λ, мкм	*m*, мм	Δ*y*', мм	*N*/λ	η, %	Число Штреля
0,488	1,6	0,000072	0,1048	0,8272	0,79
	1,6√¾	0,000799	0,0467	0,5598	
	1,6√½	0,000583	-0,0489	0,3335	
	1,6√¼	-0,000056	-0,0917	0,1472	
	0	0	0	0	
0,6328	1,6	0,001593	0,1436	0,6382	0,8
	1,6√¾	0,001576	0,0048	0,4152	
	1,6√½	0,000745	-0,1134	0,2354	
	1,6√¼	-0,000294	-0,1370	0,0974	
	0	0	0	0	
0,800	1,6	0,002528	0,1608	0,5338	0,81
	1,6√¾	0,002079	0,0041	0,3355	
	1,6√½	0,000889	-0,1139	0,1814	
	1,6√¼	-0,000390	-0,1331	0,0701	
	0	0	0	0	

Таблица 2. Результаты расчетов объектива для оптической записи и считывания информации

По степени коррекции хроматических аберраций оптических систем различают: монохроматы (системы для дискретной длины волны или узкой спектральной области), ахроматы, у которых спектральная область простирается от линии F' до C', апохроматы, у которых спектральная область расширена до линии g или G и суперапохроматы (системы, у которых коррекция выполнена для видимой и УФ областей спектра).[2]. Однако при проектировании оптических систем для преобразования лазерного излучения было обнаружено, что системы, рассчитанные на дискретную длину волны лазера, имеют также вполне удовлетворительную коррекцию аберраций при перефокусировке и для других длин волн. Такие оптические системы могут быть названы полимонохроматами.

Для иллюстрации в табл. 2 приведены результаты расчетов объектива для оптической записи и считывания информации (m – координаты лучей на выходном зрачке, N/λ – волновая аберрация, η – величина, характеризующая отступление от условия изопланазии).

Заключение

Анализ проведенных аберрационных расчетов (табл. 2) показывает, что система может применяться с различными лазерами, в том числе Ar (λ = 0,488 мкм), He – Ne (λ = 0,632 мкм) и полупроводниковым (λ = 0,800 мкм), так как для всех перечисленных длин волн сохраняется практически дифракционное качество изображения. Это связано с высокой коррекцией сферохроматической аберрации при неисправленном хроматизме положения.

Литература

1. Андреев Л.Н. Прикладная теория аберраций. Учебное пособие. СПб. СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 96 с.
2. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 639 с.
3. Заявки ФРГ № 3231984, № 3236666; патенты США № 4257679, № 4332442, № 4258981, № 4270842, №4.768.867, №4.729.645, Японии № 63-31.766, EP №0.252.614

СОЗДАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЧЕРТЕЖЕЙ ОПРАВ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ КРУГЛОЙ ОПТИКИ

Н.Д. Толстоба, О.И. Иванилов

Статья посвящена автоматизации выпуска чертежей оправ для крепления круглой оптики. Рассматривается этапы формирования параметрического чертежа детали, делается акцент на расчете допусков.

Введение

Современное приборостроение без элементов автоматизации уже не обходится. Благодаря использованию систем автоматизированного проектирования (САПР), открываются перспективы развития отраслевых направлений автоматизации – например, специфических приборостроительных программ в помощь конструктору. Разработаны технические и программные средства, которые позволяют создавать и внедрять в производство САПР изделий различных отраслей промышленности.

С помощью техники облегчается процесс оформления конструкторских документов – чертежей, схем и других насыщенных изображениями стандартных, унифицированных и типовых составных частей. Такими частями являются типовые оправы для закрепления круглой оптики. Удается создать набор параметрических чертежей оправ, которые выполняют полноценные чертежи оправ с необходимыми допусками и посадками.

Крепление круглой оптики

Широко известны традиционные способы крепления круглой оптики. В данной работе было рассмотрено крепление резьбовым кольцом, завальцовкой или приклеиванием [1].

Крепление завальцовкой является неразъемным креплением оптической детали и выполняется за счет деформации тонкого края оправы во время завальцовки. При этом способе оптическая деталь удерживается в оправе ее тонкой кромкой, которая приобретает свою конечную форму в результате пластического деформирования металла во время завальцовки. Такое крепление является неразъемным. При креплении резьбовым кольцом оптическая деталь прижимается к опорному уступу оправы резьбовым кольцом, кромка которого нажимает на деталь с противоположной стороны. Это крепление является разъемным [2].

Параметрический чертеж

Параметрический чертеж – это программа, которая по заданным пользователем параметрам исполняет чертеж детали. Для подготовки параметрического чертежа необходимо пройти ряд этапов:

- создание таблицы для расчета конструктивных особенностей детали,
- составление параметрического эскиза детали,
- расчет вариантов сетки допусков,
- программирование отображения контура на чертеже,
- расчет и отображение размеров и допусков.

Таблица для определения размеров оправы

Таблицу для размеров детали заполняют опытным путем. Эта база таблиц становится основой для программирования параметрического чертежа. Каждая из оправ

имеет типовые размеры, зависящие от диаметра закрепляемой оптической детали (линзы), и таблицы, по которым можно определить все интересующие параметры детали. Как пример на рис. 1, 2 и в табл. 1 рассмотрена оправа для крепления завальцовкой.

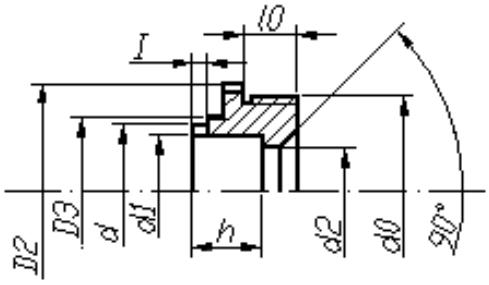


Рис. 1. Оправа для крепления завальцовкой

D_1	d_2	D	X	d_0	l_0	D_3
До 6	(d_1-0,6)	(d_1+0,5)	0,6	от (d_1+1) до (d_1+3)	от 2 до 5	(d_0-1)
св.6 до 10	(d_1-0,8)	(d_1+0,5)	0,8			
,, 10 ,, 18	(d_1-1)	(d_1+0,6)	1,2	от (d_1+1) до (d_1+4)	от 3 до 5	(d_0-2)
,, 18 ,, 30	(d_1-1,5)	(d_1+0,8)	1,5	от (d_1+2) до (d_1+6)		
,, 30 ,, 50	(d_1-2)	(d_1+1)	1,8			
,, 50	(d_1-2,5)	(d_1+1,2)	2,3	от (d_1+3) до (d_1+8)	от 6 до 12	(d_0-3)

Таблица 1. Сравнительные соотношения размеров оправы по рис. 1

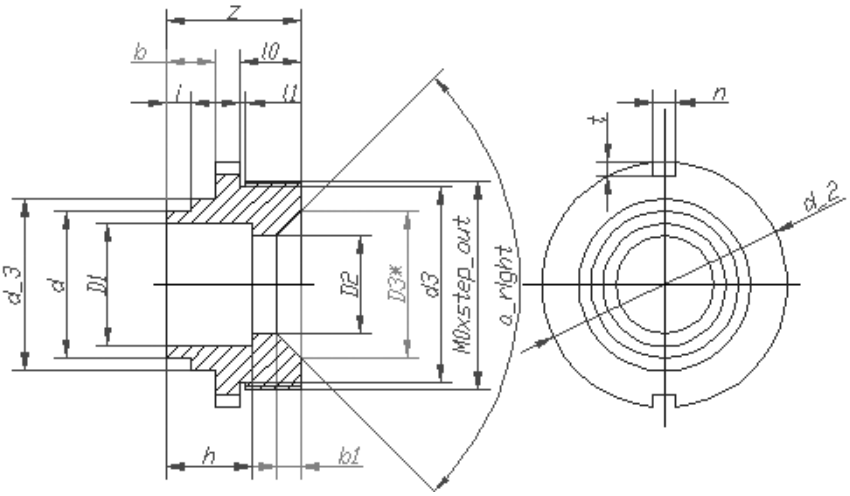


Рис. 2. Оправа для крепления завальцовкой

Расчет допусков

1. Допуск на децентрировку определяется расчетом.
2. Базой выбирается более крутая поверхность линзы
3. Допуск на исполнение посадочного диаметра линзы С рассчитывается исходя из соблюдения условия центрировки

4. Для оправы выбирается парное значение квалитета
5. Торцевое биение буртика рассчитывается исходя из конструктивных параметров линзы, оправы и допуска на децентрировку.
6. Производится расчет необходимых посадок для соблюдения точности продольного позиционирования детали

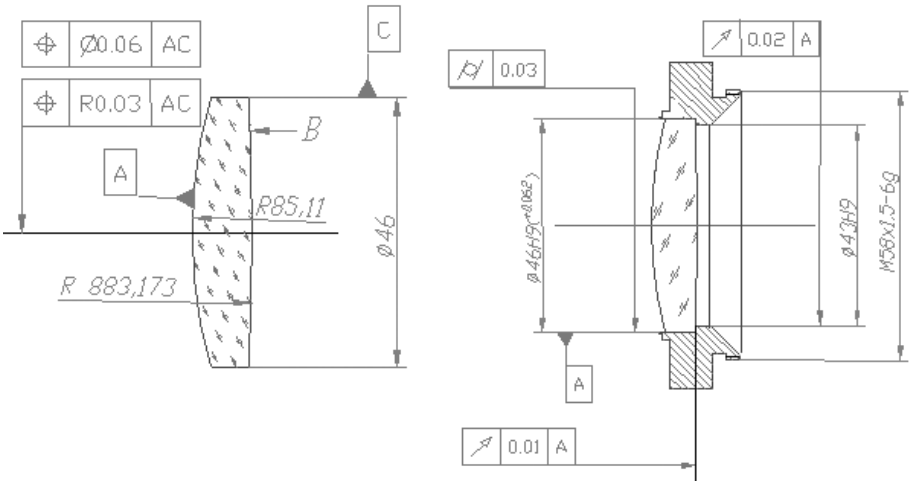


Рис. 3. Расчет допусков и посадок

Установка размеров и допусков

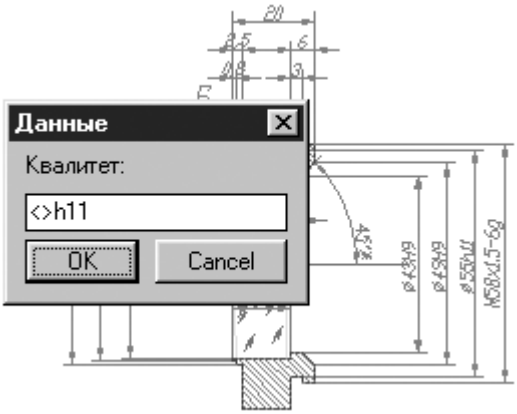


Рис. 4. Расчет допусков и посадок

Алгоритм работы автономной программы чертежа оправы

- Выбор типа оправы
- Определение конструктивных параметров детали
- Расчет допусков
- Отображение детали на чертеже
- Отображение размеров и допусков на чертеже
- Автоматизированное заполнение полей формата
- Сохранение готового чертежа на диске

Алгоритм работы программы сборочного чертежа линзы в оправе

- Определение параметров оптической системы
- Отображение закрепляемой оптики на чертеже
- Определение требований к изготовлению, допусков
- Выбор типа оправы

- Определение конструктивных параметров детали
- Расчет допусков
- Отображение сборочного чертежа
- Чертежи оптических деталей
- Чертежи механических деталей

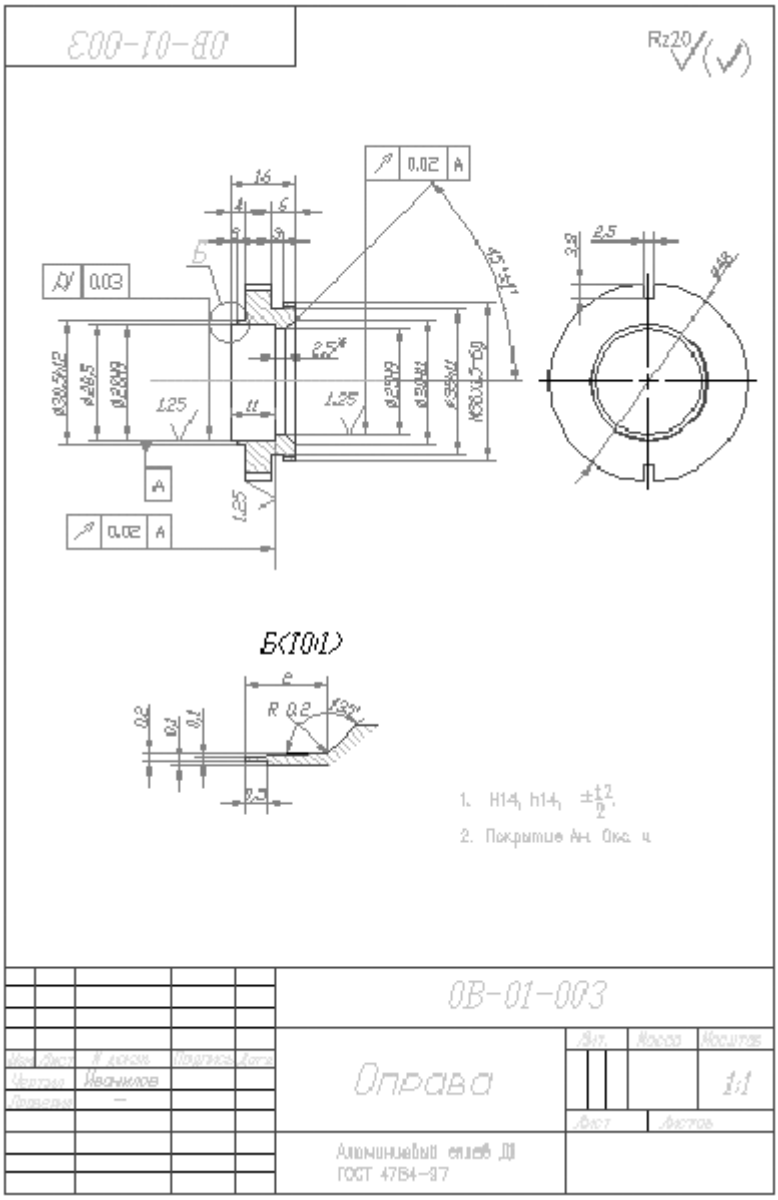


Рис. 5. Результат – чертеж оправы

Результат работы программы – параметрические чертежи оправ. Созданный пакет программ позволяет по введенным данным отображать выбранную оправу.

Необходимо отметить, что создание комплекса программ автоматизации конструирования, включающего в себя все возможные типы оправ круглой оптики, приведет к качественному прорыву в области проектирования оптических приборов.

Литература

1. Гжиров Р.И. Краткий справочник конструктора. Л: Машиностроение, 1983.
2. Ключникова Л.В., Ключников В.В. Проектирование оптико-механических приборов: Учеб. пособие для сред. спец. учеб. заведений. СПб.: Политехника, 1994.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ЧЕРТЕЖ ЗЕРКАЛА

Ю.А. Степанова, Н.Д. Толстоба

Статья посвящена автоматизации выпуска чертежей зеркал в среде автоматизированного конструирования. Рассматривается алгоритм создания и формирование чертежа зеркала – как сферического, так и асферического.

Введение

В последнее время все большее распространение получает использование компьютерных технологий и разработка программ для автоматизированного конструирования деталей. С помощью вычислительной техники облегчается оформление конструкторской документации – чертежей и схем, при этом система выполняет основную часть рутинных операций, предоставляя конструктору-проектировщику большие возможности для решения профессиональных творческих задач.

Зеркала применяются в оптических приборах для изменения направления светового пучка, оборачивания изображения, а также преобразования формы пучка. Используются плоские, сферические и асферические зеркала [1, 2]. Достоинствами зеркал по сравнению с призмами и линзами являются относительная простота изготовления, что позволяет получать большие размеры зеркал (до 2 и более метров в диаметре).

При изображении оптической детали используют общие правила машиностроительного и приборостроительного черчения, однако вследствие специфики назначения оптической детали требуется указать некоторые дополнения, а также выполнение особых нормативных требований [3, 4]. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий установлены ГОСТ 2.412-81 [5]. При выполнении чертежей и схем оптических изделий применяют обозначения:

- основных величин физической оптики – по ГОСТ7601-78;
- основных величин геометрической оптики – по ГОСТ 7427-76;
- элементов оптических деталей, предельных отклонений физических величин и допустимой неточности изготовления оптических деталей, шероховатости поверхностей – по ГОСТ 2.309-73;
- специальных оптических покрытий, классов чистоты полированных поверхностей – по ГОСТ 11141-76.

Правила выполнения чертежей оптических деталей с асферическими поверхностями

Рабочие чертежи асферических деталей должны оформляться в соответствии с требованиями ГОСТ 2.412-68 с уче том наиболее важных технологических показателей деталей, а именно:

- точности асферизации по местным ошибкам (α);
- «вершинной» асферичности A_1 для сплошных поверхностей или «сагиттальной» асферичности A_2 для кольцевых и внеосевых поверхностей, а также градиентов данных асферичностей (γ_1 или γ_2);
- отступления асферической поверхности от ближайшей сферы - a_3 или a_4 для 10-20 зон детали;
- крутизны поверхности по световому диаметру - φ_c;
- номера технологического класса асферических деталей - Кл.

Технологические показатели асферических деталей определяют возможность и целесообразность асферизации их с помощью тех или иных методов обработки и видов производственного и контрольного оборудования.

Выпуск параметрического чертежа зеркала

Задача автоматизации выпуска параметрического чертежа зеркала состоит из следующих подзадач:

1. автоматизация выпуска чертежа сферического зеркала;
2. создание библиотеки «Кривые второго порядка» для отображения на чертеже асферических поверхностей;
3. автоматизация выпуска чертежей зеркал с асферическими поверхностями;

Цель автоматизации выпуска параметрического чертежа зеркала – помощь конструктору-проектировщику при создании конструкторской документации.

Единый алгоритм для выполнения параметрического чертежа сферического и асферического зеркал состоит из этапов:

- отображение сферической (асферической) поверхности зеркала;
- рисование второй и цилиндрической посадочной поверхностей зеркала;
- указание необходимых размеров, знаков базовых и рабочих поверхностей, фасок, знаков покрытия и шероховатости; вывод штриховки;
- вывод технических требований на поле чертежа;
- вывод на чертеж уравнения асферической поверхности;
- заполнение таблицы характеристик;
- заполнение таблицы требований к асферической поверхности для асферического зеркала;
- заполнение рамки чертежа.

Результаты автоматизации выпуска параметрического чертежа зеркала

Результатом работы программы является параметрический чертеж сферического или асферического зеркала. Для отображения на чертеже асферической поверхности создана библиотека «Кривые второго порядка», которая включает в себя: эллипс, гиперболу и параболу. Созданное приложение позволяет по выбранным параметрам в диалоговых окнах «Сферическое зеркало» или «Асферическое зеркало» отобразить на экране чертеж зеркала.

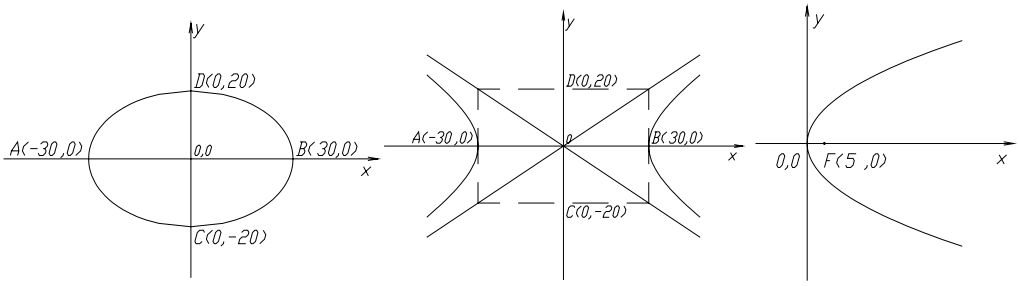


Рис 1. Кривые второго порядка – эллипс, гипербола и парабола

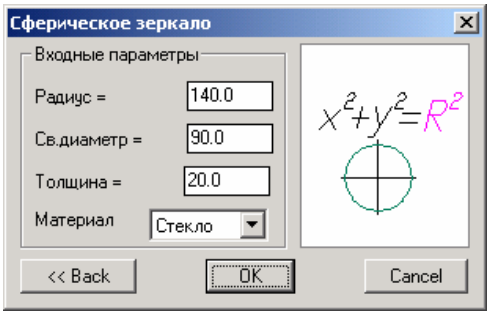


Рис 2. Диалоговое окно «Сферическое зеркало»

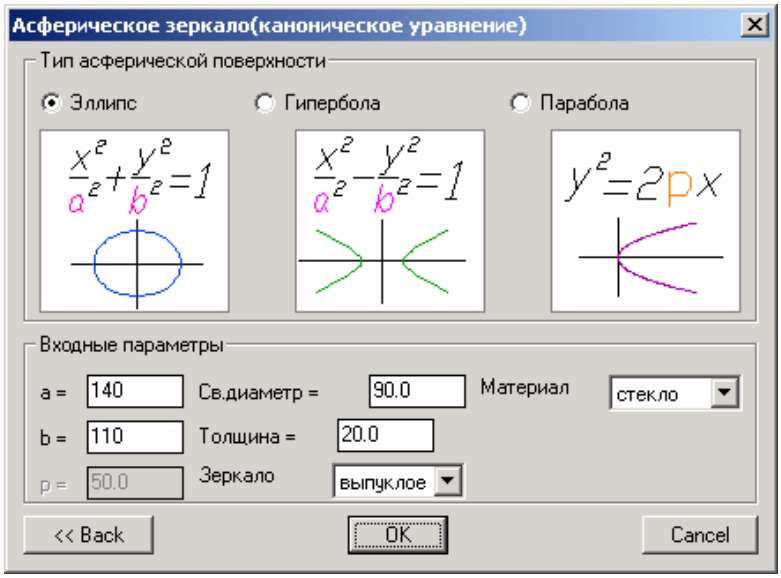


Рис 3. Диалоговое окно «Асферическое зеркало»

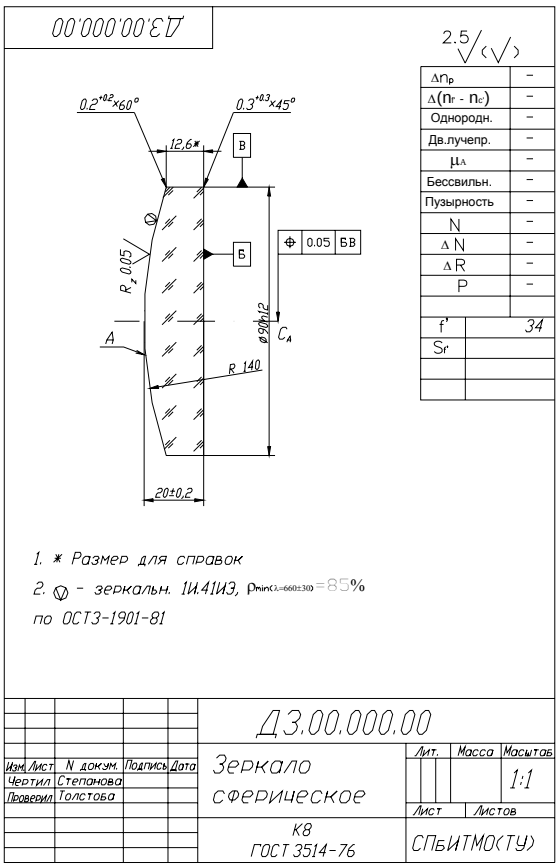


Рис. 4. Макет чертежа сферического зеркала

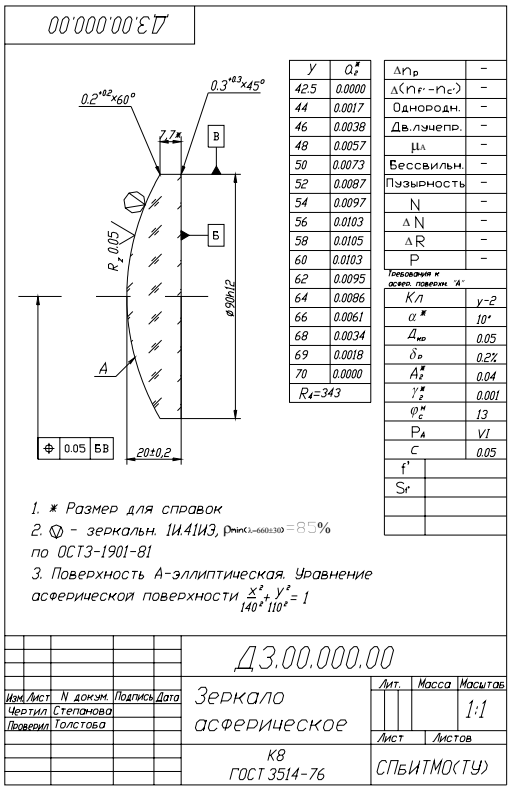


Рис. 5. Макет чертежа асферического зеркала с канонической формой представления уравнения асферической поверхности на чертеже

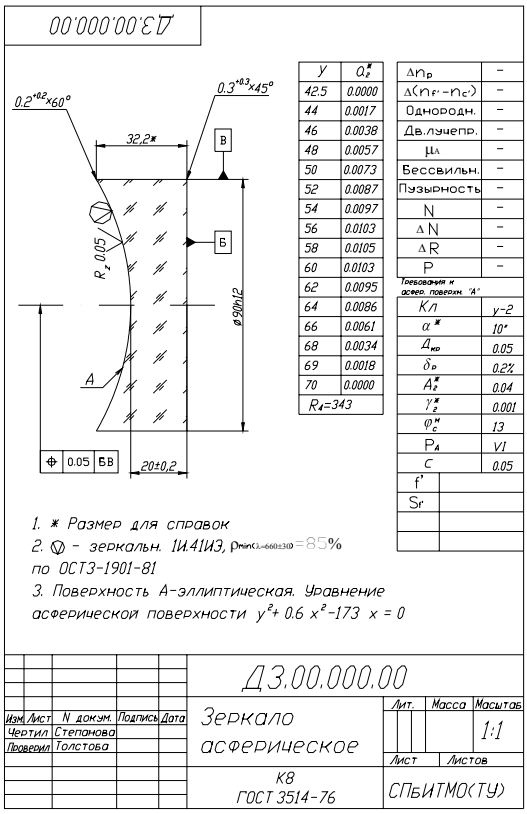


Рис 6. Макет чертежа асферического зеркала с квадратичной формой представления уравнения асферической поверхности на чертеже

Литература

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.Н. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1992.
2. Семибратов М.Н. Технология оптических деталей: Учебник для оптических специальностей технических вузов.- М.: Машиностроение, 1978.
3. Латыев С.М., Егоров Г.В., Тимощук И.Н. Проектирование оптико-электронных приборов и систем. Методические указания по выполнению курсового проекта. СПб, 2001.
4. Толстоба Н.Д., Цуканов А.А. Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. СПб, 2002.
5. ГОСТ 2.412-81(СТ СЭВ 139-74) Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.

МЕТОД ГАРТМАНА С РЕГИСТРАЦИЕЙ ГАРТМАНОГРАММЫ И ДИАФРАГМЫ В ОДНОМ МАСШТАБЕ

Л.М. Еськова, А.И. Стороженко

Описывается оригинальная схема контроля объективов по методу Гартмана, построенная таким образом, что диафрагма и ее изображение - картина пятен Гартмана - оказываются в одной плоскости. Использование этой схемы упрощает обработку изображений и снижает погрешность результата измерения.

Введение

Метод Гартмана успешно применяется для контроля объективов с преломляющей оптикой. Он незаменим в тех случаях, когда аберрации велики для контроля на интерферометре. Метод является надежным и во многих случаях единственным способом измерения аберраций.

В настоящее время используется полуавтоматический контроль оптики, включающий в себя регистрацию изображения и запись его в компьютер, а также последующую обработку по специально разработанной программе. Именно таким образом работает автоколлимационная схема контроля фотообъективов по методу Гартмана, рассматриваемая в данной работе. Благодаря ряду особенностей схемы обработка изображения диафрагмы и гартманограммы значительно упрощается.

Работа была выполнена в лаборатории компьютерных методов контроля оптики кафедры прикладной и компьютерной оптики.

Описание метода

Схема контроля представлена на рис. 1. При контроле используется автоколлимационный прибор от интерферометра ИКД-110, выходное окно которого показано на рисунке под номером 1. Автоколлимационный прибор служит для создания параллельного пучка лучей и переноса изображения в плоскость матрицы ПЗС. Кроме того, в автоколлимационном приборе имеется настроечная ветвь, позволяющая быстро и точно выполнить операции настройки схемы контроля. Параллельный пучок проходит через диафрагму Гартмана 2, испытуемый объектив 3, отражается от эталонного сферического зеркала 5 и возвращается обратно тем же путем. Металлический сетчатый экран 4 служит для грубой настройки схемы и убирается при тонкой настройке.

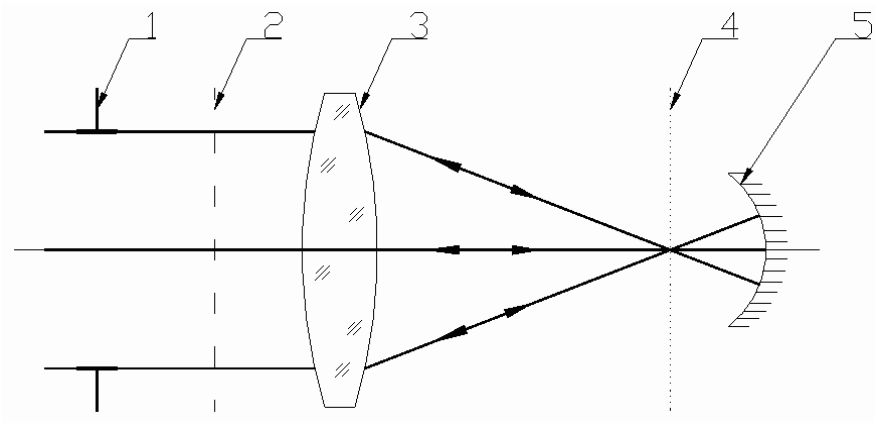


Рис. 1. Схема контроля

Диафрагма Гартмана находится в строго параллельном пучке лучей, поэтому картина дифракционных пятен – изображений от каждого отверстия диафрагмы – по масштабу и положению совпадает с самой диафрагмой. Эта картина несет информацию об

аберрациях объектива. Зарегистрированная картина дифракционных пятен называется гартманограммой (ГГ). Вид типичной ГГ показан на рис.2.

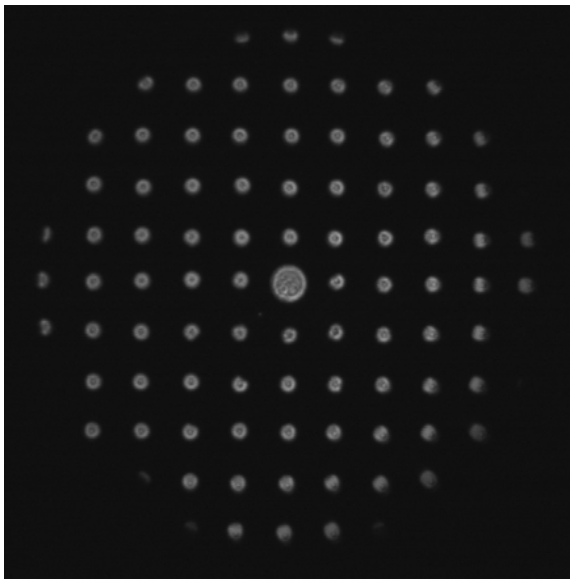


Рис. 2. Вид типичной гартманограммы

На рис.3 показана схема регистрации изображения диафрагмы Гартмана (ДГ). Убираются все детали предыдущей схемы контроля, кроме ДГ, и добавляется плоская эталонная пластинка 3, обеспечивающая возврат лучей во входное окно 1. Важно не смещать ДГ, не менять увеличение и фокусировку по сравнению с предыдущей схемой. Таким образом получается второй файл – с изображением ДГ.

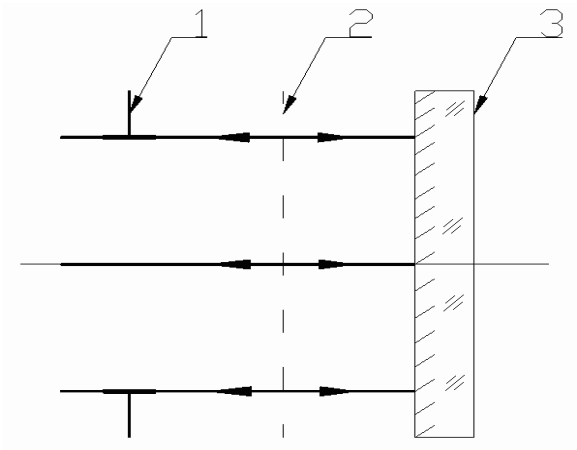


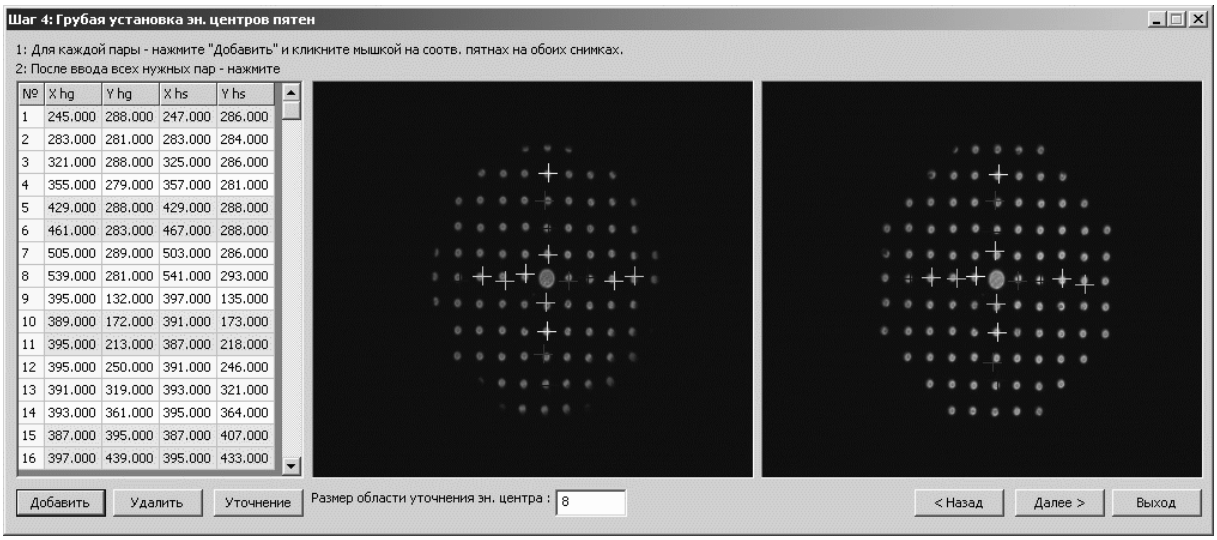
Рис. 3. Схема регистрации изображения диафрагмы Гартмана

Оба изображения, как ДГ, так и ГГ, выполнены в одном масштабе и без каких-либо смещений ДГ по отношению к ГГ. Это позволяет устранить при обработке операцию масштабирования снимков, а также операции смещения и поворота осей координат. Погрешности, связанные с выполнением этих операций, также полностью исключаются.

Описание программы обработки изображений

Программа разрабатывалась для учебной лаборатории, поэтому дополнительными требованиями к программе являлись наглядность и отображение последовательности операций.

Программа состоит из нескольких этапов. На рис. 4 показан этап грубой расстановки точек. Пользователь щелкает мышкой последовательно на пятне на ГГ и на ДГ. Одновременно появляется таблица с координатами выбранных точек. На рис. 4 точки расставлены по двум главным направлениям на зрачке



№	X hg	Y hg	X hs	Y hs
1	245.000	288.000	247.000	286.000
2	283.000	281.000	283.000	284.000
3	321.000	288.000	325.000	286.000
4	355.000	279.000	357.000	281.000
5	429.000	288.000	429.000	288.000
6	461.000	283.000	467.000	288.000
7	505.000	289.000	503.000	286.000
8	539.000	281.000	541.000	293.000
9	395.000	132.000	397.000	135.000
10	389.000	172.000	391.000	173.000
11	395.000	213.000	387.000	218.000
12	395.000	250.000	391.000	246.000
13	391.000	319.000	393.000	321.000
14	393.000	361.000	395.000	364.000
15	387.000	395.000	387.000	407.000
16	397.000	439.000	395.000	433.000

Рис. 4. Этап грубой расстановки точек

.Следующий этап обработки состоит в определении координат экстремумов с точностью до сотых долей пиксела. Задача уточнения координат состоит из:

1. выделения пятна рассеяния,
2. нахождение точных координат экстремума.

Алгоритм выделения достаточно прост и сводится к определению величины шума на снимке. На рис.5 представлен пример выделенного пятна рассеяния с увеличением 5^x.

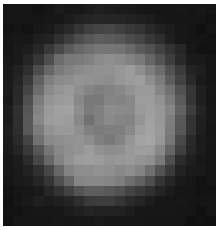


Рис. 5. Пример выделенного пятна рассеяния

Много сложностей появляется с выбором алгоритма уточнения. Очень хорошо зарекомендовал себя метод центра масс, так как он не зависит от формы выделенного пятна рассеяния, но его точности (~1–2 пиксела) недостаточно. Неплохим выходом явилось дальнейшее уточнение с помощью алгоритма параболической интерполяции. Такой алгоритм сочетает в себе модель идеализированного распределения интенсивности в пятне рассеяния и нелинейную скорость сходимости. На практике достаточно выполнить 2–3 итерации.

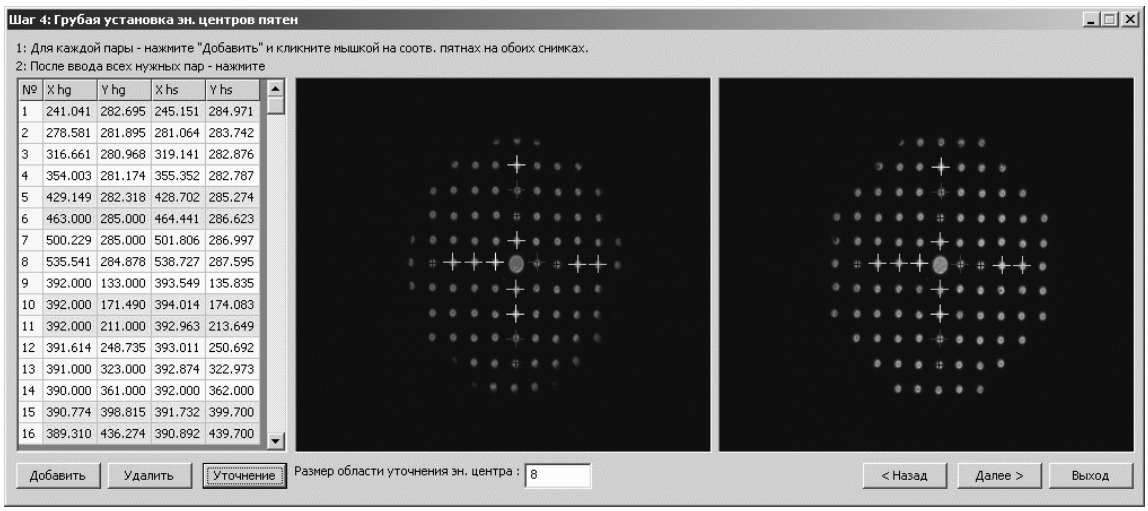
На рис. 6 представлен результат выполнения этапа уточнения координат.

На следующем этапе вычисляются поперечные аберрации в плоскости ДГ (ГГ), производится пересчет их в миллиметры, выполняется перенос их в фокальную плоскость испытуемого объектива и учет двойного прохождения лучей.

Для пересчета аберраций используется формула:

$$\Delta y' = \frac{\Delta y \cdot r \cdot f'}{f'^2 + r \cdot f' - d \cdot r}.$$

Обозначения в формуле соответствуют рис. 7.



№	X hg	Y hg	X hs	Y hs
1	241.041	282.695	245.151	284.971
2	278.581	281.895	281.064	283.742
3	316.661	280.968	319.141	282.876
4	354.003	281.174	355.352	282.787
5	429.149	282.318	428.702	285.274
6	463.000	285.000	464.441	286.623
7	500.229	285.000	501.806	286.997
8	535.541	284.878	538.727	287.595
9	392.000	133.000	393.549	135.835
10	392.000	171.490	394.014	174.083
11	392.000	211.000	392.963	213.649
12	391.614	248.735	393.011	250.692
13	391.000	323.000	392.874	322.973
14	390.000	361.000	392.000	362.000
15	390.774	398.815	391.732	399.700
16	389.310	436.274	390.892	439.700

Рис. 6. Результат выполнения этапа уточнения координат

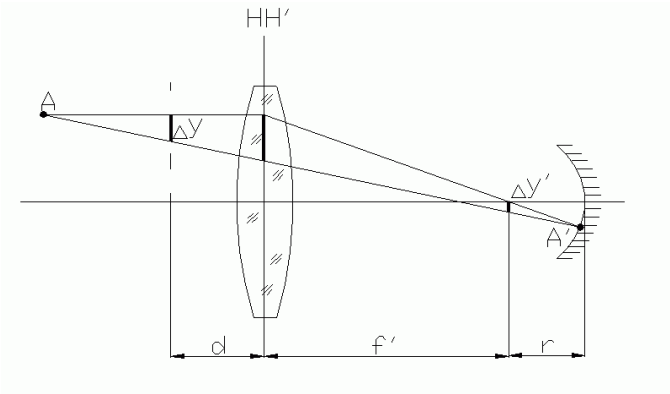
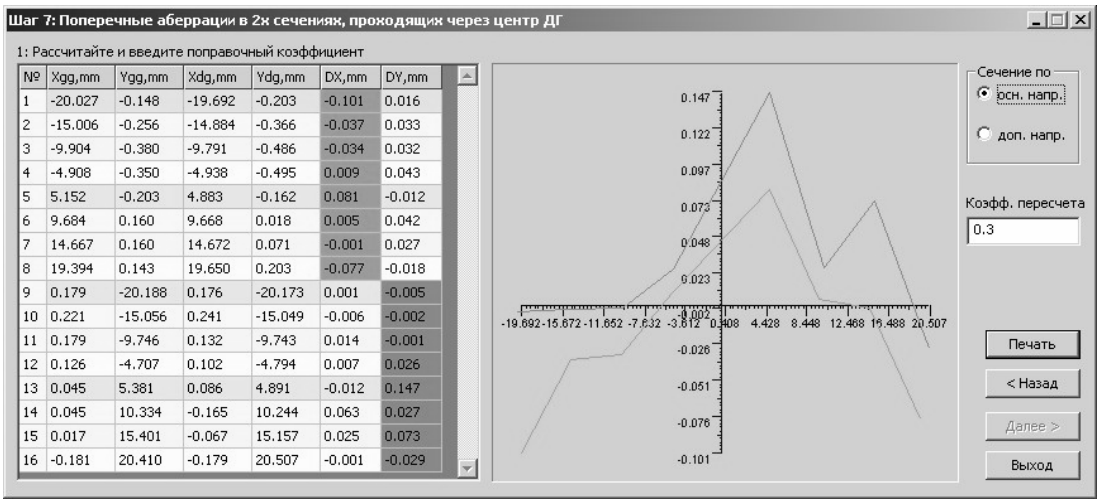


Рис. 7. К вычислению поперечных аберраций



№	Xgg,mm	Ygg,mm	Xdg,mm	Ydg,mm	DX,mm	DY,mm
1	-20.027	-0.148	-19.692	-0.203	-0.101	0.016
2	-15.006	-0.256	-14.884	-0.366	-0.037	0.033
3	-9.904	-0.380	-9.791	-0.486	-0.034	0.032
4	-4.908	-0.350	-4.938	-0.495	0.009	0.043
5	5.152	-0.203	4.883	-0.162	0.081	-0.012
6	9.684	0.160	9.668	0.018	0.005	0.042
7	14.667	0.160	14.672	0.071	-0.001	0.027
8	19.394	0.143	19.650	0.203	-0.077	-0.018
9	0.179	-20.188	0.176	-20.173	0.001	-0.005
10	0.221	-15.056	0.241	-15.049	-0.006	-0.002
11	0.179	-9.746	0.132	-9.743	0.014	-0.001
12	0.126	-4.707	0.102	-4.794	0.007	0.026
13	0.045	5.381	0.086	4.891	-0.012	0.147
14	0.045	10.334	-0.165	10.244	0.063	0.027
15	0.017	15.401	-0.067	15.157	0.025	0.073
16	-0.181	20.410	-0.179	20.507	-0.001	-0.029

Рис. 8. Результат работы программы

На рис. 8 приводится результат работы программы. В таблице представлены координаты отверстий ДГ в миллиметрах и поперечные аберрации по двум главным направлениям на зрачке. В колонках выделены однотипные поперечные аберрации. На графике показаны поперечные аберрации Δx'(X) и Δy' (Y). Аналогично можно вывести на экран графики составляющих поперечных аберраций Δx'(Y) и Δy' (X).

Программа была применена для контроля ряда объективов, как с малыми аберрациями – до одной длины волны, так и со значительными аберрациями – до пяти длин волн. Было получено полное совпадение результатов контроля по описанному методу с результатами контроля на интерферометре.

Выводы

Использование автоколлимационной схемы контроля позволило получить простую и удобную в настройке схему контроля фотообъективов по методу Гартмана.

Благодаря тому, что изображения диафрагмы Гартмана и гартманограммы получены в одном масштабе и без каких-либо смещений друг относительно друга, из обработки исключен этап масштабирования и устранения смещений.

Программа обработки наглядна и отображает все этапы выполнения обработки.

Литература

1. Бутаков Е.А., Островский В.И., Фадеев И.Л. Обработка изображений на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1987.
2. Павлидис Т.. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. М.: Радио и связь, 1986
3. Родионов С. А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982. 270 с.
4. Родионов С.А., Толстоба Н.Д. Анализ схем контроля астрономической оптики по методу Гартмана. // Международный симпозиум "Оптика XXI век", конференция “Прикладная оптика”, сборник тезисов, 17-19 октября 2000 года, Санкт-Петербург, Россия.
5. Толстоба Н.Д. Компьютерное моделирование гартмановского теста астрономической оптики. // Международная конференция молодых ученых и специалистов "Оптика-99", сборник тезисов, 19-21 октября 1999 года, Санкт-Петербург, Россия.

9 ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И МОНИТОРИНГ

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

А.В. Белобородов

Проблема улучшения экологии включает решение множества весьма сложных, нелинейных, трудно формализуемых и требующих знаний по многим аспектам экологии, в том числе по мониторингу окружающей среды. В целом любая мониторинговая система должна рассматриваться как мониторинговая экспертная система, которая выполняет контроль над состоянием среды и помогает человеку влиять на это состояние. Решение экологических задач в данное время представляет собой сложную проблему для всех стран мира. В первую очередь необходимо говорить об экономических трудностях решения экологических задач. Вести разработки, создавать и использовать специальные экологические системы (информационные, исследовательские и т.п.) стоит очень дорого, поэтому не все страны в состоянии поддерживать их состояние. Но, если не возникает трудностей в цене, на смену приходят другие – конструктивные, технические и другие проблемы.

Современные средства экологического мониторинга и обеспечивающие их информационно-управляющие системы представляют собой сложные многофункциональные многорежимные распределенные системы [1]. В таких системах осуществляется совместная обработка сложно организованных данных и знаний. Они должны разрабатываться на основе современных информационных технологий, которые обеспечили бы им существенное повышение уровня информационной и интеллектуальной поддержки. Проблемы информатизации при решении экологических задач принимают фундаментальный характер в связи с широким применением локальных и глобальных вычислительных сетей. Эффективность предсказания развития экологической ситуации (в том числе и разрушений) в том или ином районе, на предприятии или объекте зависит от решения этих проблем.

Выходом из создавшегося положения является использование информационных технологий, основанных на знаниях. Представление и организация обработки знаний о предметной области обеспечивается в таких системах в целях повышения эффективности управления и процесса принятия решений на различных уровнях иерархии. Актуальность рассмотрения такого класса систем обусловлена их способностью к накоплению и обобщению знаний, к выработке гипотез и прогнозу и принятию решений. При решении экологических задач возникают ситуации, когда либо отсутствуют необходимые датчики первичной информации, либо существующие средства измерений не обеспечивают получение требуемой информации в темпе с процессом, либо в наличии имеется лишь качественная информация об объекте управления. В таких ситуациях необходимо иметь информационные технологии, которые позволяют на основе компьютерной обработки качественной или нечеткой информации об объекте получить требуемую информацию для управления.

Экологический мониторинг рассматривается как система наблюдений и оценки состояния окружающей среды, а также как средство информационного обеспечения процесса подготовки и принятия управленческих решений. Исходя из этого, к задачам экологического мониторинга относят [1]:

- повторяющиеся в пространстве и во времени наблюдения за состоянием природных объектов и антропогенными воздействиями на окружающую среду;

• оценка по данным наблюдений интегральных показателей воздействия на окружающую среду и экологических рисков;

• прогнозирование последствий того или иного хозяйственного решения, а также вероятностей катастрофических природных явлений – как обусловленных антропогенными воздействиями, так и не связанных с ними;

• информационное обеспечение подготовки и принятия управленческих решений по охране природы и здоровья человека.

Считается, что экоинформационные системы включают в себя системы экологического мониторинга и служат функциональной основой процесса управления экологически безопасного развития на различных иерархических уровнях территориального деления (хотя возможна и другая точка зрения – это вопрос определений). В любом случае экоинформационная система должна обеспечивать решение множества задач [1–3]:

• подготовка интегрированной информации о состоянии окружающей среды, прогнозов вероятных последствий хозяйственной деятельности и рекомендаций по выбору вариантов безопасного развития региона для систем поддержки принятия решения;

• имитационное моделирование процессов, происходящих в окружающей среде, с учетом существующих уровней антропогенной нагрузки и возможных результатов принимаемых управленческих решений;

• оценка риска для существующих и проектируемых предприятий, отдельных территорий и т.п., с целью управления безопасностью техногенных воздействий;

• накопление информации по временным трендам параметров окружающей среды с целью экологического прогнозирования;

• подготовка электронных карт, отражающих состояние окружающей среды региона;

• составление отчетов о достижении целей устойчивого развития для федеральных и международных организаций;

• обработка и накопление в базах данных результатов локального и дистанционного мониторинга и выявление параметров окружающей среды наиболее чувствительных к антропогенным воздействиям;

• обоснование оптимальной сети наблюдений для региональной системы экологического мониторинга;

• обмен информацией о состоянии окружающей среды (импорт и экспорт данных) с другими экоинформационными системами;

• предоставление информации, необходимой для контроля за соблюдением принятых законов, для экологического образования, для средств массовой информации и т.д.

Таким образом, экоинформационные системы должны быть ориентированы на комплексное использование результатов экологического мониторинга, обеспечивая преобразование первичных результатов измерений в форму, пригодную для поддержки принятия решений, способствующих устойчивому развитию отдельных регионов и планеты в целом. По мере перехода от первичных результатов экологического мониторинга к знаниям о состоянии окружающей среды, меняются методы работы с информацией.

В экоинформационной системе можно выделить три уровня (рис. 1) [2], ориентированных на решение различных задач экологического мониторинга и отличающихся по методам работы с экологической информацией. Верхний уровень составляют программные модули для поддержки принятия решений, средний – программное обеспечение, позволяющее провести системный анализ информации о состоянии окружающей среды, а нижний – модули обработки первичной экологической информации.

На нижнем уровне экоинформационной системы для хранения данных о состоянии окружающей среды используются различные системы управления базами данных (СУБД), а для обработки результатов наблюдений используются различные программ-

ные продукты – электронные таблицы, пакеты прикладных программ типа MathCAD, Surfer и многие другие. Такое разнообразие программного обеспечения обусловлено громадным числом разноплановых задач обработки результатов наблюдений за состоянием окружающей среды, полученных с помощью локальных и дистанционных методов экологического мониторинга.

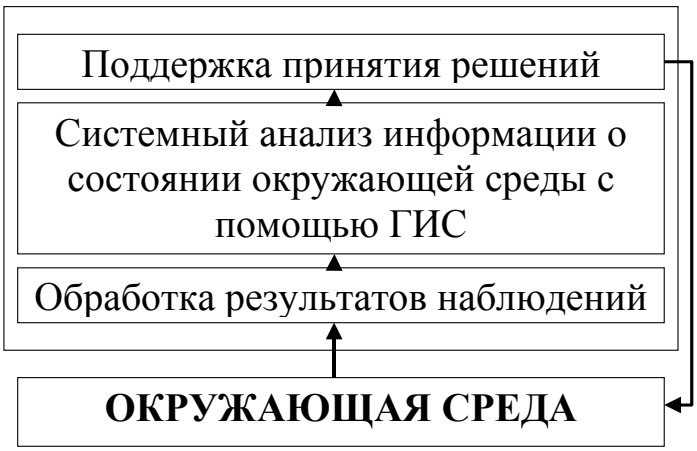


Рис.1. Формирование информации для поддержки принятия решений в экоинформационных системах

На среднем уровне экологической информационной системы для анализа информации о состоянии окружающей среды используются географические информационные системы (ГИС). Подобные системы, обеспечивая ввод, хранение, обновление, обработку, анализ и визуализацию всех видов географически привязанной информации, позволяют систематизировать выдачу такой информации для управления природными ресурсами, реализуя опыт, накопленный специалистами в этой области.

Информационные системы экологической безопасности, ориентированные на поддержку принятия решений, должны удовлетворять ряду новых требований, которые необходимо выполнить в процессе их построения. Для обеспечения поддержки принятия решений необходим еще один этап работы с информацией, позволяющий соотнести получаемые результаты со шкалой «хорошо – плохо». Такое соотнесение, прямо или косвенно, основывается на результатах мониторинга и имеет ряд специфических моментов – как научно-методических, при свертывании громадных объемов первичной информации, так и психологических, при представлении полученных результатов лицам, принимающим решения. В будущем системы поддержки принятия решений в области экологической безопасности неизбежно будут основываться на математическом моделировании процессов, происходящих в природе. Это неудивительно, так как схема «модель – гипотеза - эксперимент - установленный факт» составляет основу процесса познания практически в любой из многочисленных областей современной науки. В рамках математических моделей станет возможно и сопоставление между собой сведений из разных источников, и свертывание результатов мониторинга, и прогнозирование последствий того или иного хозяйственного решения.

Литература:

1. Экоинформатика. Теория. Практика. Методы и системы. / Под ред. академика РАН В.Е. Соколова. СПб: Гидрометеоиздат, 1992. 520 с.
2. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. Т.2. СПб, 1998. 592 с.
3. Моисеев Н.Н. Экология и образование. М.: ЮНИКАМ, 1996. 217 с.

РАЗРАБОТКА И АТТЕСТАЦИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОЧВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННО-ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ И ГРУНТОВ

И.Б. Максакова

В статье рассмотрена необходимость создания стандартных образцов почв с аттестованным значением содержаний элементов на основе техногенно-загрязненных почв. Качественный и количественный состав таких образцов наиболее соответствует реальному. Представлены сведения об этапах разработки стандартных образцов (выбор места отбора, отбор проб почв, процедура пробоподготовки, выбор методов анализа) для последующей аттестации. Результаты предварительного исследования позволили определить ориентировочные уровни содержания элементов.

В настоящее время при развитии промышленности, транспорта, энергетики, возрастающей химизации сельского хозяйства в водоемы и почву поступает огромное количество вредных веществ, что в конечном итоге приводит к глобальному загрязнению водоемов и суши. Многие из тяжелых металлов включены в список приоритетных компонентов – загрязнителей окружающей среды.

Установлено, что антропогенное поступление токсичных металлов намного выше естественного: например для ртути – почти вдвое, а для меди, цинка, свинца – более чем на порядок. Это свидетельствует о глобальном распространении тяжелых металлов в гидросфере. Опасность металлов усугубляется и тем, что, находясь в окружающей среде, они не подвергаются химической биоградации, как это свойственно органическим соединениям, а лишь перераспределяются между абиотическими и биотическими компонентами и взаимодействуют с ними.[1, 2] Некоторые соли металлов, например, меди, цинка, хрома, в слабо щелочной среде выпадают в осадок и тем самым обогащают иловые отложения водных объектов токсикантами, тем самым отрицательно влияя на процессы их самоочищения.

Высокая токсичность определяет жесткие нормативы, устанавливающие предельно допустимые уровни присутствия тяжелых металлов в различных объектах среды обитания, а, следовательно, и требования к соответствующим методам контроля. [1]

Основными современными методами для определения тяжелых металлов в объектах окружающей среды являются: атомно-абсорбционный, фотометрический, эмиссионный, атомно-эмиссионный в индуктивно-связанной плазме, масс-спектрометрический, рентгено-флуоресцентный, вольтамперометрический.

Для обеспечения достоверности получаемых результатов измерений все аналитические процедуры, включающие пробоотбор, градуировку и пробоподготовку, выполняют в соответствии с аттестованными методиками. Градуировка приборов предполагает использование стандартных образцов. Стандартные образцы должны соответствовать типу анализируемого объекта по диапазону содержания металла в анализируемой пробе и физическому состоянию (сплав, порошок, жидкость и т.д.).

В России существует несколько видов стандартных образцов (ГСО) содержания тяжелых металлов в почвах. Эти образцы изготовлены на основе почв черноземья, супесчаных, суглинистых дерново-подзолистых и других типов почв с различным матричным составом гуминовых соединений. В реестре существуют ГСО комплектов почв СП-1, СЧТ1-3, СДПС1-2, СГХМ 2-4, СГХ 3-5, т.е. и серые, и красные, и подзолистые почвы. Однако при таком наборе ГСО почв не по всем элементам удается измерить реальные содержания во всем нормируемом диапазоне. Для таких случаев используется метод приготовления искусственных проб. Но такие образцы не полностью отражают реальный качественный и количественный состав почв.

Принимая во внимание актуальность исследования загрязненности почв, сотрудниками ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и ЦЛ ГП «Невскгеология» впервые

проводится совместная работа по разработке и аттестации образцов на основе техногенно загрязненных почв. Для этого на территории Петродворцового района вблизи очистных сооружений возле площадки для свалки городского смета были отобраны 17 разведочных проб. Места отбора были выбраны на склоне между свалкой и Троицким ручьем, на берегу Троицкого ручья возле трубы аварийного сброса очистных сооружений, на полях сельскохозяйственных угодий (примерно в 2 километрах от архитектурного памятника «Бельведер», в 200 метрах от шоссе, недалеко от триангуляционного пункта). Из отобранных проб весом 25-30 кг каждая сформированы следующие образцы:

1. фоновый образец (БВДР-1);
2. образец с аномальным содержанием тяжелых металлов БВДР-2;
3. образец подвижной формы тяжелых металлов (БВДР-3).

Для каждого образца определен тип почв:

- БВДР-1 и БВДР-2 – почва суглинистая пылеватая коричневого цвета.
- БВДР-3 – почва супесчаная темно-коричневого цвета с включением разнозернистой гальки разной окатанности плюс фрагменты городского смета.

Образцы предназначаются для валового анализа и определения подвижных (водорастворимых) форм элементов.

Валовой анализ почвы – это комплекс определений, позволяющий установить валовой (элементный) состав почв, т.е. получить представление об общем содержании в почве химических элементов, независимо от формы их присутствия. Минеральная часть почвы представлена преимущественно весьма стойкими в химическом отношении компонентами (кварц, алюмосиликаты, силикаты), которые практически не растворяются в воде, органических и минеральных растворителях. Чтобы разрушить прочную кристаллическую решетку минералов и высвободить содержащиеся в ней химические элементы, сделав их доступными для определения методами классической аналитической химии, приходится прибегать к жестким способам воздействия, одним из которых является расплавление минералов при нагревании. Охлажденный сплав обрабатывают водой и растворами кислот, в результате чего химические элементы, составляющие почву, переходят в истинные или коллоидные растворы, из которых их последовательно выделяют для определения. [2]

Основная масса твердого вещества почвы представлена соединениями, которые не растворяются в воде, кислотах, щелочах, органических растворителях. Кроме них, во всех почвах имеется некоторое количество легко- и среднерастворимых соединений (подвижных или водорастворимых форм). Для определения этих веществ используют водную, слабокислотную вытяжки или экстракцию буферными растворами.[2]

В наших исследованиях для получения сравнимых результатов подготовка пробы к анализу была строго регламентирована.

Для межлабораторного эксперимента (проводимого с целью аттестации образцов) мы предложили определенную процедуру пробоподготовки для разных типов образцов. Для водорасторимых (подвижных) форм в качестве процедуры пробоподготовки мы предложили способ, описанный в РД 52.18.191-89. Навеску анализируемой пробы массой 2.0 г помещают в стеклянный стакан, приливают 10 см^3 5 М азотной кислоты, перемешивают и выдерживают при температуре 90°С и при перемешивании в течении 3-х часов. Затем пробу фильтруют через бумажный фильтр. Фильтрат используют для анализов.

Для фоновых и аномальных форм используется способ разложения проб почв смесью концентрированной азотной кислоты и перекиси водорода. Навеску анализируемой пробы массой 1.0 г помещают в стеклянный стакан, приливают 20 см^3 концентрированной азотной кислоты, перемешивают и постепенно нагревают на электрической плите при температуре 95°С, избегая бурного кипения. При уменьшении объема

пробы до 10 см^3 пробу охлаждают до комнатной температуры и добавляют 2 см^3 перекиси водорода (33%), затем снова нагревают пробу до температуры 95^{0}С и доводят до состояния «влажных солей». По охлаждении пробы до комнатной температуры, пробу выщелачивают при слабом нагревании (до 50°С) 5 см^3 концентрированной азотной кислоты, затем пробу охлаждают до комнатной температуры.

После охлаждения анализируемый раствор доводят бидистиллированной водой до объема 100 см^3. Если в обработанной пробе почв осталась взвесь, ее удаляют фильтрованием пробы в сухую посуду через фильтр «синяя лента».[2]

Результаты предварительного исследования позволили определить ориентировочные уровни содержания элементов, которые представлены в табл. 1.

Металл	Интервалы содержания элементов в комплектах ГСО		
	ГСО на подвижную форму, мг/кг	ГСО фонового состава, мг/кг	ГСО зараженного состава, мг/кг
мышьяк	<5	2-5	50-100
селен		<2	5-10
кадмий	<2	<0,5	2-5
ртуть	<2	<2	2-10
свинец	50-100	20-50	500-1000
цинк	200-500	50-100	500-1000
бром		20-50	20-50
кобальт	5-10	5-10	50-100
никель	50-100	20-50	20-50
молибден		<0,5	10-20
медь	200-500	10-20	200-500
сурьма		<0,1	2-5
хром	100-500	10-20	500-1000
барий		20-50	500-1000
ванадий		10-20	50-100
вольфрам		<1	50-100
марганец	500-1000	500-1000	2000-5000
стронций		<100	>100
уран		<2	5-10
торий		<2	<2
талий		<2	<2

Таблица 1. Ориентировочные уровни содержания элементов в ГСО

В настоящее время планируется проведение дополнительных межлабораторных исследований, на основании которых будут аттестованы значения массовых концентраций элементов в образцах. Включение образцов в Государственный реестр стандартных образцов планируется в 2005 году.

Литература

1. Перевозников М.А., Богданова Е.А. Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. СПб: ГосНИОРХ, 1999.
2. Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И. и др. Химический анализ почв. СПб: Издательство СПбГУ, 1995.

СРАВНЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ГОНИОМЕТРИЧЕСКИМ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.С. Найденов, О.Ю. Николаева

Основными методами измерений показателя преломления с высокой точностью являются гониометрический и интерференционный. В данной работе рассматриваются их основные характеристики, исследуется точность, которую можно получить при измерении показателя преломления данными методами.

В государственном рабочем эталоне показателя преломления для воспроизведения единицы и передачи ее размера использован интерференционный метод определения показателя преломления, заключающийся в вычислении показателя преломления из условий интерференции для интерферометра Фабри-Перо с исследуемой мерой и без нее. Исследование характеристик интерференционной установки позволило оценить границы неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы.

Основными составляющими погрешности определения целых порядков интерференции в исследуемой мере являются погрешность измерения показателя преломления призмы, из которой изготовлены меры, на гониометре и погрешность определения высоты меры. Исходя из требования однозначности определения порядков интерференции, определено допустимое значение погрешности измерений на гониометре. При определении высоты меры с погрешностью не более 0,015 мкм погрешность определения целых порядков не превысит 0,25 порядка, если измерение показателя преломления на гониометре выполнено с СКО $5\cdot10^{-6}$.

Влияние групп факторов, обусловленных структурой стекла и несовершенством технологий его производства, на ограничение точности измерения показателя преломления проанализировано в работе [1], где показано, что измерения показателя преломления в заготовках стекол, размеры которых равны размерам меры (10×10×30 мм), лежат в пределах $5\cdot10^{-5}$–$1\cdot10^{-7}$.

Таким образом, границы неисключенной систематической погрешности воспроизведения показателя преломления, обусловленные влиянием перечисленных факторов, составляют $2\cdot10^{-6}$ при доверительной вероятности 0,99.

При измерениях показателя преломления интерференционным методом результирующий эффект определяется оптической длиной пути луча, прошедшего через исследуемую меру, поэтому относительное изменение показателя преломления пропорционально относительному изменению $\frac{\Delta\ell}{\ell}$ оптической длины пути луча, т.е.

$$\frac{\Delta n_c}{n_c} \cong \frac{\Delta\ell}{\ell} = \frac{W_t d(t-t_0)}{d(n_c-1)}. \qquad (1)$$

Здесь $W_t = \beta_{t_1\lambda} + \alpha(n_c - 1)$ – термооптическая постоянная, зависящая для данной марки стекла от интервала температур и длины волны, α – температурный коэффициент линейного расширения стекла.

Найдем значение $\frac{\Delta n_c}{n_c}$ для стекол марок К8 (n_c=1,5) и ТФ10 (n_c=1,8) при измерении температуры образцов на 1 ºС. Значения термооптических постоянных Wt при λ=0,457 мкм соответственно равны $65\cdot10^{-7}$ ºС$^{-1}$ и $200\cdot10^{-7}$ ºС$^{-1}$, следовательно, получим для К8 $\frac{\Delta n}{n_c}$=$13\cdot10^{-6}$, для ТФ10 $\frac{\Delta n}{n_c}$ =$25\cdot10^{-6}$.

При поддержании температуры в интерферометре Фабри-Перо с погрешностью, не превышающей 0,01ºС в течение времени измерений, для абсолютных изменений по-

казателя преломления Δn указанных марок стекол получим, соответственно, $0{,}2\cdot10^{-6}$ и $0{,}45\cdot10^{-6}$.

Погрешность воспроизведения единицы показателя преломления, обусловленная наклонным падением света на меру, выражается соотношением:

$$\Delta n_{c_i}^{H} = \frac{\lambda_{в}^{H}\left(M_{c} - L_{в}\right)\sin i}{2d^{t_o}\left[1+\alpha\left(t-t_o\right)\right]}\Delta i \ . \qquad (2)$$

Значение Δi=30 ºС соответствует $\Delta n_{c_i}^{H} = 1\cdot10^{-7}$.

Погрешность воспроизведения единицы показателя преломления, обусловленная погрешностью определения показателя преломления воздуха, выражается соотношением:

$$\Delta n_{c_{n_в}}^{H} = \frac{1}{n_{в}^{H}}\Delta n_{в} \ . \qquad (3)$$

Показатель преломления воздуха вычисляется по формуле Эдлена [2] по измеренным значениям давления, влажности и температуры. Давление измеряют ртутным барометром, погрешность определения давления 0,3 мм рт.ст. Влажность определяют аспирационным психрометром, погрешность определения влажности 0,3 мм рт.мт. Температуру в камере измеряют ртутным термометром, погрешность измерения температуры 0,01 ºС. Указанные значения погрешностей измерения давления, влажности и температуры обусловливают погрешность определения показателя преломления воздуха $1\cdot10^{-7}$, что в соответствии с формулой (3) составляет $\Delta n_{c_{n_в}}^{H} = 1\cdot10^{-7}$.

Таким образом, случайная погрешность воспроизведения единицы показателя преломления не превышает $1\cdot10^{-7}$.

Исследование метрологических характеристик эталона подтвердили полноту и правильность выполнения теоретического анализа метода; показали, что используемые в составе эталона средства измерений обеспечивают воспроизведение единицы и передачу ее размера с необходимой точностью.

Гониометрический метод измерения

Известно, что, если луч света попадает на грань призмы параллельно ее главному сечению под некоторым углом α, то после преломления в ней луч окажется отклоненным от первоначального направления на некоторый угол ε. Фраунгофером [3] был предложен метод, упрощающий вычисления показателя преломления, суть которого сводится к измерениям при таком положении призмы, при котором угол ε имеет минимальную величину ε_{min}. В этом случае угол падения равен углу выхода, т.е. α=β, и можно записать:

$$n = \frac{\sin\frac{1}{2}\left(\varepsilon_{\min} + \theta\right)}{\sin\frac{\theta}{2}} \ , \qquad (4)$$

где θ – преломляющий угол призмы (угол между гранями, на которых происходит преломление луча света), β – угол входа луча.

Метод Фраунгофера [3] получил название метода наименьшего отклонения и в настоящее время широко применяется для определения показателя преломления стеклянных призм в широкой области спектра излучения длин волн.

Преломляющий угол θ призмы измеряют автоколлимационной наводкой зрительной трубы гониометра перпендикулярно обеим преломляющим граням:

$$\theta = 180° - \left(\varphi_1 - \varphi_2\right)$$

где φ_1 и φ_2 – отчет по лимбу. Угол наименьшего отклонения $\varepsilon_{\min}$ измеряют после установления призмы в положение наименьшего отклонения. С целью увеличения точности измерений определяют удвоенный угол, который получается при двух установках образца симметрично относительно оси коллиматора. В этом случае

$$2\varepsilon_{\min}=\varphi_3-\varphi_4,$$

где φ_3 и φ_4 - отчет по лимбу. Погрешность определения показателя преломления может быть вычислена по формуле, полученной в результате дифференцирования выражения (4):

$$\Delta n=\sqrt{\left(\frac{\sin\frac{\varepsilon_{\min}}{2}}{2\sin^2\frac{\theta}{2}}\right)(\Delta\theta)^2+\left(\frac{\cos\frac{\theta+\varepsilon_{\min}}{2}}{2\sin\frac{\theta}{2}}\right)(\Delta\varepsilon_{\min})^2}\ , \qquad (5)$$

где $\Delta\theta$ и $\varepsilon_{\min}$ – погрешность определения углов преломления и наименьшего отклонения.

Анализ выражения (5) в предположении $\Delta\theta=\Delta\varepsilon_{\min}-2''$ привел Флюге [4] к выводу, что погрешность Δn в определении показателя преломления уменьшается при возрастании преломляющего угла призмы, а кривая $\Delta n=f(\theta)$ имеет слабо выраженный минимум вблизи предельного угла, при котором на выходной гранях наблюдается скользящий ход лучей. Для показателей преломления 1,5–1,7 Флюге из метрологических рекомендаций рекомендует проводить измерения на призмах с преломляющими углами 60°.

Более полный анализ выражения (5) дан в работе Погарева [5]. Он определяет условия получения наибольшей точности измерения показателя преломления при заданной точности гониометра. При решении задачи он исходит из того, что точность измерения углов θ и $\varepsilon_{\min}$ ограничивается лишь чувствительностью наводок трубы, которая зависит от ширины пучков лучей в направлении установок трубы и от вида марок и сеток, используемых для этих установок. Выражение для Δn, к которому приходит автор при решении задач, имеет вид:

$$\Delta n=\sqrt{\frac{K_1^2}{l^2}\left(\frac{\sin\frac{\varepsilon_{\min}}{2}}{\sin\frac{\theta}{2}}\right)^2 2\lambda_1+\frac{1}{2}\cdot\frac{K_2^2\lambda_2^2}{l^2}}\ . \qquad (6)$$

Здесь K_1 и K_2 – экспериментально определяемые коэффициенты, которые зависят от инструментальных параметров применяемого гониометра ГС- 2; λ_1- длина волны света, применяемого для освещения марки автоколлимационным методом; λ_2 – длина волны света, для которой измеряется показатель преломления; l – длина основания призмы. Обозначая

$$\frac{\sqrt{2k_1}\lambda_1}{l}\cdot\frac{\sin\frac{\varepsilon_{\min}}{2}}{\sin\frac{\theta}{2}}=\Delta n_\theta\ ,\quad \frac{k_2\lambda_2}{\sqrt{2l}}=\Delta n_\varepsilon\ ,$$

имеем:

$$\Delta n=\sqrt{\Delta n_\theta^2+\Delta n_\Sigma^2}\ . \qquad (6^*)$$

Из выражения (6) следует, что погрешность определения показателя преломления обратно пропорциональна основанию призмы и в меньшей степени зависит от преломляющего угла и показателя преломления образца. Однако, поскольку составляющая Δn_θ несколько возрастает с увеличением θ и n, то суммарная погрешность Δn будет возрастать с углом θ.

Преобразуя выражение (6) для k_1=1⁄12 и k_2 =1⁄6 и полагая $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3$, получим

$$\Delta n = \frac{\sqrt{2}\mathrm{K}_1\lambda}{l}\sqrt{\left(\frac{\sin\frac{\Sigma_{\min}}{2}}{\sin\frac{\theta}{2}}\right)^2 + 1}\,. \qquad (7)$$

Суммарная погрешность измерения незначительно возрастает с углом θ и с показателем преломления и составляет в среднем для указанных n величину

$$\Delta n \approx \frac{2k_1\lambda_1}{l}\,.$$

Положив λ = 600 нм (λ = 0,0006 мм), для метода наименьшего отклонения получим

$$\Delta n = \frac{0{,}0001}{l}\,.$$

Эта методика может быть использована для измерения абсолютного показателя преломления оптических стекол с точностью $\pm 3\cdot 10^{-5}$, используя оптический гониометр с точностью ±1´´, при этом рекомендовано полировать образец до λ/20 или же проверять измерение наклона вдоль измерительного участка. Если требуется прецизионное измерение ($\pm 1\cdot 10^{-5}$), то гониометр должен обеспечивать точность ±0,2´´ и образец должен быть отполирован до λ/20 или проверен на изменение наклона менее 0,04´´. В обоих случаях должна использоваться одна и та же часть образца для выполнения измерения угла призмы, а также угла минимального отклонения. Благодаря симметричной траектории, которую свет проходит через призму, когда происходит минимальное отклонение, легко идентифицировать соответствующие участки на каждой рабочей поверхности образца в целях проверки изменения наклона.

В целом гониометрический метод является относительным, в отличие от интерференционного, и в качестве точного исходного метода измерения показателя преломления целесообразно применять абсолютный интерференционный метод измерения, который позволяет уточнить значения показателя преломления, полученные на гониометре.

Литература

1. Эцитина А.Л. Разработка и исследование образцовых средств измерения показателя преломления твердых тел / Дис. … к.т.н., 1980.
2. Батарчукова Н.Р., Ирикова Л.А. Длины волн монохроматических источников света и показатели преломления в стандартном и нормальном воздухе. М.: Изд. Комитета стандартов, 1968.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
4. Flugge J., Einfuhrung in die Messung der optischen Grundgrossen, Karlsruhhe, 1954.
5. Погарев Г.В.// Труды ЛИТМО. Вып. 27.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ГАЛЛОВОЙ КИСЛОТЫ

А.А. Туренко, В.П. Челибанов

Введение

Озонолиз фенолов, представителем которых является галловая кислота, представляет собой системный многостадийный процесс, в ходе которого образуются продукты, способные к хемилюминесценции и являющиеся потенциальными донорами энергии электронного возбуждения специально вводимых эмиттеров излучения, применяющихся в твердотельных контактных озоно-чувствительных элементах.

В настоящее время сравнительно мало известно о природе промежуточных продуктов озонолиза фенола. Известно, что одним из конечных продуктов является формальдегид. Он может образоваться в электронно-возбужденном состоянии и, возможно, способен выступать в роли донора энергии возбуждения:

$A^* + Rh \rightarrow A + Rh^* \rightarrow A + Rh + h\nu$.

Также предполагается, что одними из первичных продуктов озонолиза являются так называемые озониды. Однако вопрос об их стабильности, конкретной структуре и роли, которую они играют в дальнейших превращениях, остается не до конца выясненным. Более того, достоверных сведений об их идентификации в литературе крайне мало. В связи с этим были предприняты исследования по обнаружению и возможной идентификации некоторых из продуктов озонолиза галловой кислоты.

Экспериментальная часть

Известно, что наиболее информативным физическим методом исследования состава и структуры органических веществ является ИК спектроскопия. В качестве объектов исследования были взяты образцы, приготовленные испарением спиртового раствора галловой кислоты на поверхности окошек NaCl, KBr и CaF_2. Использованы также образцы, полученные пропиткой волокнистой целлюлозы, и образцы, полученные адсорбцией галловой кислоты на поверхности силикагеля и окиси алюминия из раствора галловой кислоты в спирте или ацетоне. При этом адсорбированные образцы тщательно промывались растворителями с целью удаления не связанной с поверхностью адсорбента галловой кислоты. Все спектры получены при температуре 298 К на спектрофотометре UR-20. Галловую кислоту (3,4,5-триоксибензойную кислоту, (OH)3C6H2COOH), марки «Ч» предварительно очищали на установке вакуумной возгонки (сублимации) при температуре 180.°С. Качество очистки галловой кислоты контролировали по спектрам ИК поглощения.

Первичные экспериментальные данные и их обсуждение

Из ИК спектров, полученных в процессе озонолиза мелкокристаллической галловой кислоты на подложке из CaF_2 (NaCl), хорошо видно, что озонолиз сопровождается уменьшением интенсивности всего неискаженного спектра галловой кислоты, что соответствует ее расходованию. При этом в спектре не обнаруживается накопления каких бы то ни было промежуточных продуктов. В процессе озонолиза появляется полоса с максимумом интенсивности поглощения ~ 1740 $см^{-1}$, характерная для производных непредельных альдегидов и кислот, которые могут являться продуктами полного окисления исходного вещества. Интенсивность полосы невысока, поскольку альдегиды и простые кислоты достаточно летучи. Эта полоса поглощения в ИК области, ~ 1740 $см^{-1}$, хорошо проявляется и в ходе гетерогенного окисления озоном галловой кислоты, нанесенной на поверхность окошка CaF2. Зарегистрированные изменения в спектре поглощения приведены на рис. 3.

Образцы, приготовленные сорбцией на поверхности SiO_2 и целлюлозы, оказались малопригодными для исследования из-за сильного поглощения подложки в области характеристических колебаний исследуемых молекул.

На рис. 1 приведен спектр ИК поглощения галловой кислоты, адсорбированной на поверхности Al_2O_3 (графики 2 и 3). На первый взгляд, изменения в спектре носят катастрофический характер. Резко уменьшилась интенсивность полос при частотах 1200– 1260 $см^{-1}$, соответствующих С-О-колебаниям карбоксила и деформационным колебаниям ОН-группы карбоксила, а также полоса с максимумом около ~ 1420 $см^{-1}$, также приписываемая колебаниям СООН-группы. В то же время интенсивные полосы вблизи 1380 $см^{-1}$ и вблизи 1550-1620 $см^{-1}$, появившиеся в спектре, характерны для колебаний COO^--группы анионов карбоновых кислот. Появление интенсивной полосы поглощения в области 1360–1370 $см^{-1}$ было зафиксировано и при озонолизе очищенной галловой кислоты на подложке KBr, см. рис. 2. Динамика появления этой полосы поглощения наблюдалась в ИК спектре в течение 24-часового эксперимента окисления галловой кислоты.

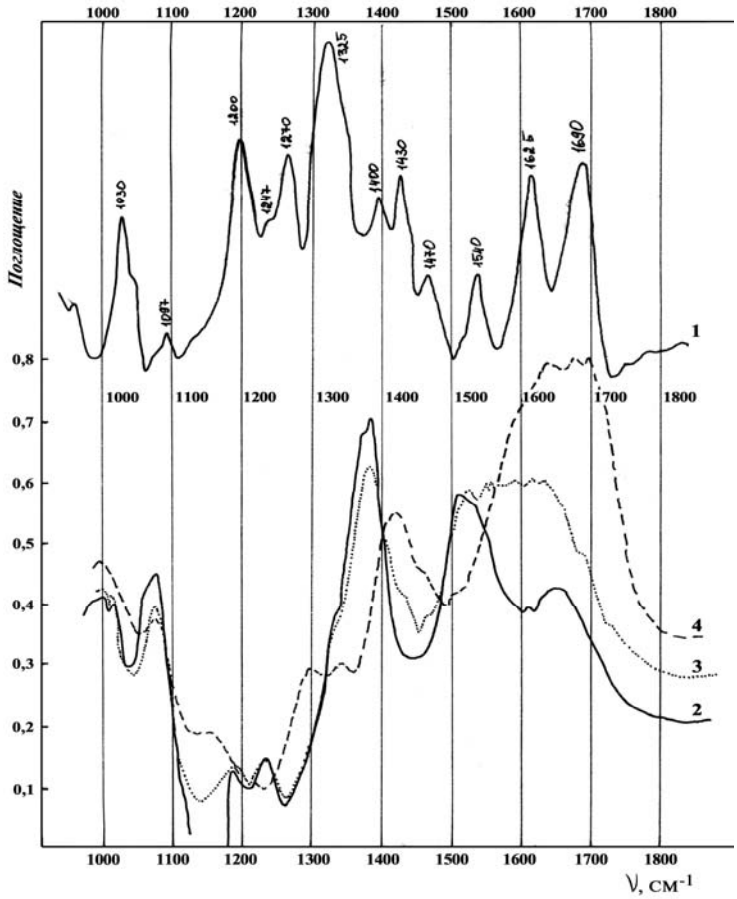


Рис.1. Спектры поглощения галлиевой кислоты. График 1: ИК спектр поглощения галловой кислоты, очищенной перегонкой под вакуумом (вакуумная сублимация) и нанесенной на окно CaF_2. График 2: ИК спектр поглощения галловой кислоты, очищенной перегонкой под вакуумом (вакуумная сублимация) и свежесорбированной на Al_2O_3 из раствора этанола. График 3: ИК спектр поглощения галловой кислоты, очищенной перегонкой под вакуумом (вакуумная сублимация) и сорбированной на Al_2O_3 из раствора этанола. Спектр получен после выдержки в течении 15 часов после процедуры сорбции на Al_2O_3. График 4: ИК спектр поглощения галловой кислоты и продуктов ее окисления озоном при ее экспонировании в озон-кислородной газовой смеси в течении 4 часов. Концентрация озона – 1,1 г/$м^3$. Галловая кислота предварительно очищена перегонкой под вакуумом (вакуумная сублимация) и сорбирована на Al_2O_3 из раствора этанола.

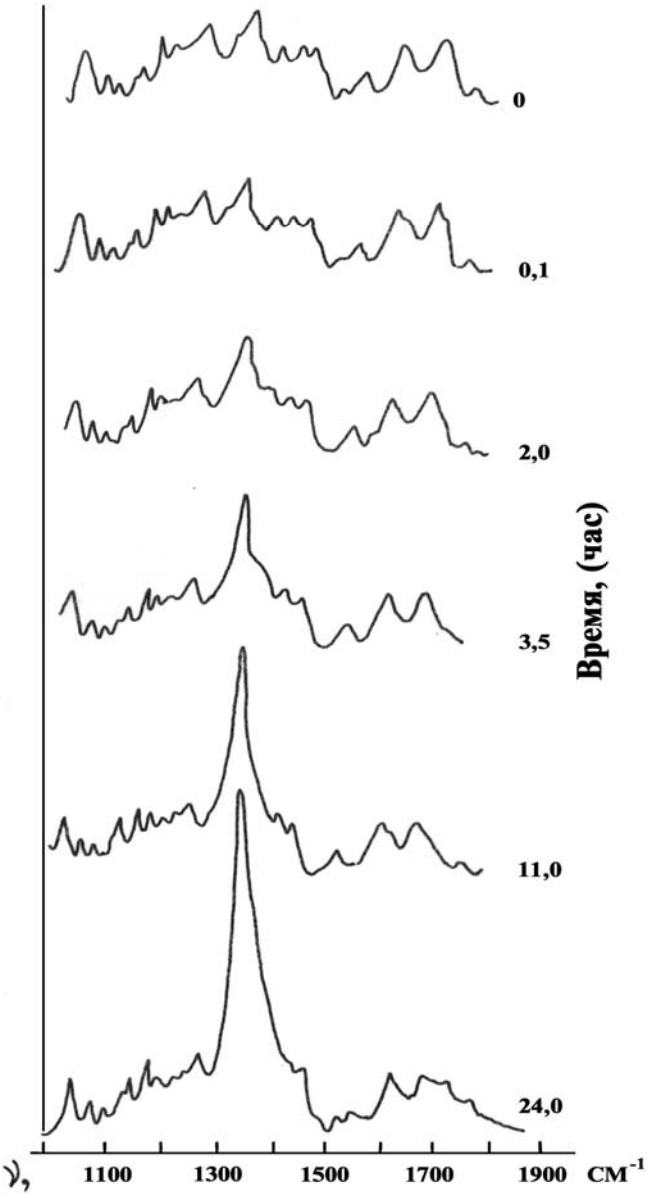


Рис. 2. Изменения в ИК спектре поглощения галловой кислоты при ее окислении озоном в гетерогенных условиях. Галловая кислота нанесена на окошко KBr. Спектрофотометр: UR-20, температура 298 К.

Полоса с максимумом интенсивности вблизи 1515 см$^{-1}$ соответствует колебаниям каркаса ароматического кольца (рис. 1). Соотношение интенсивностей полос каркаса, лежащих в диапазоне 1440–1625 см$^{-1}$, весьма сильно зависит от окружения, поэтому изменения в этой области спектра при адсорбции могут быть значительны. Таким образом, можно констатировать экспериментальный факт, что адсорбция галловой кислоты на Al_2O_3 не вызывает существенных изменений в ее структуре. Отсутствие полос недиссоциированных карбоксилов указывает на то, что галловая кислота образует на поверхности Al_2O_3 в основном монослой, наличие COO^- групп обусловлено легкостью отщепления H^+ в полярных средах, а именно такой и является развитая поверхность гидроксила Al_2O_3 .

Озонолиз адсорбированной галловой кислоты приводит к уменьшению как интенсивности полос COO^--групп при 1380 см$^{-1}$, так и полосы при 1515 см$^{-1}$, что указывает на разрушение ароматического ядра, причем такое, которое, по всей видимости, происходит по двойной связи, примыкающей к карбоксилу:

```
O = C - OH
    /        O3
 - C        /        →
   \\
    C – H
    /
```

Полоса поглощения вблизи 1685 см$^{-1}$ могла бы быть приписана к озонидам, но в той же области спектра лежат интенсивные полосы поглощения карбонильных групп с сопряженными связями типа C = C – C = O , C = C – C – C = C , C = C – C = C – C = O

```
                                    //                    /
                                    O                    H
```

Последняя группа также имеет полосы в области 1350 – 1440 см$^{-1}$, появление которой сопровождает озонолиз. У группы C = C – C = O наблюдается повышенная интенсивность полосы C = C колебаний у 1600–1650 см$^{-1}$, что также наблюдается в спектре. Полоса с максимумом 1600–1650 см$^{-1}$ уже не может быть приписана колебаниям ароматического ядра, так как поглощение вблизи 1515 см$^{-1}$, также соответствующее ароматическому ядру, в процессе озонолиза уменьшается, т.е. кольцо раскрывается. Сравнительно слабые полосы у 1150 см$^{-1}$ и 1300 см$^{-1}$ могут быть приписаны группам типа

```
                    O
                    //
C – O – C – O – C   и   R – C – O – R .
```

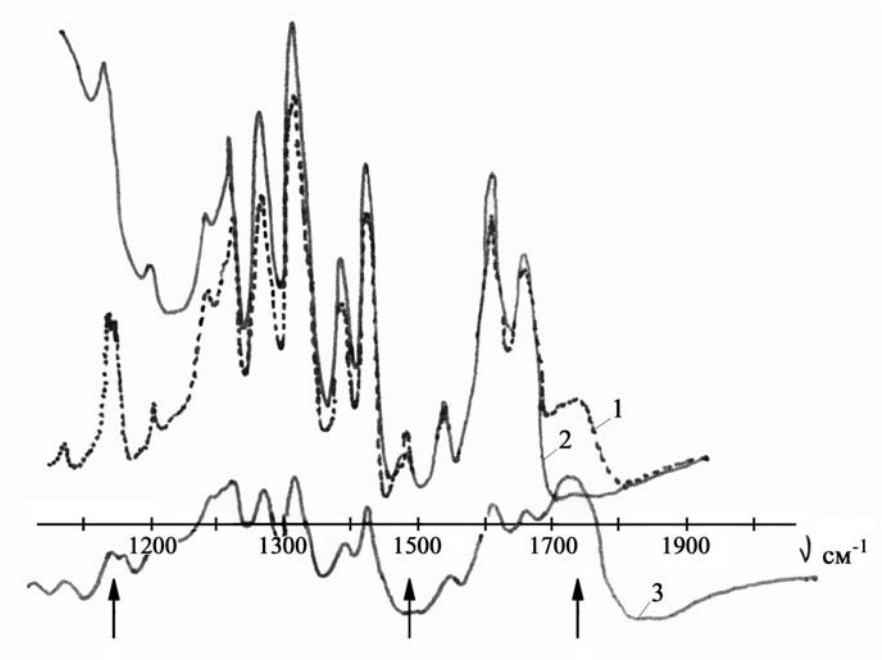


Рис. 3. Наблюдаемые спектральные изменения в ИК области спектра в процессе озонолиза галловой кислоты в системе «газ–твердое тело». Галловая кислота нанесена на окошко CaF2. Исходная галловая кислота очищена методом вакуумной сублимации при температуре 180.°С График 1: ИК спектр поглощения галловой кислоты на окошке CaF2 в начальный период окисления озоном. Спектрофотометр UR-20. T=298 К. График 2: Исходный ИК спектр поглощения галловой кислоты, нанесенной на окошке CaF2. Спектрофотометр UR-20. T=298 К. Галловая кислота подвергнута очистке методом вакуумной сублимации. График 3: ИК спектр оставшейся непрореагировавшей галловой кислоты и продуктов окисления галловой кислоты озоном. Спектрофотометр UR-20. T=298 К. Стрелками указаны области, где обнаружены существенные изменения спектра исходного вещества – галловой кислоты (накопление стабильных продуктов окисления галловой кислоты).

Таким образом, в адсорбированном на Al_2O_3 состоянии мы наблюдаем накопление промежуточных продуктов, которые являются результатом раскрытия ароматического кольца под действием молекул озона. Интенсивность хемилюминесценции в процессе озонолиза галловой кислоты на Al_2O_3, тем не менее, имеет тенденцию к снижению. Отсюда напрашивается вывод, что озонолиз продуктов раскрытия ядра не ведет к хемилюминесценции.

Выводы

Электронно-возбужденное состояние, ответственное за хемилюминесценцию, характерно для молекул, образующихся непосредственно в акте раскрытия ароматического кольца или на более ранних этапах после атаки озоном в процессах, предшествующих раскрытию кольца. Другими словами, за хемилюминесценцию оказывается ответственной именно реакция озона с ароматическим кольцом. Следовательно, перспективными для применения в твердотельных хемилюминесцентных датчиках озона, вероятнее всего, будут ароматические соединения, не содержащие заместителей с длинной С - С цепью, а также С = С групп, которые могли бы конкурировать в реакции с озоном с ароматическим ядром молекулы. Именно этим обстоятельством определяется важность исследования первичных, промежуточных продуктов озонолиза и реакций, предшествующих и сопровождающих раскрытие ароматического кольца.

Литература

1. Шрайнер Р., Фьюзон Р., Кертин Д., Моррилл Т. Идентификация органических соединений. М.: Мир, 1983.703 с.
2. Воскресенский П.И. Техника лабораторных работ. Л.: Химия,1970. 717 с.
3. Гаррисон Дж., Лорд Р. и Луфбуров Дж. Практическая спектроскопия. 1950. 650 с.

ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБРЕЖНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ АВИАЦИОННЫХ ЛИДАРНЫХ СИСТЕМ

Ю.И. Копилевич, А.Г. Сурков, В.И. Фейгельс

Известно, что формы лидарного сигнала обратного рассеяния от столба морской воды недостаточно для определения основных физических характеристик воды, таких как показатели ослабления, рассеяния и поглощения. Предложен новый подход к решению этой задачи, состоящий в компенсации дефицита информации регистрируемого лидарной системой дистанционного зондирования сигнала за счет использования приемной системы с переменным углом зрения. Одновременно или последовательно регистрируются сигналы, полученные при нескольких различных углах зрения приемной системы. Предлагаемый метод требует использования как минимум трех углов зрения – узкого (приблизительно равного углу расходимости лазерного пучка), широкого (с плоским углом поля зрения 50-70 мрад) и среднего (с углом порядка 15-20 мрад). В основе метода лежит то обстоятельство, что форма сигнала, т.е. изменение сигнала обратного рассеяния с глубиной, описывается функцией оптических характеристик среды, причём для узкого, широкого и среднего углов зрения указанные зависимости оказываются различными. Создана теоретическая модель для сигнала обратного рассеяния лидара, позволяющая на основе полученных форм лидарных откликов при различных углах зрения определять важные физические и экологически значимые параметры морской воды.

Предложенный подход явился основой для разработки в 2003- 2004 годах в НАСА (США) океанологического лидара, который в настоящее время проходит испытания в оптическом бассейне.

Введение

Развитие лидарной техники в последние десятилетия привело к появлению ряда серийно выпускаемых авиационных и корабельных систем дистанционного лазерного зондирования океана [1]. В сферу возможных применений подобных приборов в оптической океанографии, наряду с традиционной батиметрией прибрежных акваторий, входит дистанционное определение оптических параметров морской воды, обнаружение отдельных слоев рассеяния в воде и следов загрязнения, измерение распределения хлорофилла в прибрежных водах.

Одна из наиболее сложных проблем в этой области – практическая реализация лидарного метода как инструмента для оценки оптических свойств морской воды. Проблема очень существенна для современной океанологии и экологии, которые требуют надежных способов для измерения пространственных распределений и временных изменений оптических свойств морской воды. Особого внимания требует задача применения дистанционного лидарного зондирования для оценки биофизических характеристик морской воды, важнейшая из которых – содержание в воде частиц органического углерода.

Типичный океанографический лидар, авиационный или корабельный, использует импульсный (обычно сине-зеленый) лазер и приемник для регистрации зависящего от времени отклика, вызванного взаимодействием зондирующего светового импульса с толщей воды. Форма лидарного отклика от столба морской воды зависит, очевидно, от полного набора характеристик поглощения и рассеяния света, а также от формы индикатрисы рассеяния воды.

В настоящей работе предлагается лазерная система дистанционного зондирования приповерхностного слоя морской воды и метод для оценки *in-situ* значения показателя рассеяния в этом слое. Лидарная система, показанная на рис. 1, имеет приемник с переменным углом зрения, который регистрирует параллельно (или последовательно) сигналы обратного рассеяния от водной среды при как минимум трех различных углах зрения – узком (примерно равным расходимости лазерного луча), широком (плоский угол зрения 50–70 мрад), и среднем (угол порядка 15–25 мрад). Идея метода запатентована [2], но никогда не была реализована на практике в России или за рубежом.

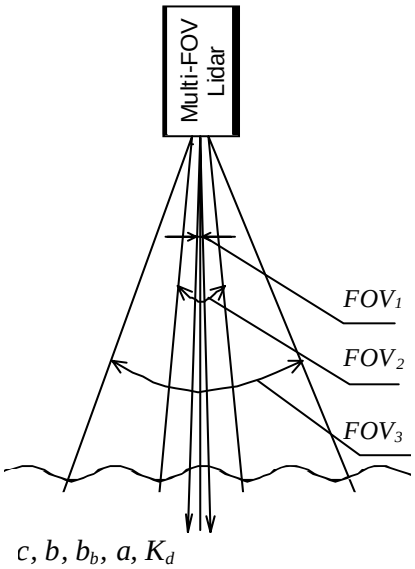


Рис.1. Принцип работы лидара с изменяемым углом зрения приемника

В случае, когда рассматриваемая система установливается на авианосителе (высоты полета 100–500 м), появляется возможность измерять вместе с показателем рассеяния воды еще и параметр, который характеризует форму малоугловой (до 45°) части индикатрисы рассеяния. Применение такой авиационной сканирующей системы в комбинации с поступательным движением носителя будет обеспечивать трехмерное распределение измеряемых параметров, тогда как повторяемые съемки позволят регистрировать временные вариации распределений (четырехмерный мониторинг).

Теоретическая модель лидарного отклика

Мощность сигнала обратного рассеяния среды на входе приемной оптической системы лидара $S_i(t)$, i = 1, 2, 3, полученного при i-ом угле зрения приёмной системы FOV_i, определяется лидарным уравнением [3]. В простейшем случае зондирования «в надир» для однородной водной толщи это уравнение имеет вид

$$S_i(t) = P_0 \frac{vT}{2n} \Sigma \frac{e^{-2r}}{(Hn+h)^2} (1-\rho)^2 \beta_\pi e^{-2(a+b_b)h} F(h, FOV_i), \quad i = 1, 2, 3. , \qquad (1)$$

где t – время, отсчитываемое от момента испускания зондирующего импульса; P_0 и T – мощность и длительность зондирующего лазерного импульса, соответственно; v – скорость света в вакууме; n – показатель преломления морской воды; Σ - площадь зрачка приёмного телескопа; H – высота лидарной платформы над уровнем моря; r – оптическая толщина слоя атмосферного воздуха между поверхностью воды и лидарной платформой; h – глубина, связанная с временем регистрации t соотношением

$$nh = \frac{vt}{2} - H, \quad t \geq \frac{2H}{v};$$

ρ - коэффициент отражения поверхности воды, β_π – объёмный показатель обратного рассеяния морской воды, a и b_b – показатели поглощения и рассеяния назад, соответственно.

Функция $F(h,FOV)$ в (1) определяется выражением ([1]; см. также [4])

$$F(h, FOV) = \frac{1}{2}\Psi^2 e^{-2b_f h} m^2 \int_0^\infty \left[x + \sqrt{1+x^2}\right]^{\frac{2b_f h}{x}} \exp\left[-\frac{x^2 m^2}{4}\left(\frac{r_0^2 + R_0^2}{h^2} + \Theta^2 + \Psi^2\right)\right] x\,dx, \quad (2)$$

где

$$\Theta = \theta_0 \cdot \gamma; \quad \Psi = \frac{FOV}{2} \cdot \gamma; \quad \gamma = \frac{H}{h} + \frac{1}{n} \ , \tag{3}$$

θ_0 и r_0 – половинный угол расходимости и радиус исходного лазерного пучка; R_0 – радиус зрачка приёмника; b_f - показатель рассеяния вперёд; m – параметр модели Л.С. Долина [5] для малоугловой части индикатрисы рассеяния морской воды $\beta(\theta)$:

$$\beta(\theta) \sim m/\theta \cdot \exp(-\, m\theta) \ . \tag{4}$$

Измерение показателя рассеяния воды с помощью лидара

Применяя одно из трех лидарных уравнений (1) (например, уравнение для $i = 3$) как нормировочный фактор для двух остальных, получаем:

$$\begin{aligned} S(h)_1 / S(h)_3 &= F(h, FOV_1) / F(h, FOV_3) = A_1. \\ S(h)_2 / S(h)_3 &= F(h, FOV_2) / F(h, FOV_3) = A_2. \end{aligned} \tag{5}$$

Равенства (5) можно рассматривать как систему двух уравнений с двумя неизвестными, m и b_b. Важно отметить, что ввиду высокой анизотропии индикатрисы рассеяния морской воды (асимметрия индикатрисы рассеяния $\alpha = b_f / b_b$ обычно находится между 30 и 40 [6]), показатель рассеяния вперед мало отличается от показателя рассеяния $b = b_f + b_b$.; следовательно, $b_f \approx b$. Проблема оценки двух неизвестных параметров может быть сформулирована как вариационная задача. Один из возможных путей её решения – применение метода наименьших квадратов, когда для определения значений m и b в (5) минимизируется функция:

$$Q(m,b) = \sum_{i=1}^{2} \int \left| \left[F(h, FOV_i) / F(h, FOV_3) \right]_{\exp} - \left[F(h, FOV_i) / F(h, FOV_3) \right]_{\mathrm{mod}} \right|^2 dh \ , \tag{6}$$

где $\left[F(h, FOV_i) / F(h, FOV_3) \right]_{\exp}$ – измеренная экспериментально функция коэффициентов m и b, а $\left[F(h, FOV_i) / F(h, FOV_3) \right]_{\mathrm{mod}}$ – модельная функция коэффициентов m и b , причем интегрирование производится по всему интервалу заданных глубин.

Анализ данных авиационного лидара

Авиационная лидарная система обычно применятся при высоте полёта носителя 100–500 метров над уровнем моря, что в несколько раз превышает максимальную измеряемую глубину. Это обстоятельство существенно отражается на поведении функции $F(h, FOV)$ из (2), приведенной на рис. 2.

Очевидно, что функция довольно чувствительна к форме индикатрисы рассеяния, характеризуемой модельным параметром m из (4), причём вариации $F(h, FOV)$ при изменении m наиболее заметны при широком угле поля зрения приемника.

Соотношение между двумя функциями, относящимися к различным углам зрения (широкому и узкому), также заметно зависит от m (см. рис. 3). Таким образом, форма индиктрисы рассеяния (значение параметра m), наряду со значением показателя рассеяния b, может быть оценена из измерений с помощью авиационной лидарной системы с переменным углом поля зрения (рис. 2, 3).

Достаточно очевидно, что авиационный лидар с приемником с переменным углом зрения может служить эффективным инструментом для одновременной оценки показателя рассеяния воды (b) и модельного параметра индикатрисы рассеяния (m) с использованием алгоритма, рассмотренного выше. Трёх измерений, произведенных для широкого, среднего и узкого углов зрения (например, 40 мрад, 15 мрад и 5 мрад), достаточно для получения реальной оценки этих двух параметров.

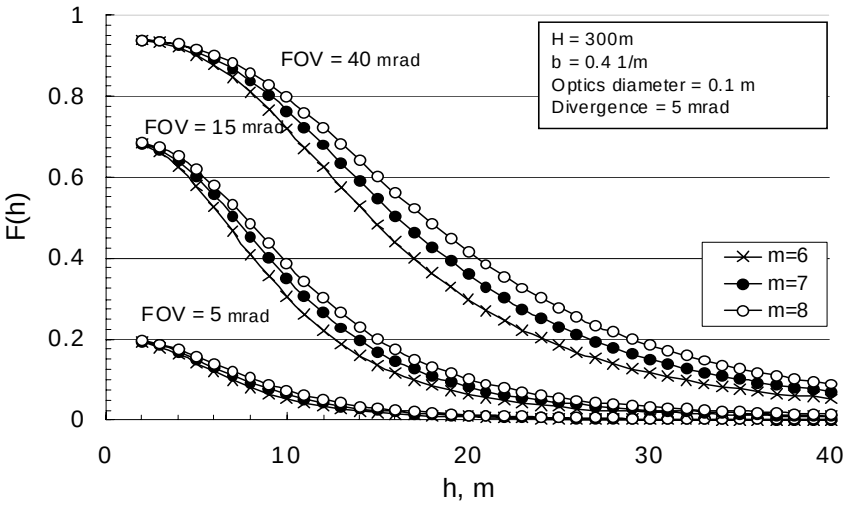


Рис 2. Функция *F(h, FOV)* для случая авиационного лидара при трёх различных FOV (5 мрад, 15 мрад и 80 мрад) и трёх значениях модельного параметра индикатрисы рассеяния (*m* = 6; 7; 8)

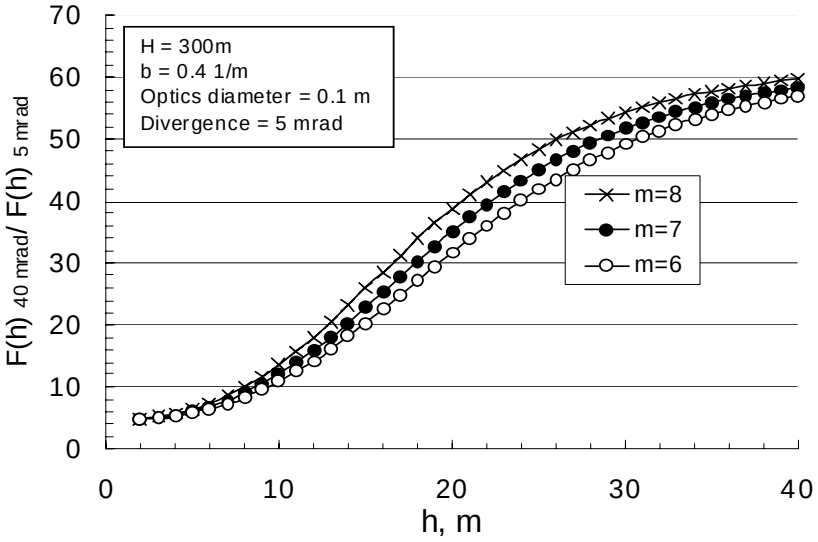


Рис 3. Отношение функций *F(h,* 40 мрад*)* и *F(h,* 5 мрад*)* для *m* = 6; 7, и 8.

Связь рассеяния с объемной концентрацией больших частиц в воде

В настоящем разделе рассматривается возможность применения значений показателя рассеяния, полученных из данных лидарных измерений, для оценки концентрации больших частиц в морской воде, т.е. гидрозольных частиц с характерными размерами от нескольких единиц до десятков микрометров [7]. Напомним, что концентрация крупной биологической взвеси напрямую связана с содержанием частиц органического углерода, которое существенно определяет процессы обмена между океаническим и атмосферным фондами углерода [8, 9].

Предлагаемый метод оценки концентрации больших частиц основан на высокой степени корреляции (коэффициент корреляции r^2 = 0.93) между объёмной концентрацией крупных частиц V_l и показателем рассеяния воды b на длине волны 532 нм, обнаруженной в [10] (см рис. 4):

$$V_l = 1.44 \cdot 10^{-2} + 1.68\, b\,, \qquad (7)$$

где V_l. измеряется в см^3/м^3, b – в м$^{-1}$.

Корреляционная формула (7) получена на основе данных 66 измерений, проведенных в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах [10].

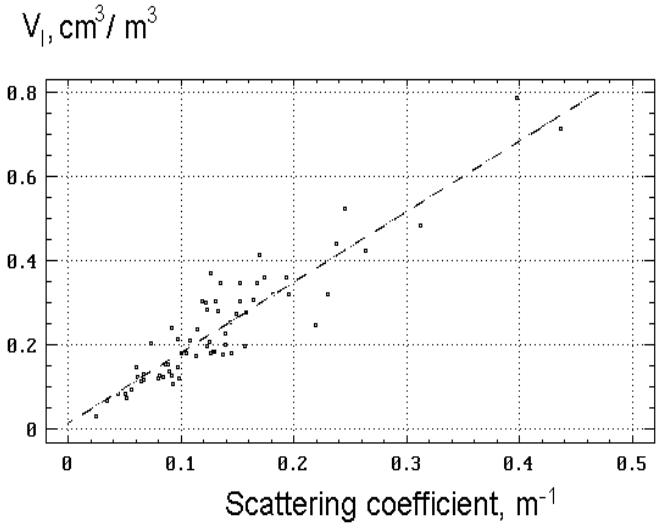


Рис. 4. Регрессия между концентрацией больших частиц, V_l, и коэффициентом рассеяния, b.

Используя формулу (7), по значению показателя рассеяния b, полученному из измерений с помощью лидара с изменяемым углом зрения, может быть получена концентрация больших частиц V_l.

Заключение

Подходы, развитые в настоящей работе, основаны на применении лидара с изменяющимся углом зрения приемника, т.е. лидара, который регистрирует, одновременно или последовательно, сигналы обратного рассеяния при различных углах поля зрения приемника. Предложенный метод делает возможным измерение показателя рассеяния воды.

При зондировании с использованием авиационного лидара метод обеспечивает, наряду с оценкой показателя рассеяния, еще и нахождение параметра m , введенного Л.С. Долиным для модельного описания индикатрисы рассеяния в области малых углов (примерно до 45°). Для реализации метода требуется использовать, как минимум, три различных угла зрения приемника.

Достоверная корреляция между показателем рассеяния и объемной концентрацией больших гидрозольных частиц (коэффициент корреляции 0.93) дает возможность производить достаточно точные оценки концентрации больших частиц в воде; это позволяет предложить использование описанного метода для фундаментальных исследований, связанных с изучением глобального цикла углерода.

Литература

1. Laser Remote Sensing of Natural Waters: from Theory to Practice. Ed.: Feygels V.I. and Kopilevich Y.I. // Proc. SPIE. 1996. V.2964.
2. Красовский Р.Р., Фейгельс В.И., Шифрин К.С., Левин И.М. и др. Способ измерения показателя рассеяния. А/С СССР №1453266, 1989.
3. Kopilevich Y.I., Feygels V.I., and Surkov A.G., Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems. // Proc. SPIE. Vol. 5155. P. 30–39.

4. Долин Л.С., Левин И.М. Теория подводного видения (справочник). Гидрометеоиздат, Ленинград, 1991.
5. Долин Л.С., Савельев В.А.., Определение параметров рассеянного назад сигнала импульсного излучения в мутной среде с узким направленным лазерным лучом. // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1971. Т. **7.** №.5. С. 505–510.
6. Оптика океана, Т. 1:.Физическая оптика океана / Под ред.: Монина А.С. М.: Наука, 1983.
7. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1983
8. Boss E S ; Behrenfeld M J ; Siegel D., The Phytoplankton Chlorophyll to Carbon Ratio and Prospects of its Retrieval from In-Situ Optical Measurements and Remote Sensing. // Report at ASLO/TOS 2004 Ocean Research Conference, February 15-20, 2004, Honolulu, Hawaii, USA.
9. Behrenfeld M.J. and Boss E., The beam attenuation to chlorophyll ratio: an optical index of phytoplankton physiology in the surface ocean?. // Deep-Sea Research I 50. 2003. Pp. 1537–1549
10. Фейгельс В.И. Оптимизация лидарных параметров для дистанционного зондирования океана и континентального шельфа. / Дис. к.т.н. СПб: СПб ИТМО, 991.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭКОЛОГИЯ» ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ УНИВЕРСИТЕТА

Н. И. Керро

В настоящее время в связи с активным внедрением информационных технологий в процесс обучения изменяется стиль преподавания, совершенствуются методы обучения и разрабатываемые на их основе применительно к различным дисциплинам методики. Экологические дисциплины в этом смысле исключением не являются. Более того, учитывая современные тенденции к экологизации учебного процесса в целом, именно для дисциплин экологического профиля в первую очередь требуется разработка современных средств и методик обучения, базирующихся на комплексном, системном видении и понимании сути и специфики изучаемого студентами предмета. Реализация такого подхода к методическим разработкам, естественно, должна базироваться на информационных технологиях, позволяющих в значительной степени активизировать учебный процесс, а также внести элементы творческого подхода в работу студента, использующего средства электронного обучения. Под информационными технологиями в контексте статьи понимаются как средства и методы работы с информационными ресурсами вообще, так и способы и средства сбора, передачи и обработки информации об изучаемом объекте. С педагогической точки зрения информационная технология обучения – это педагогическая технология, использующая специальные способы, программные и технические средства для работы с информацией.

В настоящее время в зарубежной практике при описании информационных технологий обучения принята стандартная терминология, в ней, в частности, используются такие термины: Computer Aided Instruction (CAI), Computer Aided Learning (CAL), Computer Based Learning (CBL), Computer Based Training (CBT). Известны примеры программных продуктов, представляющих собой комплексные автоматизированные обучающие системы. Среди них выделяются следующие комплексы: Lotus Learning Space, Tool Book Assistant, Distance Learning Studio. Проектирование и разработка электронного методического комплекса по конкретной дисциплине требует достаточно большой подготовительной работы, в рамках которой формулируются требования к содержанию и структуре комплекса, а также разрабатывается модель электронного учебного курса.

Изложенные выше представления легли в основу подхода к разработке электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Экология», осуществляемого в рамках университетской целевой комплексной программы «Развитие системы дистанционного обучения».

Целью работы было создание электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Экология», который мог бы достаточно успешно использоваться в системе дистанционного обучения университета студентов всех специальностей по названной дисциплине. Обучение этой дисциплине в настоящий момент осуществляется в соответствии с учебными программами вуза, базирующимися на государственных стандартах обучения. Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана общая структура комплекса (определены основные составляющие комплекса и взаимосвязи между ними);
- подобран теоретический тематический материал и оформлен в соответствии с требованиями Центра дистанционного обучения (ЦДО) Университета;
- разработан алгоритм использования комплекса в процессе обучения;
- выявлены перспективы развития и совершенствования учебно-методического комплекса.

Исходя из методических требований к разработкам электронных обучающих комплексов [1], была предложена общая структура комплекса, представленная на рис. 1. Она разрабатывалась исходя из содержания программы дисциплины и обеспечения возможностей ежемесячного контроля знаний студентов, а также содержания учебного материала по экологии.

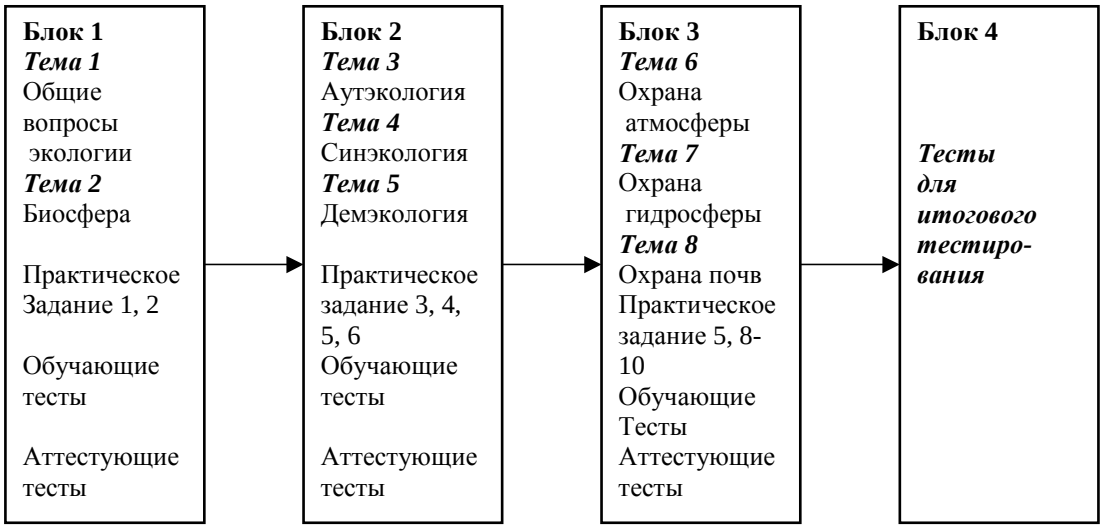


Рис. 1. Общая блок-схема электронного обучающего комплекса по дисциплине «Экология»

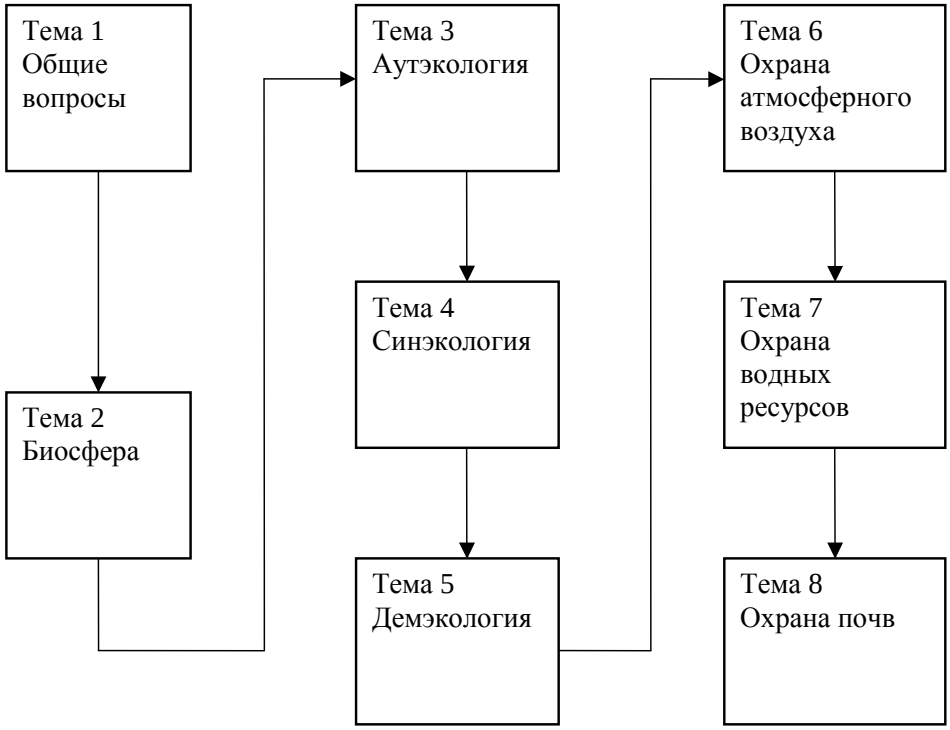


Рис. 2. Структура теоретической части электронного обучающего комплекса по дисциплине «Экология»

Исходя из условий ежемесячного контроля знаний студентов, изучаемая в течение одного семестра теоретическая часть курса, представленная на рис. 2, разбита на три блока: общие вопросы, вопросы биоэкологи и прикладной экологии. Каждый из этих блоков содержит от двух до трёх теоретических тем. Ограниченное число тем позволило упорядочить основную содержательную часть дисциплины таким образом, чтобы

отразить в перечне тем основную проблематику из программы дисциплины. Предложенная структура комплекса (см. рис. 1) позволяет обеспечить помесячный контроль знаний студентов. Это достигается за счёт проведения тестирования по пройденной части материала, изучение которой заключается в ознакомлении с теоретической частью, закреплении знаний с помощью обучающих тестов и выполнении практических заданий. Ежемесячный контроль знаний студентов подкрепляется результатами итогового тестирования после прохождения ими всего курса.

Обязательным элементом обучающего комплекса является методика его использования. Эта методика была разработана на основе общей блок-схемы электронного обучающего комплекса в процессе обучения студентов дисциплине «Экология». Алгоритм использования обучающего комплекса базируется на изучении студентами теоретической части дисциплины, закреплении знаний в ходе работы студента с обучающими тестами и выполнении им практических заданий по соответствующей тематике. При наличии выявленных в ходе тестирования «пробелов в знаниях» студентов или, например, при возникающих у них проблемах с выполнением практических заданий, они согласно алгоритму, представленному на рисунке 3, повторно возвращаются к изучению теоретической части дисциплины и обучающему тестированию.

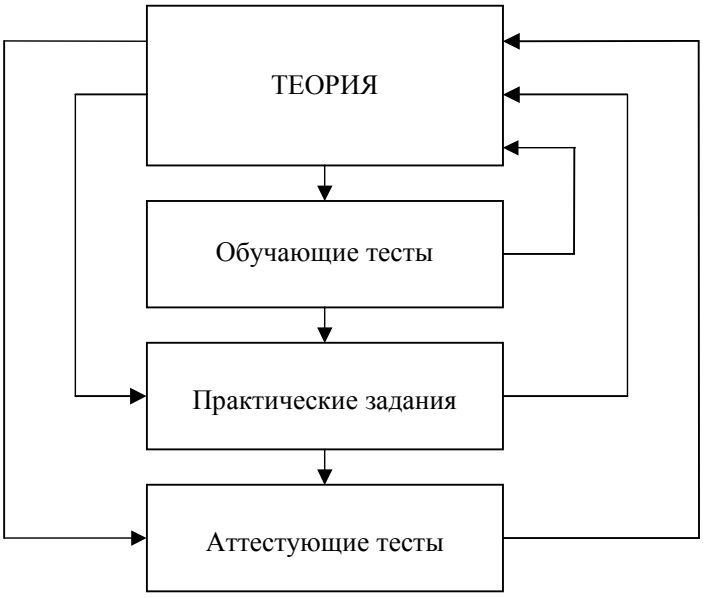


Рис. 3. Блок-схема алгоритма использования электронного обучающего комплекса по дисциплине «Экология»

Важным элементом электронного обучающего комплекса являются обучающие тесты, которыми завершается каждая из тем дисциплины (рис. 2). Приведём примеры таких обучающих тестов.

Обучающие тесты. Пример 1.

#L1 2101 W1

Каким термином обозначается индивидуальное развитие организма?

$! Онтогенез

$? Филогенез

$? Орогенез

$? Биогенез

Индивидуальное развитие организма обозначается термином ***онтогенез***.

Обучающие тесты. Пример 2.

#L1 2104 W1

К какому виду экологических факторов следует отнести температуру и освещённость по отношению к экосистеме широколиственного леса?

$! Экзогенный

$? Эндогенный

$? Биогенный

$? Хемогенный

Внешние (экзогенные) факторы способны оказывать воздействие на объект (организм, популяцию, экосистему), но они при этом не испытывают непосредственного обратного действия. Например, к таким факторам можно отнести некоторые метеорологические факторы и условия среды: солнечная радиация, освещённость, атмосферное давление и влажность, скорость и направление ветра.

Предыдущий абзац представляет собой теоретический материал, из содержания которого становится очевидным правильный ответ на тестовый вопрос, этот ответ среди приведённых вариантов в тестовом задании обозначен восклицательным знаком ($!).

Важным элементом электронного обучающего комплекса являются практические задания. Приведём пример такого задания.

Практическое задание №4.

Формулировка задания: приведите примеры приспособленности растений и животных к различным условиям окружающей среды.

Указания к выполнению задания. Ответ на вопрос составляется в произвольной форме. Общий объём ответа должен быть не более 2500 знаков. Ответ должен быть структурирован и содержать вводную часть, основную часть и вывод. Во введении целесообразно сузить рамки темы и перечислить несколько факторов, к изменению которых тем или иным способом приспосабливаются растения и животные. В качестве факторов могут быть рассмотрены сохранение влаги, колебания температур и т.п. В основной части должны быть приведены конкретные примеры приспособления растений и животных, выразившиеся в той или иной форме. Вывод должен содержать мысль о том, что адаптация (приспособление) – одна из движущих сил эволюции.

Выполненная работа по созданию электронного обучающего комплекса (ЭОК) по дисциплине «Экология» позволила сделать следующие выводы.

- Разработанный ЭОК может достаточно успешно применяться в ходе самостоятельной работы студентов, предусмотренной учебной программой и планом по дисциплине «Экология», так как содержит все необходимые элементы для обучения и контроля знаний студентов.
- Структура и содержательная часть ЭОК позволяют организовать ежемесячный контроль успеваемости студентов путём осуществления промежуточного тестирования по пройденному материалу, а также позволяют студентам самостоятельно ликвидировать свои пробелы в знаниях по дисциплине путём тренинга на основе обучающих тестов. Итоговое тестирование, предусмотренное в ЭОК, позволяет оценить суммарные знания студентов по предмету.
- Гибкая структура ЭОК позволяет при необходимости проводить своевременную замену тестовых заданий на новые, а также вводить дополнительные практические задания.
- Недостаток ЭОК заключается в том, что в нём не содержатся виртуальные лабораторные работы, поэтому целесообразно его совершенствование в этом направлении. Эта задача может быть решена путём предварительного отбора тем лабораторных работ, а затем их компьютерной реализации.

Литература

Захарова И. Г. Информационные технологии в образовании. М.: Академия, 2003. 192 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТОВ В УФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

А.В. Белобородов

Имеются два спектральных диапазона, где большинство молекул обладают явно выраженным свойством поглощения электромагнитного излучения. Это ультрафиолетовый (УФ - между 190 и 400 нм) и инфракрасный (ИК) (информативный между 2,5 и 15 мкм) спектральный диапазоны. Относительно немного молекул поглощают электромагнитное излучение в видимом диапазоне.

Хотя большинство молекул поглощают в ИК спектральном диапазоне, некоторые, например H_2S, имеют там слабые полосы поглощения. Кроме того, такие газы, как хлор и фтор, вообще не имеют полос поглощения в ИК области спектра. К настоящему времени созданы абсорбционные анализаторы различных типов, использующие УФ спектральный диапазон, для контроля содержания Cl_2, SO_2, NO_2, NO_3, HNO_2, NO, O_3, HCHO, ClO_2, CS_2, паров ртути, толуола, бензола, фенола, ксилола, этилбензола, нафталина, дихлорбензола и других веществ, всего около 100 компонент.

Техническое построение УФ систем измерения содержания газовых компонент, в принципе, аналогично построению ИК систем, правда, с учетом нескольких важных особенностей. По сравнению с ИК приборами, УФ анализаторы имеют как преимущества, так и недостатки. В качестве источника УФ излучения в них часто используется ксеноновая лампа. Этот источник излучает как в УФ, так и в видимой области спектра. Нить накала этих ламп может иметь величину 0,25 мм, что на порядок меньше размеров ИК источников излучения. Меньшие источники излучения приводят к более эффективной коллимации светового пучка и, как следствие, размеры светового пятна на выходе оптической системы с большой длиной оптической трассы остаются вполне приемлемыми, что исключительно важно при построении многоходовых кювет газоанализаторов и для конструирования систем с открытой атмосферной трассой для измерения содержания микроконцентраций загрязняющих атмосферу компонент [1]. По причине малых геометрических размеров УФ источника излучения, УФ системы контроля загрязнения атмосферы потенциально могут работать с оптическими трассами от 2-х до 10 км. Величина оптической трассы для ИК Фурье-спектрометра в настоящее время не превышает 1 км.

Другое различие между УФ и ИК анализаторами связано с тем, что в Фурье-спектрометрах, применяемых в настоящее время в качестве многокомпонентных анализаторов, не используется УФ спектральный диапазон, поскольку для механических узлов УФ Фурье-спектрометра требуется соблюдение настолько строгих допусков по стабильности их работы и по изготовлению поверхностей оптических деталей, что эти приборы становятся слишком дорогостоящими. Кроме того, УФ Фурье-спектрометр потребовал бы применения специального УФ лазера для контроля длин волн, который в настоящее время не разработан.

Однако, поскольку системы УФ и ИК измерений часто показывают сходные результаты, важно провести анализ их отличительных черт более пристально [2]. Каждая система может иметь преимущества в зависимости от её приложения. Фурье-спектрометры в каждый момент времени анализируют спектр ИК излучения в широком диапазоне и поэтому могут измерять одновременно общее содержание большого числа молекул, включая многие молекулы летучих углеводородов. УФ системы дистанционного контроля построены на основе дифракционных спектрометров и анализируют в отдельный момент времени только один конкретный спектральный участок. Для анализа, например, двух веществ, имеющих спектры УФ поглощения в разных спектральных интервалах, измерения должны быть произведены отдельно, и оптика прибора должна быть заменена или подстроена для проведения измерений.

ИК спектры большинства газов имеют более характерную вращательную структуру, чем УФ спектры газов с колебательной структурой электронной полосы поглощения [1, 2]. Выделение спектров газов с наличием большего количества деталей и, соответственно, определение содержания газов в присутствии многих мешающих компонент проще с использованием ИК спектрального диапазона. Кроме того, наличие нестабильности в уровне базовой линии прибора, работающего в ИК диапазоне, меньше сказывается на результат измерения по той же причине.

Применение УФ спектрального диапазона целесообразно для проведения работ по поверке газовых смесей, при построении контактных анализаторов O_3 и SO_2 и исключительно важно при построении систем дистанционного и трассового контроля загрязнения атмосферы.

В настоящее время в зарубежных странах накоплен достаточный опыт в создании газоаналитической техники с использованием УФ области спектра. В тех случаях, когда уже достаточно хорошо исследованы аналитические возможности определения некоторых компонентов, в регулирующих документах (например, в требованиях агентства по охране окружающей среды США, U.S. Environmental Protection Agency - U.S.EPA) регламентированы методы, применяемые для анализа многих компонентов в отдельности.

Работа над новыми средствами измерений должна вестись с известной осторожностью, так как может не дать положительных результатов по сравнению с методами, используемыми зарубежными фирмами. Особенно это касается методов, регламентируемых U.S.EPA, отступать от которых при создании новой аппаратуры опасно.

Используя неселективный источник излучения и формируя трассу, на которой предполагается наличие ряда исследуемых загрязняющих компонент, можно решить задачу определения содержания загрязняющего компонента несколькими методами.

Наиболее простой из методов состоит в создании дифференциального анализатора, содержащего два оптических фильтра, один из которых настроен на характерный максимум полосы исследуемого газа, а другой имеет центр вне полосы газа или в полосе газа, но с меньшим значением коэффициента поглощения. Тогда по изменению разности или отношения потоков в обоих каналах можно судить о содержании газа на трассе. Такой способ обладает наименьшей избирательностью к мешающим компонентам. Он, в основном, применяется при анализе газов, спектры которых не имеют выраженной структуры.

В последние два десятилетия достаточно широкое применение нашли так называемые корреляционные оптические методы, когда для достижения наибольшего разностного сигнала, пропорционального содержанию исследуемого газа, строится оптическая маска, которая повторяет структуру исследуемой колебательно-вращательной или электронной полосы газа и имеет достаточный перепад между прозрачными и непрозрачными для светового потока участками спектра.

Применение такого типа маски позволило резко повысить избирательность метода. Особую группу приборов, которые отличает сравнительная простота при достаточно высоком спектральном разрешении, составляют корреляционные приборы, основанные на «газовом фильтре» (ГФ) или на интерференционно-поляризационном фильтре (ИПФ). Такие фильтры либо полностью повторяют структуру полосы (или части полосы) поглощения исследуемого газа, либо повторяют ее в достаточной степени, если последняя имеет регулярную структуру. К первым относится ГФ, ко вторым – ИПФ. Особенностью ГФ является использование оптической кюветы, наполненной исследуемым газом с заданной концентрацией. Поочередно принимая сигнал от источника (прошедший рабочую трассу) – то через кювету с газом, то через «чистую» кювету – получаем разностный сигнал, пропорциональный содержанию газа на трассе между источником и прибором. Поскольку ГФ имеет колебательную структуру электронных полос в УФ и видимой областях спектра, совпадающую со структурой полос иследуемого газа, то

разностный сигнал коррелирует именно со спектром поглощения того же газа, но корреляция отсутствует или весьма мала для всех других газов, спектры поглощения которых тем или иным образом перекрываются со спектром поглощения исследуемого газа.

Применение ГФ для измерений содержания газов в УФ и видимой области наиболее целесообразно для молекул с хорошо выраженной колебательной структурой электронной полосы поглощения, т.е. когда коэффициенты в максимумах поглощения и соседнем минимуме поглощения различаются в несколько раз. Такой структурой обладают, например, спектры молекул сернистого газа и формальдегида [3]. Структура спектра молекулы диоксида азота проявляется на фоне непрерывного континуального поглощения, что приводит к падению величины дифференциального оптического контраста до значений, не сильно превышающих 1, а, следовательно, и к снижению чувствительности метода к измеряемому газу.

В [4] проанализированы основы корреляционных методов измерений, которые можно применить и для методов дифференциального поглощения.

На кафедре «Экологическое приборостроение и мониторинг» мною разработано программное обеспечение «База данных сечений поглощения газов в ультрафиолетовой области спектра» – UVDB. База данных разработана на языке высокого уровня DELPHI с применением запросов языка SQL [5]. Программа используется на кафедре СПбГУ ИТМО для подготовки и проведения лабораторных работ и практических занятий. Вид диалогового окна программы представлен на рисунке.

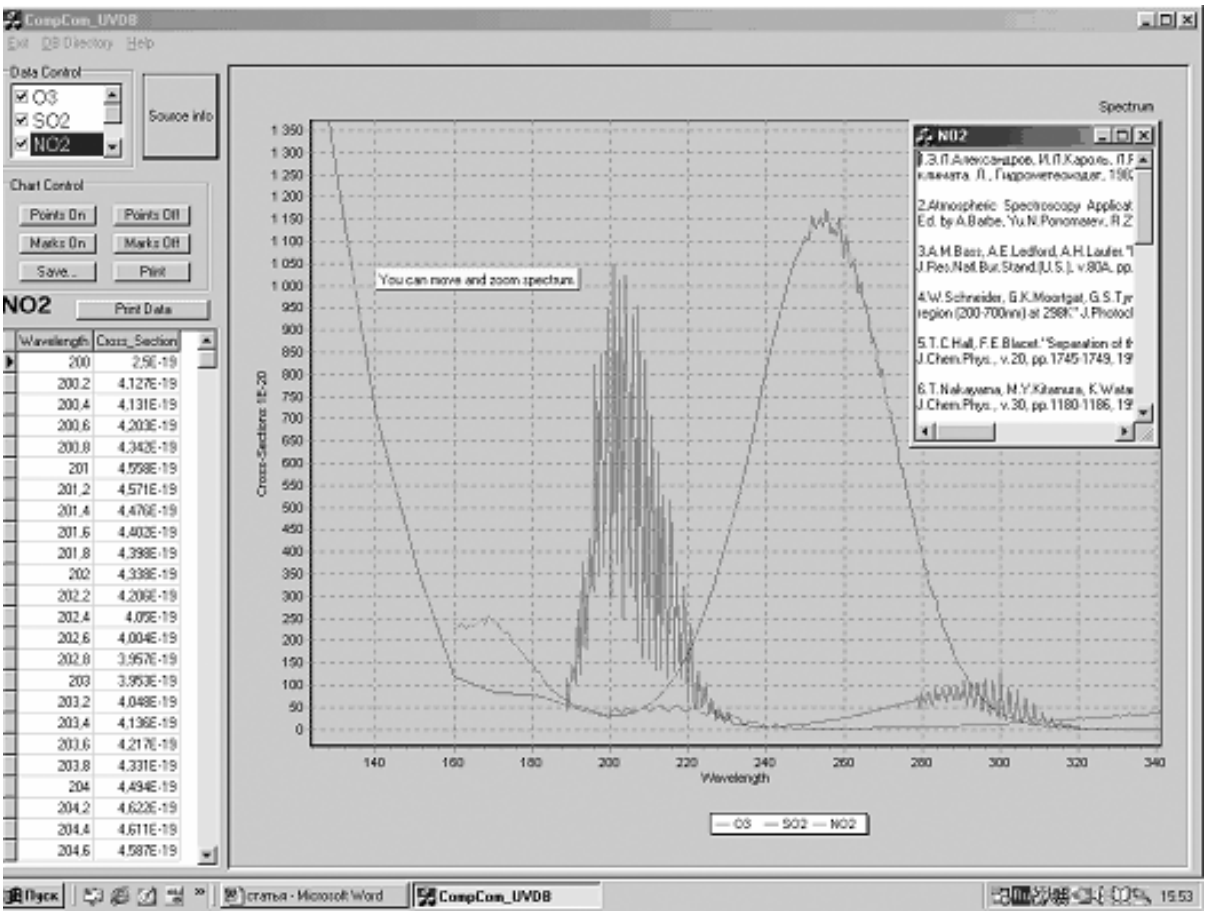


Рис. Программа UVDB

Кроме того, программа используется, как средство качественного анализа УФ спектров газов, а также для качественной интерпретации результатов лабораторных и натурных измерений атмосферного пропускания в УФ - области спектра.

База данных включает информацию о 127 газах. Каждая компонента содержит информацию об источниках данных для этого, конкретного газа [6].

Основой базы данных служил банк данных UVACS – Ultraviolet Absorption Cross Section, представленный в работе [7].

Для удобства представления информации и как следствие выбора метода измерения программа обладает следующими возможностями:

- увеличение,
- передвижение спектра газа;
- возможность обозначения (простановки) значений пиков (изломов) спектра;
- выбор источника информации по каждому спектру;
- изображение нескольких спектров на одной картинке;
- печать спектров;
- печать базы данных спектра;
- сохранение спектра в виде картинки bmp формата.

Литература

1. Minnich T. R., Scotto R. L., Kagann R. H., Simpson O. A.. Optical remote sensors ready to tackle Superfund, RCRA emissions monitoring tasks // HAZMAT World Magazine, May 1990.
2. Grant W.B., Kagann R.H., McClenny W.A.. Optical Remote Measurement of Toxic Gases // Journal of the Air & Waste Management Association, January 1992, pp. 18-30.
3. Окабе Х.. Фотохимия малых молекул. Пер. с англ. Москва, Мир, 1981.
4. Чаянова Э.А., Шайков М.К.. Корреляционные маск-спектрометры для исследования малых газовых составляющих атмосферы. // Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД-1984, Вып.2, 41 с. (Обзор-ВНИИГМИ-МЦД). Сер. Автоматизация сбора и обработки гидрометеорологической информации.
5. Архангельский А.Я.. Программирование в Delphi 5. М.; ЗАО «Издательство БИНОМ», 2000 г. 1072 с.
6. Борисова Н.Ф., Осипов В.М. Ослабление УФ-радиации на атмосферных трассах. // Оптика атмосферы и океана. 1998. №5.
7. Осипов В.М., Бабичева Н.А., Борисова Н.Ф. // II Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1995. Тезисы докл. Часть 1 С.70–71

КОНТРОЛЬ РЕСПИРАБЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ

Ю.А. Кустиков, Г.Б.Попов

Аэрозольные частицы в зависимости от размера, формы и вещества могут оказывать отрицательное воздействие на здоровье человека. Первые исследования влияния частиц, поступающих в организм шахтеров в процессе дыхания, проводились в связи с проблемами пневмокониозов и определением дозы внутреннего облучения. Именно тогда был поставлен вопрос о двухступенчатой гравиметрии промышленных пылей. В 70–80 годы прошлого столетия в СССР и странах СЭВ были достигнуты значительные успехи в двухступенчатой гравиметрии. В то время были созданы пробоотборники с сепараторами, были разработаны методики измерений. Естественно, наиболее сложным был выбор параметров кривой, в соответствии с которой происходит отделение респирабельной фракции от общей массы пыли. В большинстве известных случаев значение аэродинамического диаметра, соответствующего 50% значению кривой разделения, колебалось в промежутке от 2,0 до 5,0 мкм. В качестве устройств сепарации применялись циклоны и импакторы различного вида. Идеальным считалось устройство, которое обеспечивало разделение в соответствии с корректированной Лос-Аламосской кривой [1].

С начала 90-х годов в России практически были приостановлены соответствующие работы по изучению и техническому обеспечению исследований в области влияния различных фракций на организм человека. За это время в США и странах Европы были проведены исследования, связанные с влиянием загрязнения атмосферного воздуха частицами на здоровье населения. Итогом проведенной работы было появление стандартов Американского агентства по защите окружающей среды (EPA) [2] и европейского стандарта ISO 7708, которые определили две границы отделения респирабельной фракции от общей массы аэрозоля. Условно эти границы носят названия PM10 и PM2,5. Таким образом, были выбраны два аэродинамических диаметра, соответствующих 50% значению двух кривых разделения, а именно 10 мкм и 2,5 мкм.

Оценка загрязнения воздуха в соответствии с требованиями PM10 определяет массу частиц, проникающих в дыхательную систему человека за гортань. PM 2,5 позволяет оценить массу частиц, попадающих в альвеолярные отделы дыхательной системы. Таким образом, по итогам измерения загрязнения воздуха аэрозольными частицами в соответствии с PM10 и PM 2,5 можно судить о влиянии частиц на всю дыхательную систему человека, а также на ту ее часть, которая непосредственно связана с кислородным обменом и с поступлением вредных веществ в кровь.

В связи с этим для частиц, измеренных в соответствии с PM 2,5, особенно важно знать химический состав вещества частиц и его свойства, в то же время для частиц, измеренных в соответствии с PM10, кроме химических свойств, необходимо оценивать биологические свойства. Более крупные частицы могут нести на себе микробы, быть аллергенами, содержать тяжелые металлы и т.п. Более мелкие частицы способны растворяться в крови, повреждать легочную ткань, препятствовать насыщению крови кислородом воздуха.

Исследования концентрации аэрозолей в городах и сельской местности различных штатов США и разных районах государств Европейского союза в течение примерно 10 последних лет показали значимую корреляцию между содержанием частиц респирабельной фракции и заболеваемостью населения. Установлено также определенное влияние концентрации респирабельной фракции на смертность населения. Промежуток времени, в течение которого происходят измерения частиц в соответствии с PM 2,5 и PM10, не столь велик, чтобы безусловно доверять частичной статистике, связанной с заболеваемостью и смертностью в районах с повышенным содержанием респирабель-

ной фракции аэрозоля в атмосферном воздухе. Тем не менее, очевидно, что влияние на здоровье человека оказывает не вся масса частиц, попадающая в процессе дыхания в носоглотку, а именно та часть, которая проникает в легочную систему человека и которая обобщена под названием «респирабельная фракция аэрозоля».

В основе методов контроля респирабельной фракции аэрозольных частиц лежит гравиметрический метод измерения массовой концентрации. Суть этого метода заключается в определении отношения массы осадка аэрозольных частиц на высокоэффективном фильтре к объему прокачанного через фильтр воздуха. Гравиметрический метод надежен, достаточно прост в реализации. Для успешного измерения массовой концентрации аэрозоля необходимо иметь пробоотборную систему с минимальной погрешностью измерения объема воздуха, прокачиваемого через фильтр, а также высокочувствительные аналитические весы, имеющие погрешность не более 0.1 мг. В настоящее время с гравиметрическим методом успешно конкурируют автоматические радиоизотопные пылемеры, которые фактически в алгоритме своей работы повторяют основные операции гравиметрической методики, только вместо взвешивания производится измерение поглощения β- или α- излучения в слое осажденной пыли. Самым современным отечественным радиоизотопным пылемером на сегодняшний день является автоматический пылемер ДАСТ (Государственный реестр средств измерений РФ №24628-03), разработанный ООО «Мониторинг». Ионизационная камера прибора, заменяющая весы, позволяет определять изменение массы пыли, равное 6 мкг, что значительно превышает возможности аналитических весов, применяемых для взвешивания аналитических фильтров.

Выделение респирабельной фракции аэрозольных частиц в методиках PM10 и PM2,5 осуществляется с помощью сепарирующих устройств, устанавливаемых до фильтра или до входа автоматического пылемера. В США и в Европе уже приняты стандарты, регламентирующие характеристики этих сепарирующих устройств. Для сравнения на рис.1 приведены кривые проскока сферических аэрозольных частиц с плотностью 1000 кг/м^3 через сепарирующее устройство PM10 в соответствии с требованиями EPA и ISO 7708. На рис. 2 представлены три практические кривые проскока через сепарирующие устройства PM2,5.

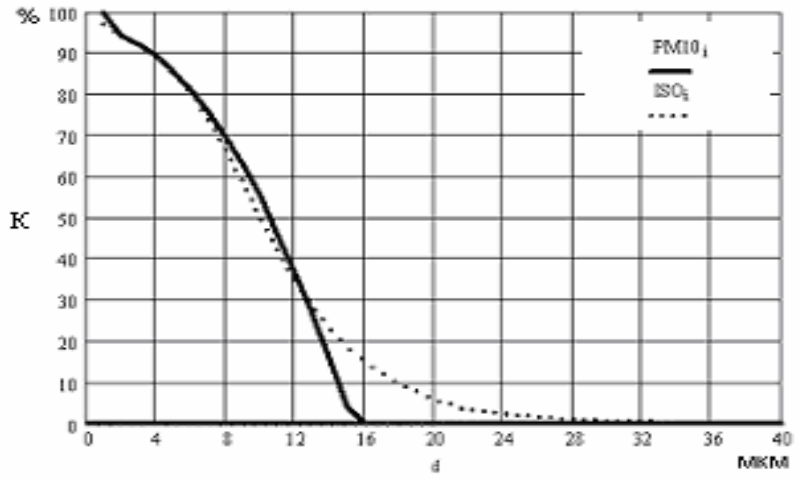


Рис.1. Зависимость коэффициента К проскока частиц через сепарирующие устройства от аэродинамического радиуса частиц, соответствующие PM10 и ISO 7708

Выбор сепарирующих устройств для применения на отечественных станциях экологического мониторинга осложняется тем, что до сих пор не регламентированы скорости отбора проб аэрозолей. В зарубежных стандартах для систем PM10 приняты следующие скорости отбора проб: 1.0 м^3/час, 2.3 м^3/час и 100 м^3/час. Первые два значения

относятся к малообъемным пробоотборникам, а последнее значение – к большеобъемному пробоотбору. Подобный подход гарантирует унификацию устройств сепарации в зависимости от скорости пробоотбора.

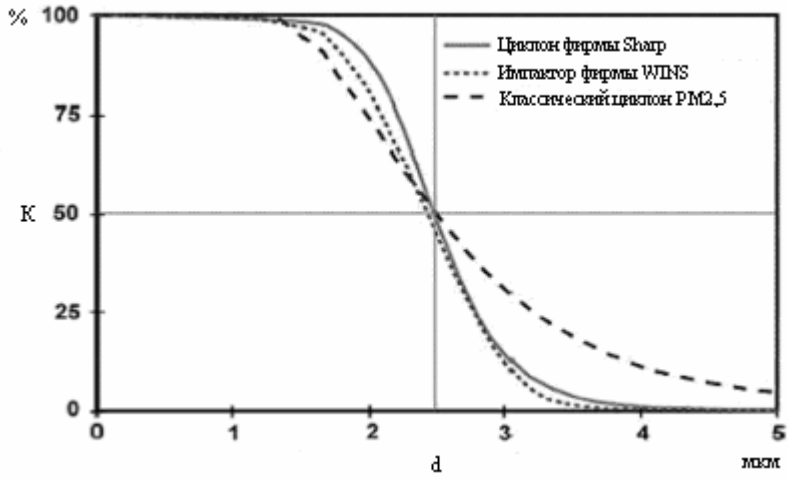


Рис. 2. Зависимость коэффициента К проскока частиц от аэродинамического радиуса частиц через три сепарирующих устройства разных типов.

К устройствам сепарации предъявляются следующие требования:

- зависимость коэффициента проскока от аэродинамического диаметра должна соответствовать требованиям стандарта (соответственно PM10 или PM2,5);
- гидродинамическое сопротивление сепарирующего устройства, системы пробоотбора и кассеты с фильтром не должны перегружать побудитель расхода, гарантируя тем самым непрерывность отбора пробы в течение суток;
- конструкция сепарирующего устройства и всей системы пробоотбора должна обеспечивать простую чистку в процессе эксплуатации.

Нами для целей обеспечения пробоотбора в соответствии с требованиями ISO 7708 был разработан сепаратор на базе измерительного циклона [3]. На рис. 3 приведена кривая проскока, полученная экспериментально авторами указанной работы. Из этой кривой следует, что данный сепаратор почти идеально соответствует требованиям стандарта ISO 7708.

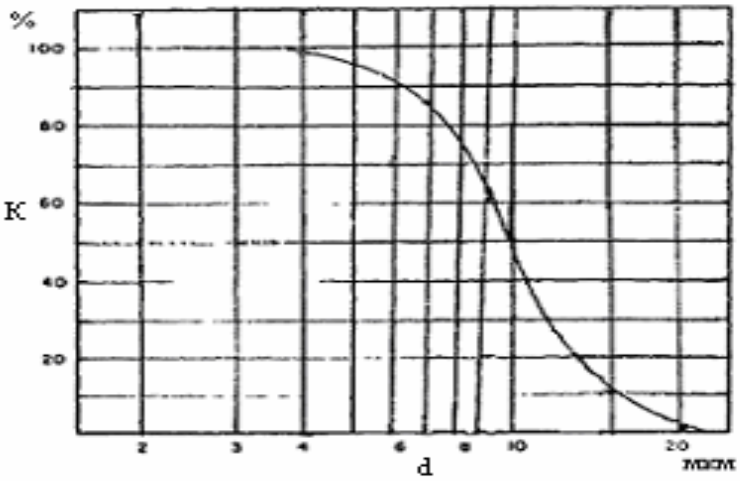


Рис. 3. Экспериментальная зависимость коэффициента К проскока частиц от аэродинамического диаметра частиц для измерительного циклона

Наше внимание этот циклон привлек тем, что он хорошо рассчитывается для различных скоростей пробоотбора и достаточно прост в изготовлении. Была составлена программа расчета параметров циклона, которая учитывает практически все возможные условия пробоотбора (температура, давление, вязкость газа и др.). Такая программа позволяет рассчитывать циклонные сепараторы не только для целей мониторинга атмосферного воздуха, но и для технологических целей.

Непосредственно для пылемера ДАСТ был рассчитан циклон с характеристиками, соответствующими PM10 для скорости отбора 20 л/мин. Внутренний диаметр тела циклона составил 50 мм. Линейная скорость тангенциального потока воздуха составила 1.08 м/с.

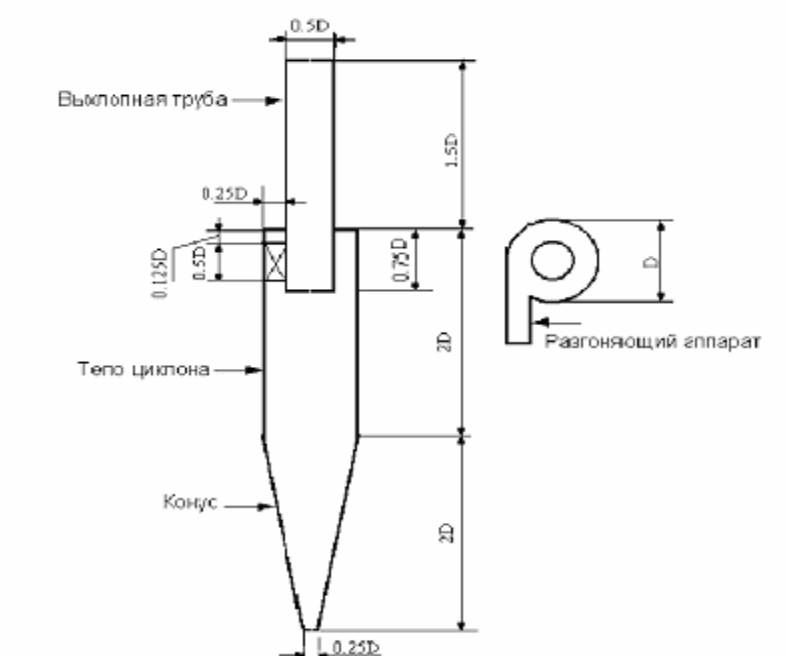


Рис. 4. Схема измерительного циклона

Была рассчитана зависимость аэродинамического диаметра 50% проскока от скорости пробоотбора. На рис. 5 приведены зависимости коэффициентов проскока частиц от скорости отбора пробы при трех значения плотности вещества (ρ, кг/м^3): 1000, 2300, 7800.

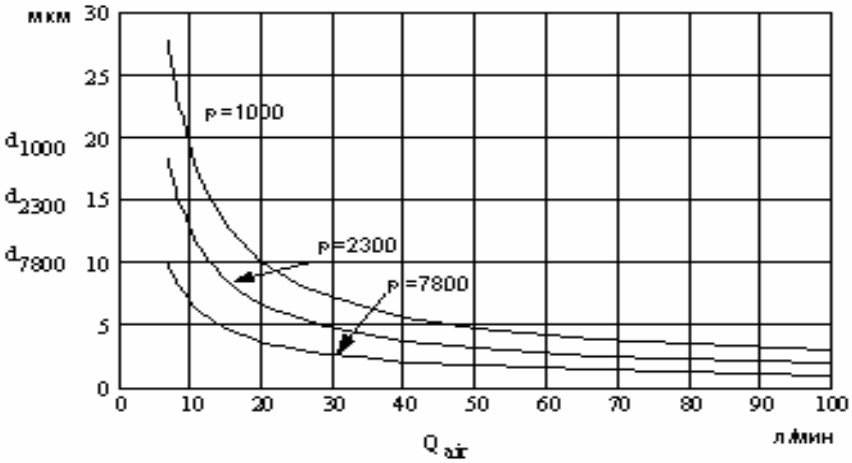


Рис. 5. Зависимость диаметра 50% отсечки от скорости отбора пробы для трех веществ разной плотности

Этот график позволяет, во-первых, оценить погрешность сепарации частиц (в отношении аэродинамического диаметра 50% отсечки), а во-вторых, производить испытания циклонов на частицах с различной плотностью вещества при различных скоростях отбора пробы. Более наглядно зависимость диаметра отсечки от плотности вещества отражена на рис.6.

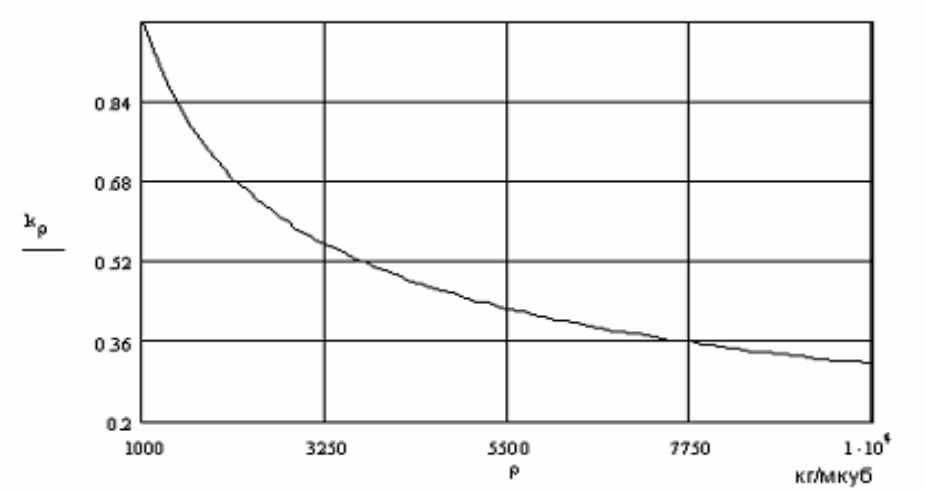


Рис. 6 Зависимость отношения (k_ρ) диаметра 50% отсечки частиц с разной плотностью вещества к аэродинамическому диаметру отсечки от плотности вещества

Особое внимание при создании систем пробоотбора с сепараторами на входе следует уделять испытаниям всей системы пробоотбора на соответствие требованиям стандартов. Испытания сепарирующих устройств могут осуществляться с применением как монодисперсных, так и полидисперсных аэрозолей. Генераторы монодисперсных аэрозолей с широким диапазоном размеров воспроизводимых частиц – сложные дорогостоящие устройства, выпуск которых в России не налажен. По-видимому, задачу создания подобных генераторов придется решать в ближайшее время. В настоящее время имеется возможность испытания сепарирующих устройств только на полидисперсных аэрозолях. Задача организации таких испытаний достаточно сложна. Естественно, с одной стороны, хочется избежать трудоемких операций вроде микроскопического анализа, а с другой – обеспечить достаточную точность измерения коэффициента проскока частиц.

Нами разработан принцип калибровки сепарирующих устройств с помощью абразивных микропорошков М5 – М40. Определение доли частиц по массе производится с помощью лазерного анализатора частиц «МикроСайзер-201С». Процедура испытаний заключается в анализе распределения частиц по массе в исходном аэрозоле, полученном распылением микропорошка, а также в аэрозоле, прошедшем через сепарирующее устройство. Для сбора частиц используется электрофильтры. Для распыления порошков используется эжекторный распылитель порошков с вибропитателем. Распыление порошков производится в трубу, из которой параллельно забираются пробы для анализа общего распределения и на сепарирующее устройство. Скорости отбора одинаковы и определяются характеристикам сепарирующего устройства. Распыляется примерно 3–5 грамм порошка для обеспечения представительности пробы. Сопоставление распределений частиц по массе до сепаратора и после него позволяет достаточно просто построить зависимость проскока сепарирующего устройства от размера частиц. При условии предварительной калибровки «Микросайзера» с помощью соответствующих микропорошков ожидается получение достаточно высокой точности (погрешность не более 20%) определения характеристик сепаратора.

Литература

1. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. Аэрозоли.. М.: Атомиздат, 1964.
2. European Standard EN 12341. Air quality. Determination of the PM10 fraction of suspended particulate matter. Reference method and fied test procedure to demonstrate reference equivalence of measurment methods. 1998.
3. Murray E. Moore and Andrew R. Design of Stairmand-Type Sampling Cyclones. McFARLAND Aerosol Technology Laboratory, Department a/Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station» TX 77843. 1990.
4. Измерение и нормирование аэрозолей фиброгенного действия. - Материалы симпозиума специалистов стран – членов СЭВ. Издательский отдел Управления делами Секритариата СЭВ, 1982.
5. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. Перевод с английского. М.:Мир, 1987.

ПОРТАТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ ДЛЯ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА НА ЗАПАДЕ

Е.Ю. Никольская

Области применения

Первые электрохимические сенсоры для газового анализа появились в начале 70-х годов XX века. Очевидно, что это очень молодая область прикладной электрохимии. Однако уже сегодня такие сенсоры имеют самые разнообразные области применения. Годовой объем продаж на мировом рынке составляет миллионы штук. Не только крупные ведущие фирмы, такие как Bayer, Motorola, Drager, Sixth Sense, LSS, CiTicel, Figaro, Varta, Rieken Keikyов, измеряемым портативными электрохимическими сенсорами, относятся NH_3, Cl_2, O_2, O_3, HCl, CO, H_2S, SO_2, NO, NO_2, HF, ClO_2, H_2, AsH_3, SiH_4, B_2H_6, HCN, PH_3, $COCl_2$. Области применения таких сенсоров весьма разнообразны:

- контроль технологических процессов;
- контроль условий труда на рабочих местах (в том числе датчик в кармане рабочего халата). Персональный портативный сенсор особенно необходим в условиях полупроводникового производства, где неизбежно применение таких высокотоксичных газов, как фосфин, арсин, силан, диборан. Такогй контроль необходим также на других химических производствах, как, например, производство фосгена $COCl_2$ (млн. тонн в год), HCl и т.д.;
- экологический мониторинг в городах (CO, NO_x, SO_x, O_2) (e.g. Munchen). Ограничение экспзиции в атмосферу, содержащую CO, является одной из наиболее обширных и безотлагательных проблем во многих областях промышленности. Загрязнение окружающей среды моноксидом углерода вызвано неполным сгоранием топлива в моторах или в домашних устройствах. Благодаря токсичности в сочетании с невозможностью определения этого газа по цвету, запаху или вкусу, мониторинг его содержания должен быть как можно более постоянным;
- экологический мониторинг в окрестностях комбинатов и фабрик;
- контроль выбросов химических производств;
- мониторинг содержания CO в воздухе жилых помещений (e.g. США);
- электрохимические портативные датчики, измеряющие концентрацию CO, входят в систему пожаробезопасности, наряду с датчиками, использующими эффект Тиндаля, и датчиками контроля скорости роста температуры (e.g. Швейцария);
- поиск мест повреждения трубопроводов, содержащих телефонный кабель путем продувки трубопровода водородом и определение водорода на поверхности грунта с помощью портативных водородных сенсоров (e.g. FRG);
- контроль содержания водорода в аккумуляторных отсеках подводных лодок;
- в автомобилях нового поколения, работающих на водородном топливе вместо бензина (BMW), для определения возможной утечки газа устанавливается около 7 портативных автономных датчиков водорода вдоль газовой линии от баллона с водородом (в багажнике) до мотора.

Принцип работы и компоненты сенсора

Амперометрический (АМ) сенсор является первичным измерительным преобразователем. Конкретно, он преобразует величину концентрации газа непосредственно в электрический сигнал (ток). Наиболее распространенным типом портативного электрохимического сенсора являются амперометрические сенсоры, часто это сенсоры типа топливного элемента. Рассмотрим принципиальное устройство АМ сенсора.

Электролитическая ячейка электрохимического сенсора должна иметь по крайней мере два электрода. Один электрод – тот, который контактирует с определяемым газом. Это рабочий (РЭ) или чувствительный электрод. Второй электрод известен как вспомогательный электрод (ВЭ). Когда определяемый газ вступает в контакт с РЭ, на нем происходит реакция окисления или восстановления одновременно с соответствующей реакцией восстановления или окисления, происходящей на ВЭ. Измеряемый в цепи электрический ток пропорционален концентрации определяемого газа.

Чтобы определить, например, концентрацию СО, потенциал РЭ должен быть существенно положительным так, чтобы СО окислялся. Однако потенциал РЭ изменчив, так как он определяется приложенным относительно ВЭ напряжением. Потенциал ВЭ нестабилен, если электрод электрохимически необратим, т.е. его ток обмена недостаточно велик по сравнению с током, протекающим через ячейку. Следовательно, возможно, что потенциал РЭ будет сдвигаться к значениям, где СО окисляется не полностью.

Таким образом, важно иметь РЭ с постоянным или почти постоянным потенциалом в процессе прохождения реакции. Такой электрод (третий в электролитической ячейке) называется электродом сравнения (ЭС), и его главная роль – стабилизировать потенциал РЭ. В этом случае потенциал РЭ будет оставаться стабильным так, чтобы СО мог быть количественно окислен.

Одним из главных компонентов сенсора, определяющим его характеристики, является газодиффузионная мембрана (ГДМ). ГДМ изготавливается из пористой тефлоновой пленки, толщина которой 150–180 мкм, пористость ~ 40%. На внутреннюю поверхность пленки (обращенную к электролиту) наносится катализатор, который является РЭ, химически не взаимодействующим с газовой смесью и электролитом. Это может быть $Pt_{чернь}$, $Pd_{чернь}$, Au, Ru, Ag, Ir, а также их смеси с графитом. В качестве РЭ, в отдельных случаях, может выступать графит с нанесенной на него платиновой чернью, углеродное волокно, стеклоуглерод.

Тефлоновая мембрана является диффузионным барьером для определяемого газа и одновременно подложкой для нанесения слоя катализатора. Такая структура «пористая мембрана + катализатор» называется электродо-мембранным блоком (ЭМБ). Здесь формируется трехфазная граница «газ-катализатор-электролит», которая, как и в топливных элементах, по сути, определяет характеристики системы. Сигналом сенсора является ток окисления или восстановления определяемого газа. Лимитирующей стадией этих электрохимических процессов является диффузия целевого компонента (газа) через ГДМ. Таким образом, регистрируемый сигнал является предельным диффузионным током. Именно благодаря диффузионной природе тока сигнал устойчив во времени и хорошо воспроизводим. Величину сигнала можно оценить по формуле

$$I_d = zFSDC/\delta,$$

где I_d – диффузионный ток, ограниченный скоростью диффузии определяемого газа через ГДМ; z - количество электронов, участвующих в электрохимической реакции; F-число Фарадея; S – площадь РЭ; D – коэффициент диффузии определяемого газа в ГДМ; C – концентрация определяемого газа; δ – толщина ГДМ.

Время отработки сигнала можно оценить, пользуясь теми же параметрами диффузионной кинетики:

$$\tau=\delta^2/\pi D$$

где τ – время отработки сигнала; δ – толщина ГДМ; D – коэффициент диффузии определяемого газа в ГДМ. Подобным же образом изготавливаются ВЭ и ЭС. В этом случае тефлоновая пленка является лишь подложкой для катализатора или другого проводящего материала [1].

Наряду с ГДМ и электродами, третьим важнейшим компонентом сенсора является электролит. В качестве электролита обычно применяются кислые водные растворы, растворы на основе пропиленкарбоната с полиметилметакрилатом (PMMA) в качестве загустителя etc. [2].

Следует отметить, что наиболее частой причиной отказа сенсора является испарение или утечка электролита. Следующая возможность ухода параметров сенсора связана с отравлением катализатора РЭ.

Как в портативном, так и в переносном исполнении сенсоры в приборе легко заменяемы в случае отказа (испарение электролита, отравление РЭ, выработка срока службы). Часто отказ означает снижение чувствительности ниже диапазона возможной корректировки с помощью электронной платы прибора.

Электродные реакции

Как правило, в сенсорах для определения концентрации газа используется прямое окисление или восстановление целевого компонента, например,

$H_2S + 4\ H_2O = H_2SO_4 + 8\ H^+ + 8\ e$

или

$O_2 + 2H_2O + 4\ e = 4\ OH^-$

Однако необходимо отметить достаточно обширную группу АМ сенсоров, в которых используется промежуточная химическая реакция. В тех случаях, когда определяемый газ не может восстанавливаться или окисляться непосредственно на электроде, такая реакция приводит к образованию электрохимически активного соединения. Ток окисления или восстановления такого соединения пропорционален концентрации определяемого газа. Так как химическая реакция протекает с высокой скоростью, сенсор попрежнему работает в описанном выше диффузионном режиме (наиболее медленной стадией процесса является диффузия определяемого газа через ГДМ).

Приведем несколько примеров.

Сенсор для определения концентрации HCl.имеет РЭ, выполненный из золота, поэтому в растворе электролита на нем существует равновесие:

$Au \Leftrightarrow Au^{3+}$ (*)

Когда в сенсор поступает HCl, происходит химическая (промежуточная) реакция:

$Au^{3+} + 4HCl = [AuCl_4]^- + 4\ H^+$

При этом равновесие (*) смещается таким образом, что становится возможным электрохимическое растворение золота на РЭ:

$Au = Au^{3+} + 3e$

Эта реакция, что очевидно, является токообразующей.

Сенсор для измерения концентрации фосгена ($COCl_2$). РЭ выполнен из серебра.

$2\ Ag^+ + COCl_2 + H_2O = 2\ AgCl + CO_2 + 2\ H^{+;}\ Ag = Ag^+ + e$

По тому же принципу работают сенсоры для определения HCN (РЭ- серебро).

$Ag^+ + HCN = AgCN + H^+;\ Ag = Ag^+ + e$

Фильтры для обеспечения селективности сенсора [3, 4].

The last, but not least компонент сенсора – это фильтр, который часто применяют для обеспечения селективности датчика в присутствии газов, мешающих определению целевого компонента. Фильтр помещают над электрохимической ячейкой. В общем случае он содержит подложку, связующее и активное вещество – поглотитель. Это может быть химический поглотитель или адсорбент, пропускающий определяемый газ, но поглощающий мешающие газы.

Выбор фильтра определяется условиями, в которых будет работать сенсор, в данном случае составом анализируемой газовой смеси (АГС). Например, сенсор для определения концентрации CO может быть снабжен фильтром, поглощающим NO, NO_2, SO_2 и H_2S. В конкретном исполнении фильтр состоит из гранулированного химического поглотителя, помещенного в верхний фланец (крышку) корпуса датчика.

Сенсор для определения ClO_2 содержит фильтр, задерживающий HCl, H_2S и Cl_2, которые могут содержаться в АГС. В этом случае фильтр состоит из подложки (носителя) – игольчатого стекловолокна и нанесенного на носитель поглотителя – Ag_2O, который вступает в химическую реакцию с мешающими газами, пропуская целевой компонент. Таким образом, фильтры обеспечивают селективность электрохимических сенсоров.

Преимущества и недостатки АМ сенсоров

Для сравнения с АМ датчиками кратко рассмотрим другие наиболее известные портативные измерительные преобразователи – газовые полупроводниковые сенсоры. С помощью этих датчиков измеряется поверхностная проводимость периодически нагреваемого полупроводника. Эта величина зависит от концентрации определяемого газа. Например, для определения концентрации CO используют оксиды SnO и ZrO.

К достоинствам таких систем следует отнести возможность автоматизации производства и, как следствие, дешевизну; малый размер. К принципиальным недостаткам относятся: высокое энергопотребление, зависимость сигнала от относительной влажности воздуха, низкая селективность (в частности, чувствительность к горючим газам), гистерезис сигнала и, следовательно, его долгая релаксация.

Преимущества электрохимических АМ сенсоров перечислены ниже:

- линейная зависимость сигнала от концентрации целевого компонента;
- высокая точность;
- малое время отработки сигнала;
- независимость сигнала от расхода газа;
- независимость показаний от положения в пространстве;
- крайне малое энергопотребление;
- малые массы и габариты;
- невысокая стоимость;
- возможность реализации автономных портативных измерительных систем;
- простота в обращении.

К недостаткам таких сенсоров относятся:

- недостаточная селективность;
- недостаточно большой срок службы;
- возможность течи электролита на границе металл - пластиковый корпус при термоударе или длительной работе;
- возможность испарения электролита через ГДМ.

Необходимые замечания и выводы.

Следует отметить, что обсуждаемая здесь область приборостроения – разработка и производство электрохимических сенсоров для газового анализа – в России пребывает в зачаточном состоянии. На ежегодной международной выставке портативных сенсоров в Нюрнберге за последние 10 лет не была представлена ни одна российская фирма, в то время как в этой промышленной выставке участвуют многие сотни фирм из развитых стран мира. Уже из кратко перечисленных областей применения (п.I) со всей возможной очевидностью следует необходимость развития этой области приборостроения в любой цивилизованной стране.

Остается надеяться, что будут приняты соответствующие решения в соответствующих инстанциях о стимулировании развития этой отрасли электрохимического приборостроения. Тогда Россия, по крайней мере, в этой области, покинет когорту развивающихся стран. Отрадно отметить, что на этом фронте во ВНИИМ им. Д.И. Менде-

леева имеется отчетливое понимание масштаба и важности решения перечисленных здесь задач.

Литература

1. Electrochemical sensor with which to measure gas concentrations/ Nikolskaja E. / US Patent 5,538,620/. July 23, 1996
2. Electrochemical sensor with a solid electrolyte for measuring the gas concentration/ Nikolskaja E. / US Patent 5,958,214/ September 28, 1999
3. Compacted activated charcoal filter material/ Nikolskaja E. / US Patent 5,730,918/ March 24,1998
4. Selective carbon filter/ Nikolskaja E. et al. / US Patent 5,656,069. August 12, 1997

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЛАМЕННОЙ ФОТОМЕТРИИ ДЛЯ АНАЛИЗА АЭРОДИСПЕРСНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ АЭРОЗОЛЯ ХЛОРИДА НАТРИЯ

О.П. Захарова, Л. А. Конопелько

В январе 2003 г. были введены в действие новые государственные стандарты на средства индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД), гармонизированные с европейскими. Это привело к необходимости создания Испытательного центра средств индивидуальной защиты. Центр создан на базе ФГУП «ВНИИ метрологии им Д.И. Менделеева» и должен обеспечивать проведение испытаний в соответствии с требованиями новых стандартов. Одним из основных элементов Испытательного центра является комплекс аппаратуры, предназначенный для определения коэффициента проникания тест-аэрозоля через фильтрующие СИЗОД.

Коэффициент проникания является одним из основных защитных показателей фильтрующих СИЗОД. В новых ГОСТах (ГОСТ Р 12.4.191-99, ГОСТ Р 12.4.192-99) регламентируется два альтернативных метода определения коэффициента проникания через СИЗОД. Один из них – метод, использующий в качестве тест-аэрозоля аэрозоль хлорида натрия, второй – гексафторид серы. Оба эти метода предусматривают проведение испытаний на человеке.

При разработке комплекса аппаратуры для оснащения Испытательного центра был выбран метод с использованием аэрозоля хлорида натрия как более безопасный и универсальный. Использование аэрозоля хлорида натрия, не нанося вреда ни испытуемому, ни окружающей среде, в то же время не требует применения дорогостоящих реактивов. Создание аэродисперсного потока осуществляется с помощью распылителя Коллисона, конструкция которого позволяет добиваться воспроизведения заданных характеристик частиц – размер, форма, плотность и др. Однако наибольшее внимание при описании состояния аэродисперсного потока уделяется массовой концентрации частиц аэрозоля, которая выражается отношением общей массы частиц к объему воздуха.

Сущность метода определения коэффициента проникания через СИЗОД заключается в определении отношения массовой концентрации аэрозоля хлорида натрия в подмасочном пространстве респиратора, надетого на голову испытателя, к его концентрации в испытательной камере.

Наилучшим образом для целей регистрации массовой концентрации аэрозоля подходит метод пламенной фотометрии. При выборе конструкции фотометра необходимо руководствоваться теми требованиями, которые указаны в ГОСТах. Поэтому было принято решение использовать водородный фотометр.

Прибор имеет достаточно простую конструкцию. Водородную горелку помещают в вертикальную жаровую трубку с отверстием на нижнем конце, выходящем в трубку для отбора проб. Поток аэрозоля, поступающий в пламя, регулируется конвекцией и поддерживается постоянным с помощью пробоотборного клапана. Небольшое количество предварительно очищенного от посторонних примесей воздуха непрерывно поступает в трубку для отбора проб, расположенную ниже входного отверстия жаровой трубки. Такой способ подачи воздуха предназначен для предотвращения попадания в горелку присутствующего в помещении воздуха, который может содержать значительное количество солей натрия. Водородную горелку, обеспечивающую получение симметричного относительно вертикальной оси пламени, помещают в жаростойкую стеклянную трубку. Эта трубка должна быть оптически гомогенной для уменьшения влияния света пламени.

При прохождении через жаровую трубку частицы хлорида натрия в воздухе испаряются, приводя к характерной эмиссии натрия на длине волны 589 нм. Интенсивность эмиссии пропорциональна концентрации натрия в потоке воздуха. Чтобы отличить

эмиссию натрия от фонового света на других длинах волн, используют узкополосные интерференционные светофильтры. Полуширина полосы таких фильтров должна быть не более 5 нм. При измерении интенсивности излучаемого пламенем света используют фотоэлектронный умножитель в комбинации с нейтральными светофильтрами, поскольку выходные значения фотоумножителя пропорциональны падающему потоку света в относительно узком интервале. Такие фильтры точно калибруют совместно с используемым интерференционным фильтром, чтобы реальную интенсивность света можно было вычислить на основании выходных значений фотоумножителя. Фотометр должен обеспечивать анализ частиц аэрозоля хлорида натрия с диапазоном изменения массовой концентрации от 5 нг/м^3 до 15 мг/м^3 при расходе постоянного потока, отбираемого из камеры на фотометр, не более 15 дм^3/мин. Время отклика фотометра без системы отбора проб не должно превышать 500 мс.

В заключение можно сказать, что применение метода пламенной фотометрии для определения массовой концентрации аэрозоля хлорида натрия позволяет проводить измерения коэффициента проникания фильтрующих СИЗОД с точностью, регламентируемой новыми стандартами. Данный метод обладает необходимым быстродействием и широким динамическим диапазоном. Кроме того, метод пламенной фотометрии, в отличие от счетного метода, применявшегося ранее для определения коэффициента проникания, позволяет определить концентрацию всего аэрозоля, попавшего под СИЗОД, а не его отдельных фракций, что значительно повышает точность испытаний.

ВОЗМОЖНОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНО-КИНЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

В.В. Козлов

Анализаторы газообразного кислорода относятся к наиболее востребованным приборам газового анализа. Это связано с особым местом кислорода в жизнедеятельности человека, широким применением кислорода в технологических процессах. Существующие газоанализаторы кислорода опираются в своей работе на принципиально различные физические эффекты, имеют определенные недостатки, и технические решения, применяемые при конструировании приборов, имеют мало общего. Это заставляет искать новые возможности решения проблемы измерения кислорода. Одним из перспективных путей является использование эффекта тушения люминесценции красителей кислородом – так называемый люминесцентно-кинетический метод анализа. Он заключается в том, что под действием кислорода, при прочих равных условиях, происходит изменение параметров возбужденной люминесценции, что позволяет определять содержание кислорода. Эффект тушения обладает несколькими важнейшими особенностями – высокой избирательностью, так как практически он наблюдается только под воздействием кислорода, малой инерцией реакции (менее 10^{-2} с), слабой зависимостью от температуры [1]. Существенно, что эффект не носит характера химического взаимодействия, т.е. полностью обратим, не обладает гистерезисом.

Первые известные (в нашей стране) попытки использовать эффект для конструирования анализаторов кислорода были связаны с проблемой обеспечения взрывобезопасности судов танкерного флота, объектов специального назначения. Выбор люминесцентно-кинетического метода был полностью обусловлен требуемым быстродействием приборов – не хуже 1 с. Необходимо отметить, что до настоящего времени ни один из применяющихся методов анализа (кроме люминесцентно-кинетического) не может обеспечить быстродействие приборов лучше 7–10 с.

Спроектированные и изготовленные в 70-х годах экспериментальные приборы включали в себя малогабаритную лампу накаливания, светофильтры, выделяющие полосу возбуждения люминесценции красителя (синяя область спектра), механический модулятор, чувствительный элемент (ЧЭ) в виде гранул силикагеля, пропитанного красителем, светофильтры, выделяющие полосу люминесценции (желтая область), приемник излучения люминесценции на ФЭУ. Анализируемая смесь прокачивалась через ЧЭ малогабаритным насосом. Показателем концентрации кислорода являлось изменение среднего уровня люминесценции. Диапазон измеряемой концентрации составлял от 5% до 30% об. кислорода. Эти приборы прошли механические и климатические испытания и подтвердили большие потенциальные возможности метода. Дальнейшие исследовательские работы, проведенные с целью внедрения люминесцентно-кинетического метода в практику измерения, позволили оптимизировать узлы прибора, создать простой и механически прочный чувствительный элемент [2] на основе красителя трипафлавина, адсорбированного на силикагеле. Технология изготовления ЧЭ проста и не требует сложного оборудования. Смесь из силикагеля и угля подвергается штамповке в виде таблетки диаметром несколько миллиметров и толщиной около 0,4 мм, затем уголь выжигается. В результате образуется пористое тело из силикагеля, которое пропитывается красителем, сушится, при необходимости гидрофобизируется. Современная конструкция прибора включает в качестве источника возбуждения люминесценции светодиод, в качестве приемника – фотодиод. Возможность применения светодиодов и фотодиодов позволила сравнять весогабаритные показатели люминесцентно-кинетического анализатора кислорода с малогабаритными электрохимическими приборами при снижении стоимости в два раза.

Разработанные приборы измеряют амплитуду постоянно возбуждаемой светодиодом люминесценции, точнее, быстро затухающей ее части – флуоресценции. Однако известны более интересные результаты, полученные при изучении эффекта тушения люминесценции кислородом [4]. Они связаны с тушением другой составляющей люминесценции красителей – фосфоресценции. При содержании кислорода в несколько процентов эта составляющая люминесценции практически уже полностью потушена и не наблюдается. Однако с уменьшением содержания кислорода ее амплитуда растет и становится достаточной для проведения измерения. Исследования показывают возможность определения концентрации кислорода по измерению параметров фосфоресценции на уровне 10^{-8} % об. (в нормальных условиях). При проведении измерений необходимо выделить сигнал фосфоресценции. Это достигается за счет использования разницы в постоянной затухания составляющих люминесценции при ее импульсном возбуждении. Ранее для этих целей применялись механические модуляторы, которые обеспечивали необходимую задержку между сигналом возбуждения и сигналом люминесценции, поступающим на фотоприемник. Сейчас за счет использования светодиодов возможно эффективное импульсное возбуждение люминесценции и подробное изучение амплитудно-временной характеристики послесвечения. Переход от измерения только амплитудной составляющей люминесценции к анализу ее временных параметров при импульсном возбуждении позволяет различать составляющие люминесценции. Это должно позволить реализовать в одном приборе исключительно широкий диапазон измерения содержания кислорода – от микроконцентраций при измерении тушения фосфоресценции и, далее, после ее погашения до больших концентраций при измерении тушения флуоресценции.

В процессе проведенных экспериментов была отработана технология гидрофобизации ЧЭ. Гидрофобизация защищает ЧЭ от поступления влаги в поры элемента, т.е. к красителю, не препятствуя поступлению анализируемой газовой смеси. Основные характеристики ЧЭ при этом не меняются. В связи с этим представляет интерес проведение экспериментов по изучению возможности определения содержания кислорода, растворенного в жидкости, на основе разработанного чувствительного элемента.

Таким образом, люминесцентно-кинетический метод является универсальным, так как одно техническое решение потенциально позволяет определять содержание кислорода в газах в очень широком диапазоне значений и, возможно, в жидкости.

Литература

1. Левшин В.Л. Фотолюминесценция жидких и твердых веществ. М-Л.: ГИТТЛ, 1951.
2. Захаров И.А, Гришаева Т.И. Бардин В.В., Картавцева О.Н., Козлов В.В. Способ получения люминесцентного сенсора кислорода. АС № 1558953 от 18 04.88
3. Козлов В.В. Люминесцентно-кинетический анализатор кислорода // Научное приборостроение. 2003. Т 13. № 3. С.35–37.
4. Захаров И.А. Исследование тушения кислородом фосфоресценции адсорбатов трипафлавина на силикагеле в связи с определением малых концентраций кислорода в газах. Автореф. к.т.н. Л., 1964.

АТТЕСТАЦИЯ ЭТАЛОННЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО РЕФРАКТОМЕТРА

М.В. Беднова, Г.Г. Ишанин

В условиях непрерывного роста требований к достоверности результатов измерений, выполняемых с помощью газоаналитических приборов, особенно остро стоит вопрос о качестве передачи размера единицы молярной доли и массовой концентрации газоанализаторам, имеющим статус рабочих эталонов 0-го,1-го, 2-го разрядов, на которых осуществляется выпуск ГСО–ПГС (государственных стандартных образцов – поверочных газовых смесей).

Требования к обеспечению единства измерений в газовом анализе изложены в ГОСТ 8 .578–2002 «Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах». Согласно данному документу, для передачи размера единицы молярной доли и массовой концентрации компонентов в газовых средах от государственного первичного эталона рабочим эталонам 0-го, 1-го, 2-го разрядов и рабочим средствам измерения используются эталоны сравнения – газовые смеси в баллонах под давлением [1]. Высокоточное определение количественного состава эталонов сравнения, таким образом, является наиболее важной задачей газового анализа.

В номенклатуре государственных стандартных образцов, внесенных в государственный реестр утвержденных типов ГСО и указанных в приложении 3 ТУ 6-16-2956-92 «Смеси газовые поверочные – стандартные образцы состава», большое количество поверочных газовых смесей – бинарные.

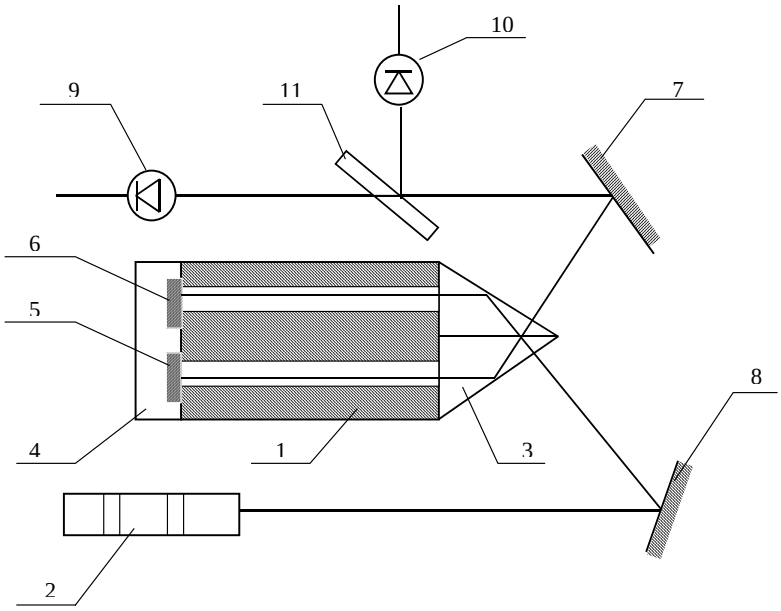


Рис.1. Оптическая схема лазерного интерференционного рефрактометра ЛАЗИР-2МК

Для аттестации эталонных газовых смесей в научно-исследовательском отделе госэталонов в области физико-химических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» используется лазерный интерференционный рефрактометр «ЛАЗИР-2МК».

Принцип действия прибора основан на определении смещения интерференционной картины при изменении показателя преломления газа, заполняющего рабочую кювету [2]. Конструкция прибора включает в себя оптико-механический блок, газораспределительный блок, персональную ЭВМ с встроенным в системный блок модулем сбора аналоговой информации. В качестве источника монохроматического света в приборе используется гелий-неоновый лазер типа ЛГН-2071-2Р, имеющий длину волны излучения λ = 0,632991 мкм.

Излучение лазера 2 при помощи зеркала 8 направляется в двулучевой интерферометр 1. Интерферометр представляет собой моноблок 1 из ситалла, в котором просверлены два канала, образующие кюветы - измерительную и сравнительную. На одном конце моноблока закреплена светоделительная призма Кестерса 3, а на другом – отражательный блок 4 с двумя зеркалами 5 и 6 – для каждой кюветы. Пройдя через призму, поток излучения делится на два световых пучка – измерительный и опорный. Опорный пучок направляется на зеркало 5, а измерительный – на зеркало 6 отражательного блока. Отражаясь от зеркал, световые потоки вновь направляются на призму Кестерса 3, смешиваются и образуют интерференционную картину. Интерференционная картина при помощи зеркала 7 и светоделительной пластинки 11 регистрируется двумя фотоприемниками типа ФД – 256.

Таким образом, световые пучки дважды проходят опорную и измерительную кюветы. Если в последней происходит процесс замещения одной газовой смеси с показателем преломления n_1 другой газовой смесью с показателем n_2, то в плоскости фотоприемников наблюдается перемещение интерференционных полос. Регистрация смещения интерференционной картины осуществляется с точностью до 1/100 интерференционной полосы.

Измеряемая величина – объемная доля компонента «А» в анализируемой газовой смеси, состоящей из компонентов «А» и «В». Она определяется согласно выражению

$$C_A^a = C_A^c \pm \frac{100 \cdot \lambda \cdot P_0 \cdot T \cdot (N_a - N_c)}{2 \cdot L_p (n_B - n_A) \cdot P \cdot T_0},$$

где C_A^a и C_A^c – объемные доли компонента «А» в анализируемом и сравнительном газе, %, L_p – длина рабочей кюветы (L_p = 249100 мкм), P_0 – атмосферное давление при нормальных условиях, кПа (P_0 = 101,3 кПа), P – атмосферное давление при проведении анализа, кПа, T_0 – температура газа при нормальных условиях, К, (T_0 = 273,2 К), T – температура газа при проведении анализа, К, n_A и n_B – показатели преломления чистых газов «А» и «В» при λ, P_0, T_0. N_a и N_c – число интерференционных полос при заполнении рабочей кюветы анализируемым и сравнительным газом. Знак «+» перед вторым членом формулы (1) получается при $N_a > N_c$, знак «-» при $N_a < N_c$. При отсутствия компонента «А» в сравнительном газе C_A^c = 0.

Газораспределительный блок обеспечивает возможность поочередной подачи сравнительного и анализируемого газа в рабочую кювету, контроля объемного расхода газа, подсоединения и отсоединения рабочей кюветы от линии сброса. Управление процессом измерения и обработка измерительной информации осуществляется при помощи персональной ЭВМ по программе «Рефрактометр», которая позволяет производить многократные измерения концентрации, запоминать их результаты, формировать и выдавать итоговый протокол.

Широкая номенклатура определяемых газовых компонентов, большой диапазон измеряемых концентраций, быстрота и точность анализа позволяют использовать данный газоанализатор при аттестации эталонов сравнения – газовых смесей наряду с газоанализаторами, основанными на других методах измерения [3].

Литература

1. ГОСТ 8.578 – 2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах: М.: Изд-во стандартов, 2002.
2. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии.3-е изд. Л.: Химия, 1983.
3. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. СПб.: ЗАО «Крисмас+», 1998. Т. 1.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЦЕССА АТТЕСТАЦИИ ЭТАЛОННЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА «ЛАЗИР-2МК»

М.В. Беднова, А.В. Вяргизов

Лазерный интерференционный рефрактометр «ЛАЗИР-2МК» представляет собой полуавтоматический газоанализатор для анализа бинарных газовых смесей. Информационным параметром, который регистрируется измерительной системой прибора, является смещение интерференционной картины, возникающее в процессе замещения газовой смесью чистого газа в рабочей кювете рефрактометра [1].

Управление измерительным процессом осуществляется персональным компьютером, обработка информации производится программой «Рефрактометр», которая позволяет накапливать данные, формировать и выдавать протокол измерения. При использовании программы оператор заносит в информационные окна данные об аттестуемой смеси (ее качественный состав), условия измерения (температуру внутри кюветы и атмосферное давление), а также информацию, не участвующую в вычислении объемной доли аттестуемого компонента, но необходимую для составления итогового протокола. В зависимости от того, какие составляющие бинарной газовой смеси введены, программой выбираются соответствующие компонентам показатели преломления n_A и n_B, которые, наряду с данными об условиях измерения, необходимы для расчета объемной доли содержания компонентов в аттестуемой газовой смеси.

Расчет осуществляется ЭВМ по заданной программе по формуле:

$$C_A^a = k_{AB} \frac{T \cdot \Delta N}{\Delta\beta \cdot P} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где k_{AB} = 0,47111, $\Delta N = N_a - N_c$ – разность значений числа интерференционных полос для анализируемого и сравнительных газов, T – температура газовой смеси, К, $\Delta\beta = \beta_{0B} - \beta_{0A}$ – разность преломляющих усилий сравниваемых газов.

Значения преломляющих усилий для некоторых газов при $\lambda = 0{,}632991$ мкм (длина волны излучения гелий-неонового лазера), $P_0 = 760$ мм. рт. ст., T_0=273,2 К приведены в таблице.

Газы	Преломляющее усилие β_0
Воздух	291,68
Кислород, O_2	270,38
Азот, N_2	397,57
Водород, H_2	138,91
Гелий, He	34,81
Аргон, Ar	281,41
Метан CH_4	440,09
Пропан C_3H_8	1074,0
Бутан C_4H_{10}	1380,2
Диоксид углерода CO_2	447,51

Таблица. Значения преломляющих усилий для некоторых газов

Попеременное поступление в измерительную кювету чистого газа и аттестуемой газовой смеси осуществляется оператором путем переключения соответствующих кранов на лицевой панели газосмесительного блока. Начало измерения, отсчет интерфе-

ренционных полос и анализ результатов измерения, а именно определение числа измерений и подходящего размаха их результатов, также производится оператором.

Таким образом, очевидно, что при аттестации газовых смесей с помощью интерференционного рефрактометра «ЛАЗИР–2МК» необходимо постоянное присутствие оператора для осуществления переключения кранов газосмесительного блока, начала измерения, управления отсчетом и контроля результатов измерения.

Разработка алгоритма полностью автоматизированного процесса аттестации эталонных газовых смесей с применением газоанализатора «ЛАЗИР–2МК» (рис. 1) проводится с целью уменьшения количества действий оператора, влияющих на достоверность результатов измерения [2]. Например, при несвоевременном или преждевременном переключении клапанов газосмесительного блока в измерение концентрации газового компонента будут внесены значительные ошибки. Та же картина будет наблюдаться и при запоздалом начале измерения или скором окончании замещения одного газа другим.

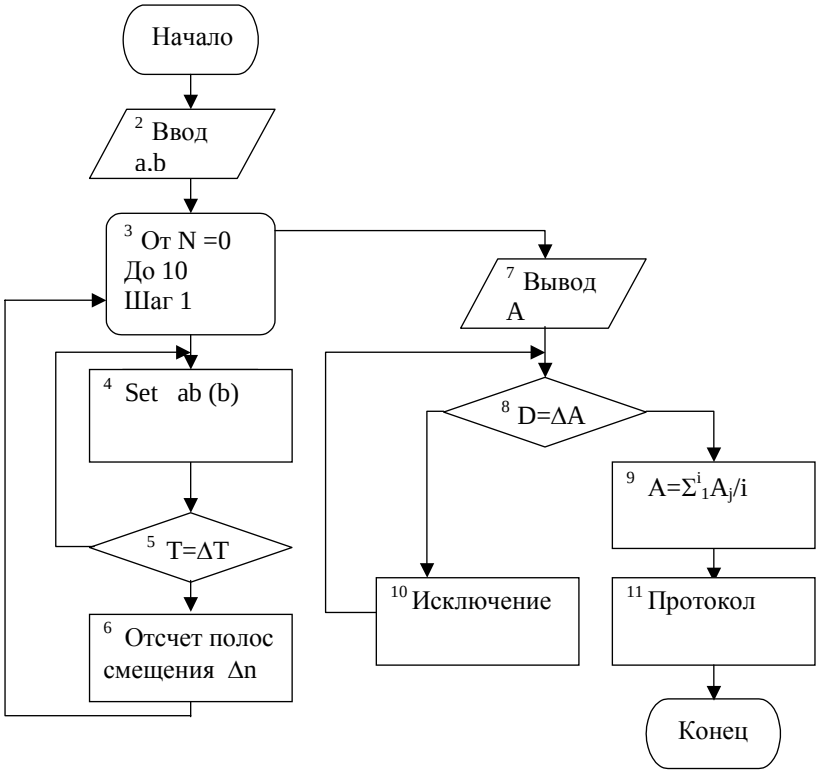


Рис.1. Алгоритм автоматизированного процесса аттестации эталонных газовых смесей с применением газоанализатора «Лазир-2МК».

Проведя необходимые предварительные действия, а именно – включение в газовую схему баллонов с анализируемой газовой смесью и чистым сравнительным газом, занесение параметров, определяющих условия измерения (значение температуры кюветы и атмосферного давления), а также данных, необходимых для формирования протокола (номер аттестуемого баллона, его вместимость и давление смеси), приступают к процессу измерения по представленному алгоритму.

На начальном этапе измерительного процесса, который осуществляется газоанализатором «ЛАЗИР-2МК», пользователем в программе задаются компоненты *a* и *b*, из которых состоит анализируемая газовая смесь. Происходит выбор преломляющих усилий газов β_0. Затем задается количество измерений *N*, необходимых для обеспечения достоверности результатов (оптимально производить 10 измерений). Следующим этапом является напуск в измерительную кювету анализируемой газовой смеси *ab* или

сравнительного газа b. По истечении времени ΔT, за которое смещение интерференционной картины проходит полностью, производится отсчет числа прошедших интерференционных полос Δn. Закончив цикл измерений и накопив данные A_j, программа формирует из них массив и приступает к его обработке. Проверяется соответствие полученных в результате измерений данных A_j условию:

$$\Delta A \leq D, \qquad (2)$$

где ΔA – разность между максимальным и минимальным результатом измерения, D - допустимый размах наблюдений. Если данные не удовлетворяют условию 2, проводится исключение максимального или минимального значения, после чего проверка повторяется. При соблюдении условия 2 программа рассчитывает среднее значение результатов измерений, после чего формируется итоговый протокол.

Литература

1. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии./ 3-е изд. Л.: Химия, 1983.
2. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. СПб.: ЗАО «Крисмас+», 1998. Т. 2.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА МИКРОПОРОШКОВ

Д.Н. Козлов, О.В.Борисова

Современное развитие промышленности и технологий требует широкого применения порошкообразных материалов. В виде порошков и суспензий выпускается как готовая продукция - удобрения, ядохимикаты, лекарственные препараты, цемент, косметические средства, так и исходные продукты при изготовлении красок, керамики, и т.д. Гранулометрический состав влияет на ряд важнейших физических свойств порошков.

В связи с большим разнообразием методов и приборов одним из принципиальных вопросов является обеспечение единства измерений при проведении дисперсионного анализа [2, 3]. Одним из путей решения этой задачи является создание стандартных образцов гранулометрического состава порошкообразных материалов.

Действующая мировая практика и международные нормативные документы [4] регламентируют представление основных результатов измерений анализаторами размеров частиц в виде D_{10}, D_{50} и D_{90}, что соответствует процентному содержанию весовой доли частиц заданного размера менее 10, 50 и 90 % от общего содержания. В соответствии с ИСО 13320 действуют следующие требования к стандартным образцам:

- форма частиц – сферическая;
- известное распределение частиц по размерам;
- погрешность аттестованного значения D_{10}, D_{90} должна быть не более ±5 %, а для D_{50} ± 3 %;
- распределение частиц по размерам должно устанавливаться абсолютными методами;
- известны действительная и мнимая части показателя преломления.

Наиболее распространенными абсолютными методами на сегодняшний день являются седиментационные и микроскопические [1].

В целях разработки стандартных образцов гранулометрического состава порошкообразных материалов, предназначенных для градуировки и поверки аэрозольных и гидрозольных счетчиков частиц, а также анализаторов размеров частиц, были исследованы порошки на основе кварцевых сфер и гранул электрокорунда. Исходные образцы проб предварительно высушивались в муфельной печи при температуре 100 °С в течение 2 часов и охлаждались до комнатной температуры в эксикаторе. Разделение пробы происходило методом квартования после тщательного встряхивания.

Определение формы и функции распределения частиц по размерам производилось на оптическом микроскопе МКТФ-1 с телевизионной системой ОТС-1200. Затем измерения функции распределения частиц по размерам производились на универсальном измерителе дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов дифракционным методом, входящем в состав Государственного специального эталона единицы массовой концентрации частиц в аэродисперсных средах ГЭТ 164-2003. На рис. 1 и 2 представлены изображения частиц кварцевых сфер и гранул электрокорунда, нанесенные на предметные стекла и полученные в проходящем свете оптического микроскопа.

Поскольку при решении обратной задачи рассеяния для определения гранулометрического состава порошка в качестве приближения считается, что форма частиц – сферическая, для каждой гранулы в поле зрения микроскопа был произведен расчет проекционного диаметра по формуле

$$d_i = \frac{2}{n}\sum_{j=1}^{n}\sqrt{\frac{(a_i b_i)_j}{\pi}}\,, \qquad (1)$$

где d_i – диаметр i –той частицы, n – количество измерений размера i –той частицы, a, b– длины проекций частицы на оси x и y, проходящие через центр данной частицы.

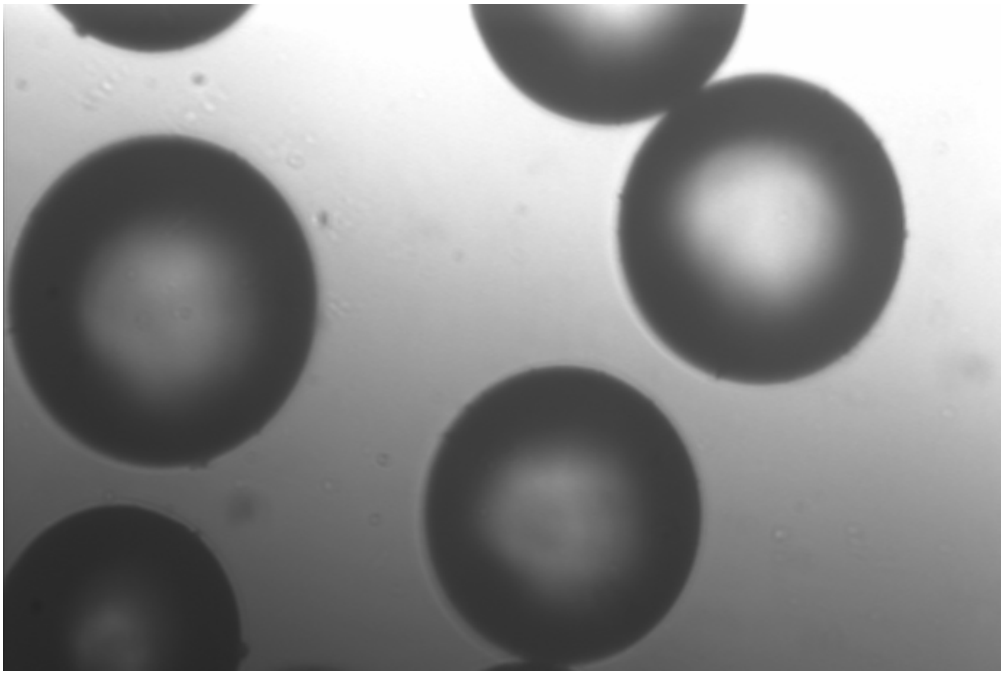


Рис. 1. Кварцевые сферы, сфотографированные в проходящем свете оптического микроскопа

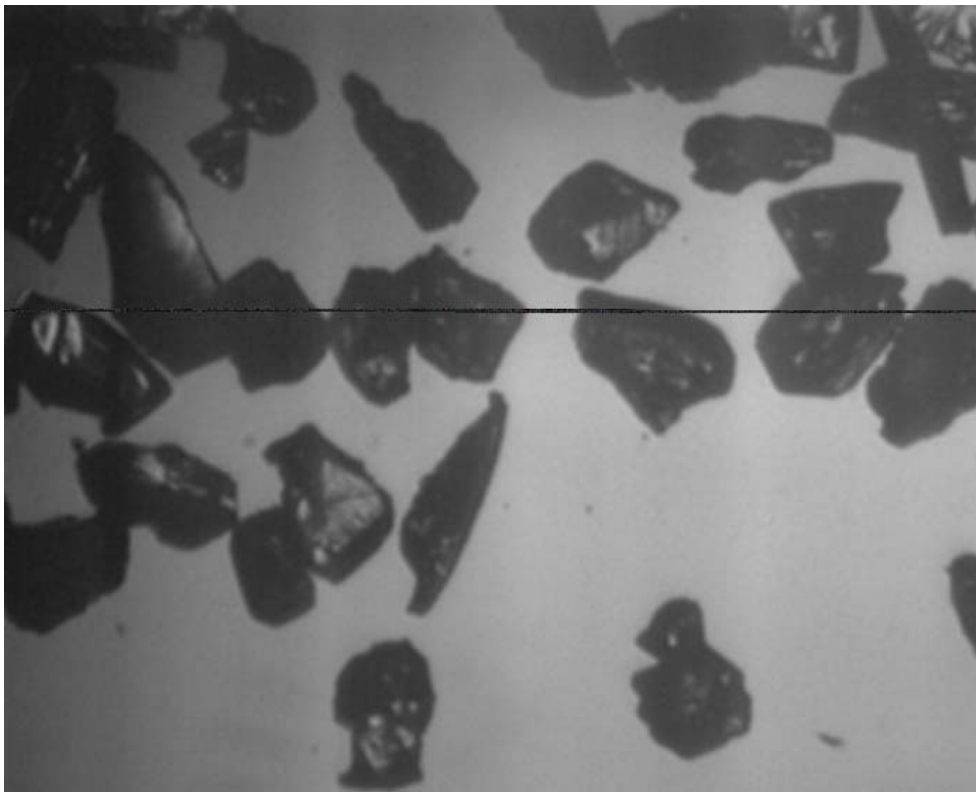


Рис. 2. Частицы электрокорунда, сфотографированные в проходящем свете оптического микроскопа

Для расчета погрешности определения размеров частиц универсальным измерителем результаты микроскопического анализа необходимо представить в весовых долях каждой отдельной фракции P_j , %, в соответствии с формулой

$$P_j = \frac{\sum_j (N_i d_i^3)}{\sum_{j=1}^{m} \sum_j (N_i d_i^3)} \cdot 100, \qquad (2)$$

где N – количество частиц диаметра d в j–той фракции с заданным диапазоном размеров частиц, m – общее количество фракций.

На рис. 3, 4 приведены графики функций распределения кварцевых сфер и гранул электрокорунда по размерам после микроскопического анализа и дифракционным методом.

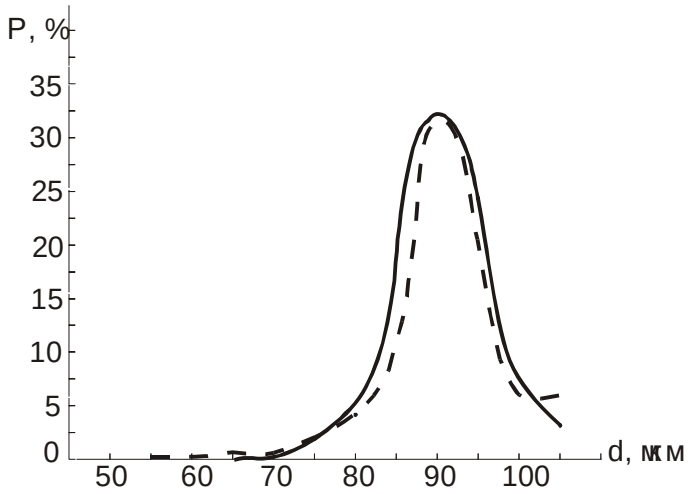


Рис. 3. Функции распределения кварцевых сфер по размерам после микроскопического анализа (_ _ _ _) и дифракционным методом(_____)

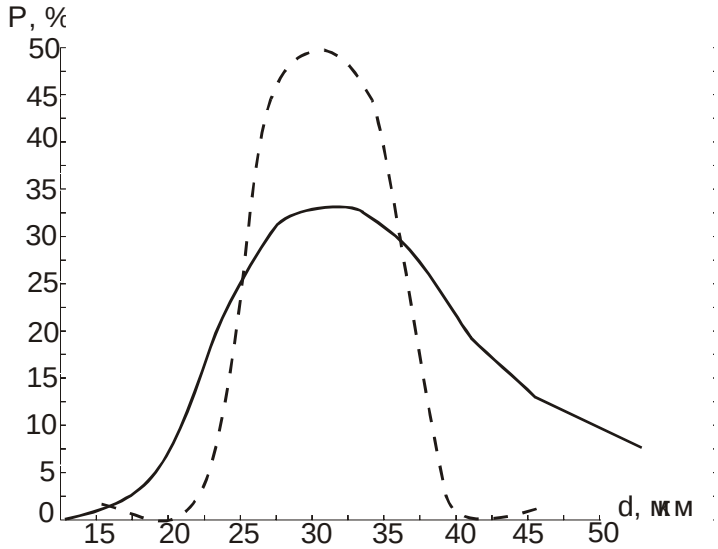


Рис. 4. Функции распределения гранул электрокорунда по размерам после микроскопического анализа (_ _ _ _) и дифракционным методом (_____)

Результаты расчетов относительной погрешности определения значений D_{10}, D_{50}, D_{90} универсальным измерителем δ_D, %, рассчитанные по формуле

$$\delta_D = \frac{d_x^м - d_x^и}{d_x^м} \cdot 100, \qquad (3)$$

представлены в табл. 1. Здесь $d^м_x$, $d^и_x$ – диаметры частиц, полученные микроскопическим и дифракционным методами и соответствующие заданной весовой доле (10, 50 и 90 %).

	δ_{10}, %	δ_{50}, %	δ_{90}, %
Кварцевые сферы	3	0,9	1,1
Гранулы электрокорунда	5	3	4

Таблица 1. Результаты расчетов относительной погрешности δ_D определения значений D_{10}, D_{50}, D_{90} универсальным измерителем

На основании проведенных исследований представляется возможным производить градуировку и поверку анализаторов гранулометрического состава, имеющих погрешность 10–25 % с использованием порошков на основе электрокорунда и имеющих погрешность 5–15 % с использованием порошков на основе кварцевых сфер.

По результатам работы в ГНЦ «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» была проведена метрологическая аттестация 10 стандартных образцов (СО) гранулометрического состава порошкообразных материалов КМК с размерами частиц 5–95 мкм. Аттестация проводилась по результатам определения размеров частиц при помощи оптического микроскопа МКТФ-1 с телевизионной системой ОТС-1200 и мер сравнения длины в соответствии с МИ 2060-90.

Перспективы развития метрологического обеспечения указанных средств измерений требуют продолжения исследований с целью расширения диапазона размеров частиц в СО от 0,2 мкм до 5 мм, совершенствования методики приготовления образцов, их широкого внедрения в промышленности.

Литература

1. Градус Л.Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. М.: Химия, 1979. 232 с.
2. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: Химия, 1974. 280 с., ил
3. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей./С.П.Беляев, Н.К. Никифорова, В.В. Смирнов, Г.И. Щелчков. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с., ил.
4. ISO 13320 – 1:1999 (E). Particle size analysis. Laser diffraction methods. Part 1: General principles. 34 p.

НАНОТЕСТЕР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И МОДИФИКАЦИИ МИКРО– И НАНОСТРУКТУР: СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА

А.О. Голубок, С.Ю. Керпелева

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) – один из базовых приборов в современной нанотехнологии. Визуализация микро- и наноструктур на поверхности образцов в СЗМ основана на детектировании локального взаимодействия между твердотельным нанозондом и образцом. Измеряя туннельный ток или локальную силу взаимодействия между нанозондом и образцом в процессе прецизионного механического сканирования, можно не только визуализировать топографию поверхности, но и построить пространственную карту электронных и механических характеристик образца (электрического потенциала, работы выхода электрона, плотности электронных состояний, механической твердости, коэффициента трения). Кроме того, СЗМ используется как нанолитограф, так как он обеспечивает наномодификацию поверхности за счет высокой плотности туннельного тока, высокой напряженности электрического поля и сильного механического давления в области наноконтакта. Следует отметить, что объектами визуализации, диагностики и модификации в СЗМ могут быть не только твердотельные наноструктуры, но и образцы биологического характера, причем в силу природы контраста СЗМ может функционировать как в вакууме, так и в газе и жидкости. Последнее обстоятельство позволяет визуализировать и модифицировать биообъекты, например, клетки в нативном состоянии.

Одним из основных элементов, определяющих качество СЗМ, является датчик локального силового взаимодействия и туннельного тока. Обычно в качестве датчиков туннельного тока используют очень остро заточенные металлические иглы, подключенные на вход преобразователя ток-напряжение (ПТН). Основная проблема, возникающая здесь при измерении сверхмалых токов (10^{-10}-10^{-12}А) – это устранение токов утечки и уменьшение входной емкости. Датчиками силового воздействия обычно являются прогибающиеся под действием локальной силы упругие элементы (кантилеверы) с нанозондом и оптической системой регистрации сверхмалых прогибов на основе твердотельного лазера и секционированного фотодиода. Кантилевер представляет собой закрепленную с одного конца кремниевую пластинку с хорошо отражающей свет полированной поверхностью и нанозондом в виде выступающей на другом конце над плоскостью пластинки кремниевой нанопирамидки.

Использование кантилеверов для детектирования силового взаимодействия затрудняет работу с нативными клетками в жидкости вследствие капиллярных сил, действующих на упругий элемент со стороны жидкости. Кроме того, необходимая при работе с кантилеверами оптическая система регистрации нуждается в точной юстировке и не всегда согласуется с требованиями к конструкции, например, при совмещении СЗМ с растровым электронным микроскопом. А такое совмещение весьма привлекательно с точки зрения нанотехнологий, поскольку оно объединяет в одной установке преимущества сфокусированного сканирующего электронного пучка и сканирующего твердотельного нанозонда.

Мы предлагаем разработать, изготовить и испытать пьезорезонансный датчик локального силового взаимодействия на основе простого и компактного пьезокерамического элемента с закрепленным на нем нанозондом в виде остро заточенной вольфрамовой иглы. [1]. В отличие от стандартного кантилевера, такому датчику не нужна оптическая

схема регистрации отклонения нанозонда и не требуется система оптической юстировки, а силовое взаимодействие между нанозондом и образцом измеряется с помощью электрических сигналов, возникающих в датчике в результате пьезоэффекта. Имея значительно большую механическую жесткость, чем стандартные кремниевые кантилеверы, датчик может работать как в силовом режиме, так и в режиме измерения туннельного тока, он также может работать с жидкими образцами без специальной адаптации, обеспечивает простое совмещение СЗМ с растровым электронным микроскопом.

Первоначально атомно-силовой микроскоп (АСМ), разработанный Биннингом [2], работал в режиме, при котором его острие находилось в контакте с образцом, и действующие силы могли быть либо притягивающие, либо отталкивающие. Здесь сила F, возникающая между образцом и острием, сбалансирована отклонением z острия, равным $z = F/k$, где k – жесткость узла крепления острия. АСМ, работающие в контактном режиме, способны воспроизводить изображения как проводящих, так и непроводящих образцов с атомным или молекулярным разрешением.

Чтобы исследовать электрические, магнитные и ван-дер-ваальсовские поля, можно немного отвести острие от поверхности образца и вынуждать его вибрировать на резонансной или близкой к ней частоте [3]. Для амплитуды вибрации, намного меньшей, чем расстояние от образца до острия, можно использовать приближение теории возмущений, чтобы моделировать влияние типовых силовых полей на вибрирующее острие. Если в отсутствие силового поля осциллятор имел жесткость k, и частоту резонансных колебаний ω_0, то в изменяющемся в пространстве силовом поле с градиентом F', (F'– производная от локальной силы, возникающей между острием и поверхностью) он приобретет эффективную жесткость $k_1 = k - F'$ и измененную резонансную частоту $\omega_1 = [k_1/m]^{1/2}$ [3], здесь m – эффективная масса осциллятора. Изменение в резонансной частоте вызывает изменение в фазе и амплитуде колебаний острия, которое может использоваться для измерения полей взаимодействия. Поместив иглу на пьезоэлектрический элемент и используя систему обратной связи, можно получить топографическую карту производной от силы над поверхностью образцов, которая происходит из истинной топографии или от электрического и магнитных полей. Недостаток работы в этом бесконтактном режиме – некоторая потеря в разрешении. Преимущество, однако, состоит в возможности получения существенного увеличения чувствительности к малым производным силы.

Для моделирования бесконтактного режима работы при малых амплитудах колебаний зонда над поверхностью можно использовать приближение теории возмущений, но оно совершенно не подходит для больших значений амплитуд колебаний. В частности, когда амплитуда вибрации равна или больше промежутка между острием и поверхностью образца, возникает случай нелинейной осцилляторной системы с внешним возбуждением, который требует численного решения.

Чтобы моделировать движение управляемого нелинейного осциллятора, необходимо решить, какой тип сил будет играть главную роль во взаимодействии поверхности и острия. Взаимодействие зонда с образцом на больших расстояниях (область притяжения) мы будем описывать в рамках модели Леннарда-Джонса для сферы и плоскости [4]. При малых расстояниях между острием и образцом (область отталкивания) сферическое острие надавливает на поверхность образца, деформируя ее. Для моделирования отталкивающей части взаимодействия мы будем использовать классическую силу упругого расталкивания двух тел. Комбинация этих сил позволит проанализировать колебания зонда при больших амплитудах.

Нелинейность колебательной системы значительно усложнят анализ вида колебаний. Действительно, в течение полного колебательного цикла острие, главным образом, испытывает силу притяжения и только в течение короткой фазы цикла – силу отталкивания. Кроме того, мягкий образец острие деформирует больше, чем жесткий. В обоих случаях импульс острия меняется от конечного значения до нуля, но мягкий образец испытает меньшую силу, работающую в течение большего промежутка времени. Жест-

кий образец, с другой стороны, испытает большую силу, действие которой длится более короткое время.

На рис.1 схематически изображена механическая модель датчика. Здесь показана жестко закрепленная на одном конце пьезоэлектрическая трубка, которая управляет положением острия по оси *z*, колеблющаяся с частотой ω и амплитудой *A*.

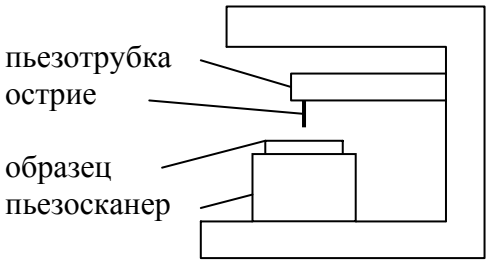


Рис. 1. Схема механической системы, для моделирования датчика

Результаты численного эксперимента лягут в основу разработки опытного образца датчика. Разработка и изготовление опытного образца датчика будут проводиться на основе имеющегося в исследовательской группе экспериментального задела в области датчиков взаимодействия для СЗМ [6], технологии изготовления нанозондов для СЗМ [5]. Испытание опытного образца датчика будет проводиться с использованием имеющегося в исследовательской группе опыта разработки и эксплуатации различных типов СЗМ, включая СЗМ, совмещенный с растровым электронным микроскопом [3–5].

На данном этапе выполнения работы были разработаны конструкции датчиков универсального взаимодействия и произведены расчеты.

Работа выполнена при поддержке грантов научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениями науки и техники», подпрограмма «Электроника» (208), тема НИР: «Нанотестер для диагностики и модификации микро- и наноструктуры: создание и исследование методики, изготовление и испытание макетного образца», код проекта/НИР: 208.04.01.№016, а также при поддержке конкурса 2003 г. на соискание грантов для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов высших учебных заведений Минобразования России (тема НИР «Исследование экзоэлектронной эмиссии с использованием метода сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии»).

Литература

1. Голубок А.О., Сапожников И.Д., Соловьев А.М., Типисев С.Я. Комбинированные методики сканирующей туннельной и силовой микроскопии. // Микроэлектроника. 1997. Т. 26. В.4. С. 291-296.
2. Биннинг Г., Рорер Г. Сканирующая туннельная микроскопия – от рождения к юности. Нобелевская лекция по физике. // УФН. 1996. Т.154. В.2. С. 261.
3. A.O. Golubok, S.A. Masalov and N.A. Tarasov, Thermofield tip formation in UHV/STM combined with field-emission microscope, Ultramicroscopy, 42-44, P. 1574-1579 (1992).
4. A.O. Golubok and V.A. Timofeev, STM combined with SEM without SEM capability limitations, Ultramicroscopy, 42-44, P. 1558-1563 (1992).
5. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Тимофеев В.А., Типисев С.Я. Сканирующий туннельный микроскоп при атмосферном давлении. / В сб Научное приборостроение. Выпуск Электронно-ионная оптика. Л.: Наука, 1989. С.72–76
6. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Нахабцев Д.В. Аппаратные и программные средства сканирующего туннельного микроскопа. / В сб. Научное приборостроение. Выпуск Электронно-ионная оптика. Л.: Наука, 1989. С.77-84.

РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРОМЕТРА «MAGIX» И ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА XL30TMP

С.В. Двоеглазов, Л.П. Коробейникова

Конструкционные стали нашли широкое применение в различных отраслях промышленности для изготовления деталей машин и приборов. Они обладают целым комплексом необходимых свойств и большим разнообразием химического состава, что позволяет варьировать эти свойства в широком диапазоне. И, соответственно, чтобы обеспечить долгую и надежную эксплуатацию деталей, необходимо контролировать содержание элементов в данных сталях.

Большой диапазон концентраций предъявляет определенные требования к методам количественного анализа элементного состава. Здесь наиболее целесообразным становится применение такого метода, как рентгеноспектральный флуоресцентный анализ, который от других методов аналитической химии отличается, наряду с широким диапазоном определения содержаний, низким пределом обнаружения, возможностью одновременного определения нескольких элементов, простотой пробоподготовки и возможностью полной автоматизации процесса контроля. Если же в процессе эксплуатации произошло разрушение детали, то встает вопрос о проведении фрактографических исследований, которые дают информацию о строении поверхности излома. Она используется для изучения механизма разрушения материалов и выявления причин поломки деталей и конструкций.

Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (РСФА) основан на том, что каждый химический элемент имеет спектр излучения, характерный только для него (характеристическое излучение). Следовательно, по характеристическому спектру излучения можно определять элементный или атомный состав вещества, а по интенсивности линий характеристического излучения – концентрацию атомов данного элемента [1].

В данной работе применялся кристалл-дифракционный всеволновый вакуумный сканирующий лабораторный спектрометр «MagiX» фирмы «PHILIPS Analytical X-Ray» (Нидерланды). Спектрометр предназначен для проведения количественного, полуколичественного, качественного анализа любых твердых, порошкообразных, жидких и пластичных неорганических объектов. Определяются элементы с порядкового номера 4 (бериллий) до 92 (уран), при их концентрации в интервале от 1–5 массовых % ppm до 100%. А тот факт, что он является сканирующим, позволяет для каждого энергетического диапазона устанавливать свои условия съемки, т.е. мы имеем возможность для отдельно взятого химического элемента задавать оптимальные условия проведения РСФА (напряжение и ток рентгеновской трубки, коллиматор, детектор и кристалл-анализатор).

Для визуализации поверхности излома применяются растровые электронные микроскопы, которые, обладая большой глубиной фокуса и хорошим пространственным разрешением, позволяют наблюдать объемное изображение структуры поверхности аварийной детали. В нашей работе мы получали изображение с помощью вторичных электронов, которые, наряду с другими сигналами, возникают при облучении поверхности образца тонко сфокусированным пучком первичных электронов – зондом. Именно они позволяют получать изображение с наиболее хорошим разрешением в 5–10 нм [2, 3].

На электронном микроскопе были получены снимки поверхности излома образца конструкционной стали марки Ст5. На рис. 1 можно наблюдать общий вид поверхности при увеличении x263. Рис. 2 и 3 получены при увеличении соответственно ×2323 и ×2446. Излом на рис. 2 отражает вязкий характер разрушения. На рис. 3, напротив, можно наблюдать хрупкое разрушение с ярко выраженными линиями скольжения.

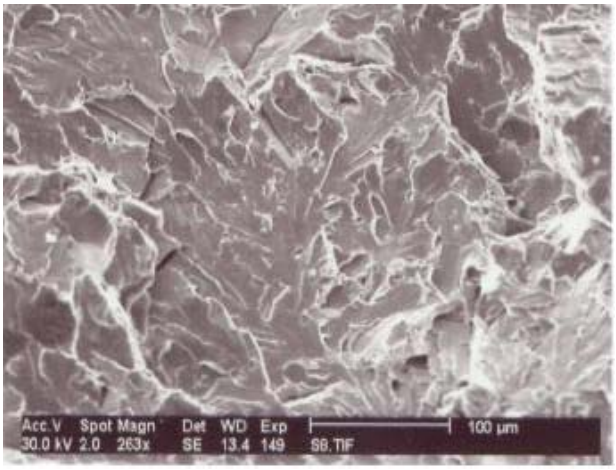


Рис. 1. Общий вид поверхности Ст5, увеличение x264

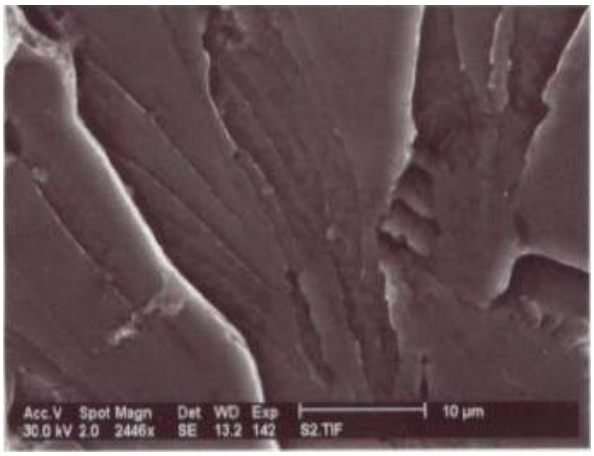


Рис. 2. Вязкое разрушение Ст5

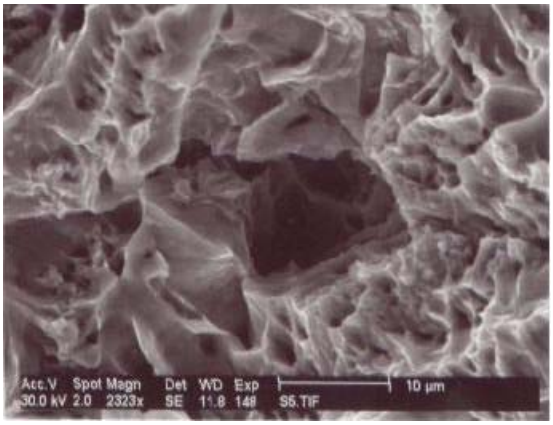


Рис. 3. Хрупкое разрушение Ст5. Линии скольжения

В результате можно сделать вывод о неоднородности состава образца и, как следствие, о невысоком качестве данной стали. Это может быть подтверждено последующими исследованиями на растровом электронном микроскопе, но уже с использованием рентгеновского микроанализатора, который позволит получить картину распределения элементов по поверхности излома.

При проведении РСФА были исследованы стандартные образцы (ГСО) углеродистых и легированных сталей в режиме качественного и количественного анализа.

Все участки спектра при качественном анализе представлены в виде зависимости интенсивности излучения от энергии (в килоэлектронвольтах). Также возможно представление зависимости интенсивности от длины волны (в нанометрах) или от значения угла 2Θ.

Следует отметить, что, имея спектр хотя бы одного стандартного образца, мы можем сравнивать с ним спектры неизвестных образцов и приблизительно оценивать их элементный состав. В таком режиме не нужно проводить каких-либо градуировок, а максимально оперативно получать информацию о содержании всех элементов, таким образом производить экспрессную идентификацию сплава.

В режиме количественного анализа было проведено исследование одного ГСО состава стали. Затем, для последующей метрологической аттестации методического обеспечения РСФА, была проведена оценка метрологических параметров аппаратуры, после которой можно сделать вывод о том, что рентгенофлуоресцентное исследование конструкционных сталей обладает хорошей воспроизводимостью, имеет высокий запас точности и низкий предел обнаружения.

В заключение хотелось бы сказать, что результаты проведенного исследования показали целесообразность применения метода РСФА для контроля элементного состава конструкционных сталей и важность визуализации поверхности излома при помощи РЭМ для получения информации о характере разрушения.

Результатом проделанной работы послужило создание методики исследования конструкционных сталей на основе РСФА для ее последующей метрологической аттестации.

Литература

1. Афонин В.П., Комяк Н.И., Николаев В.П., Плотников Р.И. Рентгенофлуоресцентный анализ. Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1991. 173 с
2. Гоулстейн Дж, Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х книгах. Пер с англ. М.: Мир, 1984. 348 с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьва В.П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1972. 510 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫМ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ МЕТОДОМ

В.А. Лукина, Л. П. Коробейникова

Работа проводилась в рамках создания аттестованных методик количественного анализа алюминиевых сплавов на основе рентгеноспектрального флуоресцентного метода. Проведено теоретическое обоснование выбора способа исследований (способа стандарта – некогерентно рассеянного излучения) и определены основные метрологические параметры современной рентгенофлуоресцентной аппаратуры при анализе алюминиевых сплавов.

При получении и переработке алюминиевых сплавов важнейшей задачей является определение концентрации входящих в них легирующих и примесных элементов. Точное определение элементного состава сплавов является сложной аналитической задачей по ряду причин. Во-первых, необходимо определять широкий диапазон содержаний, поскольку концентрация некоторых элементов в зависимости от марки сплава меняется от тысячных долей до десятков процента. Во-вторых, сплавы, как правило, являются многоэлементными системами, поэтому приходится определять концентрацию нескольких элементов, учитывая степень их влияния друг на друга.

При анализе сплавов традиционно используются различные химические и физико-химические методы анализа (фотометрический, гравиметрический, атомно-адсорбционный) по ГОСТ 25086-87, ГОСТ 11739.1–11739.24. Однако они требуют сложного проведения анализа, специальной пробоподготовки, ограничены узкими диапазонами определяемых содержаний [1], что делает их достаточно трудоемкими и сложными в применении непосредственно на производстве. Использование физических методов, в том числе методов спектрального анализа по ГОСТ 7727-81, значительно ускоряет и удешевляет процесс анализа на всех стадиях.

В последнее время одним из перспективных методов экспрессного контроля состава вещества является метод ренгеноспектрального флуоресцентного анализа (РСФА), который, по сравнению с традиционными, обладает рядом достоинств: многоэлементностью; широким диапазоном концентраций (10^{-4}–100 %); экспрессностью; возможностью создания автоматических систем аналитического контроля [2]. Метод РСФА нашел широкое применение и развитие в геологии и черной металлургии, однако для цветных металлов, в частности, сплавов на основе алюминия методическое обеспечение в полной мере не разработано [3].

Для обоснования возможности применения рентгеноспектрального флуоресцентного метода для анализа алюминиевых сплавов в первую очередь были выявлены наиболее значимые, так называемые информативные, элементы – это Cu, Mg, Mn, Fe и Si. Как показал обзор соответствующей литературы [4–6], именно эти элементы являются наиболее показательными, так как по их содержанию можно прогнозировать, какими свойствами обладает данный сплав.

В практике аналитических работ при определении малых содержаний тяжелых элементов в легких наполнителях хорошо зарекомендовал себя способ стандарта – некогерентно рассеянного излучения (стандарта – фона) [7]. При разработке методик определения информативных элементов в алюминиевых сплавах применен именно этот способ. В качестве примера рассмотрим методику определения железа, которое является одной из постоянных вредных примесей в алюминиевых сплавах.

Рентгеноспектральное флуоресцентное определение железа основано, как известно, на зависимости величины интенсивности рентгеновской флуоресценции железа от его содержания в пробе. При измерениях в насыщенных слоях и постоянном составе матрицы интенсивность аналитической линии пропорциональна определяемому содержанию железа, а коэффициентом пропорциональности является $\eta_{Fe} = N_i^{Fe} / C_{Fe}$ – удельная интенсивность (скорость счета в расчете на 1% железа), которая зависит от состава

пробы. Неоднозначность зависимости удельной интенсивности от состава наполнителя (так называемый матричный эффект) учитывается с помощью измерения $N_S^{НКГ}$ - интенсивности (скорости счета) некогерентно рассеянного на пробе характеристического излучения анода рентгеновской трубки. Отношение скорости счета на аналитической линии железа (N_i^{Fe}) и скорости счета некогерентно рассеянного пробой излучения ($N_S^{НКГ}$) при малых содержаниях анализируемого элемента практически однозначно зависит от содержания железа в пробе, независимо от наполнителя.

С ростом содержания железа начинает проявляться эффект избирательного поглощения первичного и рассеянного излучений, вследствие чего аналитический параметр $R_i = \eta_{Fe} / N_S^{НКГ}$, который при низких концентрациях анализируемого элемента был постоянной величиной, начинает возрастать и практически линейно коррелирует с интенсивностью аналитической линии:

$$R_I = R_I^0 + \beta \cdot N_i^{Fe}, \tag{1}$$

где $R_I^0 = K_{CO}^{-1} = N_i^{Fe} / C_{Fe}(N_S^{НКГ} - N_S^0)$ – величина, обратно пропорциональная коэффициенту, определяемому по стандартным образцам (СО) с низким значением C_{Fe} (% масс.); β – угловой коэффициент прямой, аппроксимирующей зависимость $R(N_i^{Fe})$; N_S^0 – константа спектрометра.

Для определения железа из (1) получаем:

$$C_{Fe} = \frac{N_i^{Fe}}{N_S^{НКГ} - N_S^0} \times \frac{1}{K_{CO}^{-1} + \beta \cdot N_i^{Fe}}. \tag{2}$$

Однозначность зависимости $N_i^{Fe} / N_S^{НКГ}$ от содержания железа сохраняется также и при наличии в пробах в заметных количествах мешающих элементов с краями поглощения между аналитической линией *FeKa1* и линией сравнения, что обусловлено эффектами избирательного поглощения и возбуждения. При анализе алюминиевых сплавов такими элементами для железа являются Mn, Ni, Cu, Zn.

Общая форма уравнения для определения содержания железа по способу стандарта – некогерентно рассеянного излучения примет вид

$$C_{Fe} = \frac{N_i^{Fe}}{N_S^{НКГ} - N_0} \times \frac{1}{K_{CO}^{-1} + \beta \cdot N_i^{Fe} + \sum_M \beta_M \cdot N_M}, \tag{3}$$

где N_i^{Fe} —— скорость счета на аналитической линии FeKa1; N_M – скорости счета на линиях мешающих элементов; β_M – коэффициент влияния мешающих элементов.

Для практической реализации приведенного общего уравнения в каждой пробе требуется измерять кроме интенсивностей аналитической линии N_i^{Fe} и стандарта сравнения $N_S^{НКГ}$, скорости счета на линиях мешающих элементов.

Необходимо отметить, что величина флуоресценции связана не только с концентрациями элементов, входящих в состав анализируемого образца, но и с условиями возбуждения флуоресценции: спектральным составом первичного излучения и геометрическими факторами. Для обеспечения большей эффективности анализа необходимо правильно выбрать условия возбуждения, обеспечивающие максимальное значение флуоресценции при минимальном значении фона.

При использовании предложенной методики нет необходимости определять состав наполнителя (по измерениям аналитических линий основных его компонентов). Составляется физически обоснованное универсальное уравнение (3), достаточно удобное для расчетов, вид которого не зависит от состава наполнителя и агрегатного состояния вещества. Возможность применения уравнения (3) проверена для всех информативных элементов на образцах алюминиевых сплавов группы Al-Si-Cu с различными вариантами состава.

Для реализации методики экспрессного рентгеноспектрального флуоресцентного анализа алюминиевых сплавов использовался кристалл-дифракционный всеволновый

вакуумный сканирующий спектрометр «MagiX» фирмы «PHILIPS Analytical X-Ray» (Нидерланды) с родиевым анодом. Пробоподготовка заключалась в отделении образца необходимого размера от отливки или готового изделия и последующем шлифовании одной из его поверхностей на абразивном круге с крупностью зерен 200 меш (0.074 мкм).

Для последующей метрологической аттестации предложенной методики были определены основные аппаратурные метрологические параметры: предел обнаружения (по критерию Кайзера) [2] и воспроизводимость результатов измерений. Расчет метрологических параметров проводился по методике с использованием одного стандартного образца. Для оценки аппаратурной воспроизводимости находили среднее квадратическое отклонение по результатам десятикратных измерений интенсивности аналитических линий информативных элементов и сравнивали с допустимыми значениями для III категории анализа. Результаты расчетов метрологических параметров приведены в таблице.

Элемент	Содержание, %	Предел обнаружения, 10^{-4}%	воспроизводимость, %	
			Полученное значение	Допустимое значение
Cu	3,11	0,7	0,38	11
Mg	0,53	3	3,32	9
Fe	0,55	1,1	0,33	13
Mn	0,34	1,1	0,6	8
Si	4,87	1,4	1,16	17

Таблица. Результаты расчета метрологических параметров

Приведенные данные показывают, что полученные значения аппаратурной воспроизводимости значительно меньше допустимых значений. Таким образом, можно считать, что современная рентгенофлуоресцентная аппаратура при анализе алюминиевых сплавов вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к внутрилабораторному контролю состава вещества, и может быть рекомендована при разработке аттестованных методик экспрессного контроля состава алюминиевых сплавов.

Литература

1. Буданова Л. М., Володарская Р. С., Канаев Н. А.. Анализ алюминиевых и магниевых сплавов. М.: Металлургия, 1966.
2. Бахтиаров А. В. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ в геологии и геохимии. Л.: Недра, 1985.
3. Рентгенофлуоресцентный анализ / В. П. Афонин, Н. И. Комяк, В. П. Николаев, Р. И. Плотников. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991
4. Строганов Г. В., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б. Сплавы алюминия с кремнием. М.: Металлургия, 1977.
5. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. / 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСИС, 2001.
6. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник / С. Г. Алиева, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1984.
7. Коробейникова Л. П. Разработка и внедрение комплекса рентгенофлуоресцентных методов при горноразведочных и горно-эксплуатационных работах на редкометальных месторождениях Восточного Забайкалья: дисс. на соиск. уч. степени к.г.-м.н. Л.: ЛГУ, 1989.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Т.С. Никольская

На базе линейной механики разрушения обоснован неразрушающий экспресс-метод определения пороговой нагрузки и остаточного ресурса для металлов.

При зарождении микротрещин или при скачкообразном развитии магистральной трещины освобождается динамически потенциальная энергия деформации частично разгруженного объема, которая расходуется не только на образование новой поверхности, но и на пластическую деформацию перед вершиной трещины, на колебания вновь образовавшейся поверхности, а также на другие сопутствующие процессы. В частности, зарегистрирована эмиссия электронов с поверхности деформируемых металлов и излучение электромагнитных волн при нагружении силикатного стекла. Пластическая деформация перенапряженных объемов вызывает локальный разогрев и эмиссию тепла из зоны разрушения. Колебания вновь образовавшейся поверхности инициируют акустический импульс длительностью от десятых до десятков миллисекунд. Каждый импульс, многократно отражаясь от поверхностей изделия и постепенно рассеиваясь на неоднородностях материала, создает акустический сигнал, который в виде волн напряжений регистрируют на поверхности изделия как акустическую эмиссию.

Интенсивность этих эмиссий позволяет судить о фазе разрушения и о его кинетике, что используют для оценки прочности и остаточного ресурса изделия; причем точность этих оценок оказывается значительно выше, чем точность косвенных методов контроля прочности. Чувствительность эмиссионных методов также на порядок выше, чем у других неразрушающих методов, и позволяет обнаружить зарождение или развитие дефекта размером 1 мкм. Кроме того, эмиссионные методы позволяют локацией определить координаты слабого звена без сканирования изделия. В настоящее время в силу исторических причин наиболее разработаны методы регистрации акустической эмиссии (АЭ). Они же чаще других эмиссионных методов используются для контроля разрушения и прочности.

Обычно АЭ регистрируют с помощью пьезопреобразователя, установленного на поверхности изделия и имеющего с ним акустический контакт через слой смазки, жидкости или через волновод. Электрический сигнал преобразователя усиливается, регистрируется и анализируется акустико-электронной системой, которая сильно искажает параметры сигнала. С учетом этого более перспективным, хотя и менее разработанным, является способ регистрации АЭ оптически, т.е. с помощью лазера.

Основной показатель регистрирующей аппаратуры – уровень ее собственных шумов, приведенный к входу усилителя; у современных акустико-электронных систем этот уровень составляет 2–30 мкВ. От собственных шумов аппаратуры отстраиваются с помощью ее узла-дискриминатора, настраиваемого так, чтобы при свободно подвешенном преобразователе (без акустического контакта с твердым телом) аппаратура не регистрировала каких-либо сигналов, в том числе и электромагнитных наводок.

Акустико-электронная система регистрирует общее число N акустических сигналов, количество их в единицу времени – активность АЭ $\dot{N}$, а также информацию об амплитудах сигналов и о вероятностном распределении этих амплитуд. При наличии нескольких каналов возможно определение координат источника АЭ по запаздыванию сигналов разных каналов. Амплитуда сигнала сильно зависит от расстояния между источником АЭ и датчиками. Активность же $\dot{N}$ АЭ определяется числом событий в единицу времени, в частности, интенсивностью микрорастрескивания или скоростью роста магистральной трещины и по этой причине содержит больше информации о процессе разрушения. К сожалению, $\dot{N}$ микрорастрескивания часто маскирует $\dot{N}$ наиболее

опасного дефекта, и частотный спектр сигнала АЭ зависит от модуля упругости материала и от частоты резонатора, т.е. от размеров микрополости, у границы которой инициирован сигнал. Материал с относительно крупными полостями (древесина, бетон и т.д.) при нагружении издает слышимый звук, а материал с более мелкими дефектами – ультразвук. При деформации керамики наибольшее количество сигналов регистрируют резонансные преобразователи с частотой 20–200 кГц, а при деформации сплавов – резонансные преобразователи с частотой 200–2000 кГц. Изменение размеров резонатора, например трещины, или разрыхление материала приводят к изменению частотного спектра АЭ сигнала.

Один из первых исследователей А.Э. Кайзер обратил внимание (1953 г.) на следующую особенность, получившую название эффекта Кайзера: при повторном нагружении изделия АЭ возникает лишь после превышения максимальной нагрузки L предыдущего нагружения. Обусловлено это тем, что микропластические деформации, необходимые для микрорастрескивания, рассредоточенного или в зоне с радиусом-вектором ρ перед вершиной трещины, возникают уже при первом нагружении, а при повторном нагружении не развиваются при $L \leq L_{макс}$. Однако, если за время разгрузки и повторного нагружения изделия трещина подросла, то вместе с ее вершиной переместится и зона с радиусом ρ, который к тому же увеличится. В результате уже при $L \leq L_{макс}$ зона реализации разрушения перед вершиной трещины захватит новый объем материала, и АЭ появится при $L < L_{макс}$. Это отклонение от эффекта Кайзера используют как признак развития наиболее опасного дефекта в предшествующем нагружении.

Эффект Кайзера затрудняет оценку состояния изделия по АЭ после аварийной нагрузки $L_{ав}$, значительно превышающей эксплуатационную нагрузку $L_{эк.}$ В этом случае при контрольном нагружении АЭ отсутствует, пока $L < L_{ав}$. В то же время при $L = L_{ав}$ возможно заметное развитие опасного дефекта, снижение прочности изделия, а иногда и его разрушение при контрольном нагружении. В частности, по этой причине для оценки состояния изделия по АЭ его целесообразно нагружать до $L < L_{эк}$ и регистрировать АЭ не при нагружении, а в процессе разгрузки, когда не развиваются микропластические или пластические деформации и нет АЭ микрорастрескивания или роста опасного дефекта. Однако при разгрузке с $L \approx L_o$ (где L_o – пороговая или максимальная неразрушающая нагрузка) трещина перестает закрываться еще до полного снятия нагрузки. Этот эффект, обнаруженный Эльбером в 1978 г., получил название «закрытие трещины». Вызван он тем, что при $L \approx L_o$ старту трещины предшествуют микропластические деформации перед фронтом трещины, которые при разгрузке приводят к несовпадению микрорельефа поверхностей трещины у вершины. Это несовпадение вызывает шумы трения («зубной скрежет») перед окончанием разгрузки [1]. Современная аппаратура позволяет регистрировать такие шумы и тем самым без разрушения изделия определять значение L_o изделия, даже если при его нагружении АЭ отсутствовала, например, из-за эффекта Кайзера.

В общем случае долговечность изделия определяется как сумма времени формирования трещины, способной к дальнейшему развитию, и времени ее роста до фрагментации изделия. При циклическом нагружении перед стартом трещины наблюдается эффект Эльбера – соприкосновение поверхностей у вершины трещины еще до полной ее разгрузки, а точнее - перед окончанием нагрузки. Закрытие трещины сопровождается акустическими сигналами – предвестниками старта трещины; их и использовали для оценки времени формирования трещины в образах стали 3, 45, 40Х и 12Х18Н10Т при комнатной температуре в условиях стационарного циклического растяжения от нуля до максимального напряжения $\sigma_{макс}$ или изгиба. Эффект Эльбера позволяет определить также пороговую нагрузку L_0, без превышения которой трещина не развивается, и соответствующее номинальное напряжение σ_0 [2]. С этой целью образец нагружали и

полностью разгружали, регистрируя акустическую эмиссию (АЭ) и повышая максимальную нагрузку цикла на 3% до тех пор, пока при окончании нагрузки не появлялся АЭ. АЭ регистрировали с помощью прибора АФ-15, имеющего уровень собственных шумов 15 мкВ. Резонансный пьезокерамический преобразователь (600–1000 кГц) прижимали к образцу тарированной пружины через слой смазки, улучшающей акустический контакт.

Число циклов $N_ф$, после которого первый раз была зарегистрирована АЭ при стационарном нагружении, принимали за оценку периода формирования трещины в стальном образце. Затем через каждые $N_ф$ циклов с помощью АЭ определяли пороговое напряжение σ_0, без превышения которого в процессе разгрузки АЭ не наблюдалась. Значение $\sigma_0 < \sigma_{макс}$ постепенно снижалось с увеличением числа циклов. За полную долговечность принимали число циклов N от начала испытания образца до его фрагментации. Число циклов роста трещины рассчитывали как $N_р = N - N_ф$.

Сталь	$\sigma_{макс}$	$N_ф$	N	$N_ф/N$	tg
40Х:	300_{-1}	502 226	4 185 220	0,120	0,79
	300	904 400	6 029 370	0,150	0,77
σ_{02}=800	400	150 938	1 006 250	0,150	0,75
	600+	17 683	98 240	0,180	0,73
$\sigma_в$=1100	600_{-1}	20 514	120 670	0,170	0,75
	600	45 706	240 560	0,190	0,74
δ=6%	850	2 281	11 234	0,203	0,72
	950	120	629	0,191	0,73
45:	240+	105 000	6 211 700	0,169	0,80
	240_{-1}	765 000	4 592 200	0,167	0,90
σ_{02}=320	280+	30 000	159 600	0,188	0,82
	280_{-1}	30 000	174 400	0,172	0,81
$\sigma_в$=400	280	45 000	241 600	0,186	0,81
	300	15 000	75 300	0,199	0,80
δ=9%	360	230	8 219	0,280	0,82
	380	173	524	0,330	0,72
3:	120	765 000	5 112 000	0,148	1,11
σ_{02}=200	160+	30 000	212 100	0,141	1,01
	160_{-1}	30 000	200 800	0,149	1,03
$\sigma_в$=220	160	60 000	305 300	0,196	1,06
	180	15 000	48 300	0,311	1,09
δ=30%	200	2 040	6 000	0,345	1,06
	210	117	300	0,392	1,07
12Х18Н10Т:	200_{-1}	1 305 000	4 711 000	0,277	1,70
σ_{02}=286	220+	144 000	509 800	0,283	1,73
	220_{-1}	75 000	250 900	0,299	1,64
$\sigma_в$=588	220	105 000	316 307	0,338	1,67
	250	30 000	88 333	0,340	1,67
δ=78%	502	1 517	4 335	0,349	1,62
	540	83	198	0,419	1,67

Таблица 1. Результаты циклических испытаний

Растяжение с $\sigma_{макс}$ больше предела текучести σ_m (или σ_{02}) осуществляли с периодом 18 с. При изгибе образцы испытывали с частотой 50 Гц; для определения $N_ф$ кон-

трольную разгрузку с $\sigma_{макс}$ за 10 с проводили через каждые 15000 циклов. Результаты испытаний приведены в табл. 1, где N, $N_ф$ и $N_ф/N$ – средние значения по результатам испытаний 8 образцов; напряжения σ даны в МПа, а δ – относительное удлинение после разрыва при монотонном нагружении. Индекс "-1" у некоторых значений $\sigma_{макс}$ указывает на то, что результаты получены при изгибе образцов-балочек силой посередине пролета в условиях симметричного цикла напряжения с характеристикой цикла $r = \sigma_{мин}/\sigma_{макс} = -1$. Индексом "+" отмечены значения $\sigma_{макс}$ при симметричном изгибе кольцевым пуансоном соосной пластины, опертой на кольцо (плоское напряженное состояние), знакопостоянном циклом напряжения с r =0,05. Для каждого образца рассчитали несколько значений $\sigma_{0i}/\sigma_{макс}$ и соответствующие им значения N_i/N_p , где N_i – остаточный ресурс образца после i-ой остановки для определения σ_{0i}. Экспериментальные точки, полученные таким образом для определенного режима нагружения какой-либо стали, группируются в координатах $\lg(N_i/N_p)$ и $\lg(\sigma_{0i}/\sigma_{макс})$ около прямой, тангенс угла к оси $\lg(\sigma_{0i}/\sigma_{макс})$ в таблице обозначен как tg. Для стали 40Х среднее значение этих тангенсов при различных режимах оказалось равным 1,0, для стали 45 – 0,71, для стали 3 – 0,86, а для стали 12Х18Н10Т – 1,44.

Как видно из таблицы, для исследования сталей отношение $N_ф/N$ колеблется от 0,12 до 0,42, а для конкретной стали имеет тенденцию к уменьшению с увеличением числа циклов до разрушения. В силу этого, если после известной наработки с $\sigma_{макс}$, например, гарантированного ресурса, при контроле получено $\sigma_0 > \sigma_{макс}$, то можно повторять наработку без промежуточного контроля. Если же $\sigma_0 < \sigma_{макс}$, то за $N_ф$ целесообразно принять значение $N_н$ суммарной наработки, после которой еще было $\sigma_0 > \sigma_{макс.}$ В этом случае можно считать $N = N_н(N/N_ф)$, $N_p = N - N_н = N_н(N/N_ф - 1)$ и $N_i = N_н(N/N_ф - 1)(\sigma_0/\sigma_{макс})^{tg}$, значения $N_ф/N$ и tg даны в табл. 1.

Литература

1. Бормоткин В.О., Никольский С.Г. О роли разгрузки в развитии трещин // Сб. докл. II Междунар. конф. "Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности…". СПб ГТУ,1997. С. 86–88.
2. Бормоткин В.О., Никольская Т.С., Никольский С.Г. Способ определения максимальной нагрузки, ещё не снижающей прочность изделия. // Сб. докл. II Междунар. конф. "Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности…". СПб ГТУ, 1997. С. 88–89.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЭКЗОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ – АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОМ, СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, А ТАКЖЕ СБОР И ГЕНЕРАЦИЯ ЭКЗОЭЛЕКТРОНОВ

А.О. Голубок, А.А. Дюбарев, А.К. Чуркина

В работе исследуется локальная экзоэлектронная эмиссия для последующей разработки на его основе нового метода качественной и количественной диагностики твердых образцов с использованием комбинированных методик электронной и сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии.

Введение

Экзоэлектронная эмиссия (ЭЭЭ), в изначальном определении – это испускание электронов холодной металлической поверхностью при механическом воздействии на неё. Эффект экзоэлектронной эмиссии был открыт немецким физиком И. Крамером в 40-х годах XX века. Крамером было установлено, что испускаемые электроны имеют энергию порядка одного электрон-вольта, а эмиссия после холодной обработки металла продолжается в течение нескольких часов или дней. Одно из объяснений экзоэлектронной эмиссии состоит в том, что энергия, необходимая для вылета экзоэлектрона из металла, освобождается при переходе атома из слабо связанного состояния в более сильно связанное состояние на поверхности. Это может произойти в случае изменения поверхности в результате механического (статические или динамические нагрузки) или физико-химического воздействия на неё (окисление, адсорбция, десорбция).

Для выяснения механизма экзоэлектронной эмиссии поверхность подвергают энергетическому воздействию. При этом природа воздействия может быть различной – корпускулярное или электромагнитное излучение, механические колебания, деформационные сдвиги. В этом случае освобождающиеся электроны называют вынужденными экзоэлектронами.

ЭЭЭ наблюдается и при разрушении неметаллических поверхностей, таких как гипс, кварц, пирит, флюорит, и даже на полимерных материалах [1]. ЭЭЭ используется как показатель радиационных повреждений, при исследовании развития трещин в твердых телах (особенно в ходе усталости), а также для изучения процессов адсорбции и химических реакций, протекающих на поверхности твердых тел.

До сих пор механоактивация применялась как средство дополнительной стимуляции образца при изучении термо- и фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии [2]. При этом механоактивация носила исключительно интегральный характер (например, воздействие на поверхность абразивом) – результаты такого воздействия являются усредненными по большой площади. Это воздействие неконтролируемо и, как следствие, невоспроизводимо. Поэтому локализация воздействия и реализация возможности контроля его параметров (площади контакта, силы воздействия), а также их использование для анализа и диагностики поверхности представляют собой большой интерес. Для реализации этого проекта был выбран сканирующий силовой микроскоп, который дает возможность осуществить локальный контакт (с помощью остро заточенного острия) и имеет обратную связь, которая позволяет не только количественно описать параметры контакта, но и поддерживать их постоянными, обеспечивая, таким образом, контроль за воспроизводимостью воздействия.

Процессы контроля силы локального воздействия зонда на образец, а также регистрации результата этого воздействия являются достаточно трудоемкими. Для их осуществления необходима сложная установка, юстировка которой в настоящее время ведется в лаборатории сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии Института аналитического приборостроения при Российской Академии наук.

Одной из главных частей данной установки является модуль генерации и детектирования экзоэлектронов, возникающих при локальном механическом воздействии на поверхность твердого тела. Модуль генерации и детектирования экзоэлектронов представляет собой обычный сканирующий силовой микроскоп, несколько видоизмененный под конкретную задачу – а именно, для получения экзоэлектронов при постукивании зондом по образцу. Во избежание ложного срабатывания системы детектирования экзоэлектронов, а также для возможности контроля зонда и выбора участка поверхности для сканирования этот модуль помещается в высоковакуумную камеру электронного микроскопа. Камера мала по габаритам, и стандартные сканирующие зондовые микроскопы в нее не помещаются. Кроме того, для детектирования как можно большего количества экзоэлектронов детектор электронов должен располагаться как можно ближе к образцу. В связи с этим конструкция силового микроскопа приняла вид, представленный на рис. 1. Система позиционирования образца состоит из пьезостолика 5, на котором с помощью подставки 6 крепится образец 9, и инерционного пьезодвижителя 3, который осуществляет перемещение образца. На этом пьезодвижителе при помощи стойки 4 и крышки 8 крепится датчик 7 с пьезотрубкой, в которую вставлен зонд. На корпусе пьезостолика 1 закреплен кронштейн 2 для крепления вторично–электронного умножителя 10.

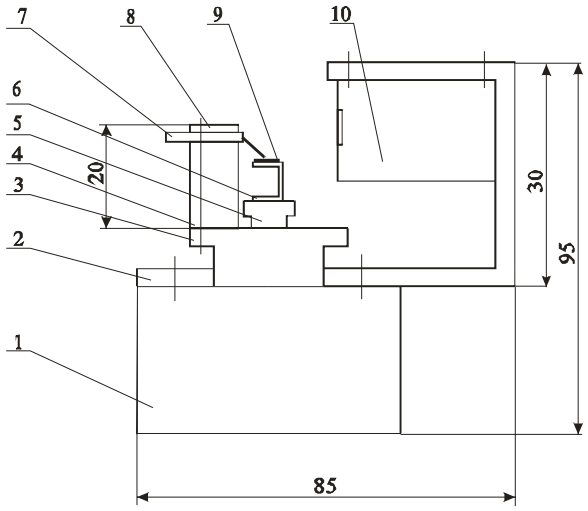


Рис. 1. Схема модуля генерации и детектирования экзоэлектронов

При выборе формы и размеров деталей для крепежа датчика и вторично–электронного умножителя учитывалось несколько факторов. Во–первых, небольшие размеры камеры электронного микроскопа. Во–вторых, расположение всех деталей модуля друг относительно друга. Кроме того, необходимо было учесть, что к датчику локального силового взаимодействия, вторично–электронному умножителю и пьезодвижителям необходимо подводить управляющее напряжение, следовательно, необходимо скомпоновать детали между собой так, чтобы осталось место для крепления разъемов и проводов. Исходя из этих требований, были разработаны чертежи деталей крепежа, по которым они и были изготовлены.

Сканирующий силовой микроскоп может работать в трех режимах: контактном, бесконтактном и полуконтактном. В контактном режиме зонд упирается в образец и отталкивается от него. В бесконтактном режиме зонд удален от поверхности и находится в области действия притягивающих сил. В полуконтактной моде зонд постукивает по поверхности, находясь как в области сил притяжения, так и в области сил отталкивания. Каждый из этих режимов обладает рядом преимуществ и недостатков. Контактный режим наиболее удобен с точки зрения детектирования силового взаимодействия, однако при этом происходит разрушение как поверхности образца, так и самого

зонда. В бесконтактном режиме разрушение отсутствует, однако малы измеряемые сигналы. Поэтому наиболее часто в силовой микроскопии используется полуконтактный режим, при котором вследствие кратковременности контакта воздействие зонда на поверхность минимально, а измеряемые сигналы достаточны для их надежного детектирования. По этим причинам для эксперимента был выбран именно полуконтактный режим работы сканирующего силового микроскопа.

Большое влияние на получение экзоэлектронов при локальном механическом воздействии на образец оказывает качество зонда, а точнее, его аппаратное разрешение (соотношение длины зонда с его толщиной). Зонд не должен быть заостренным, так как при этом он оказывается недолговечным – происходит его быстрое затупление. В то же время зонд не должен быть и тупым, так как при этом увеличивается площадь контакта «зонд – образец». Из–за этого происходит уменьшение количества передаваемой энергии на единицу площади контакта, и энергии для вылета экзоэлектронов может оказаться недостаточно.

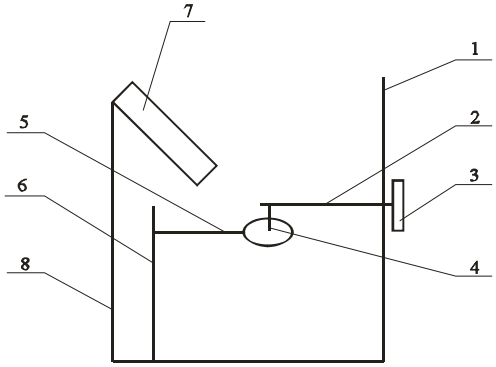


Рис. 2. Схема установки для травления зондов

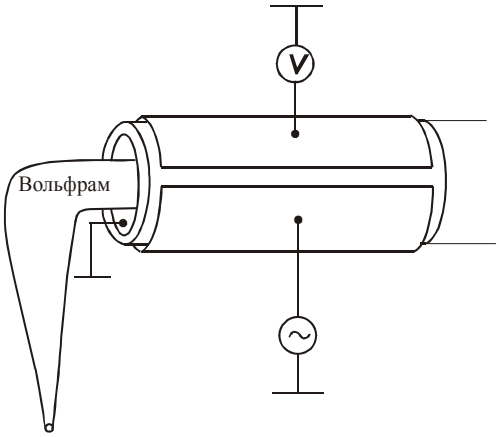


Рис. 3. Пьезокерамический сенсор

Установка для изготовления зондов представлена на рис. 2. Заточка острия производится методом электрохимического травления. Кольцо из золотой проволоки опускают в пятипроцентный раствор гидроксида натрия NaOH или калия KOH. За счет поверхностного натяжения капля раствора удерживается в кольце, в которое на штативе опускают заготовку для зонда. Контроль глубины погружения заготовки в каплю раствора производится с помощью обычного оптического микроскопа. Далее между заготовкой и кольцом пропускают ток. По окончанию травления зонд промывают водой, просушивают, после чего он готов к использованию. Датчиком положения зонда служит пьезокерамический сенсор, схема которого представлена на рис. 3. На этот сенсор нанесены два электрода. На один электрод подается синусоидальное напряжение с час-

тотой, близкой к резонансной частоте сенсора. Это напряжение производит раскачивание сенсора с амплитудой в несколько нанометров. Со второго электрода снимается сигнал, пропорциональный амплитуде колебаний сенсора.

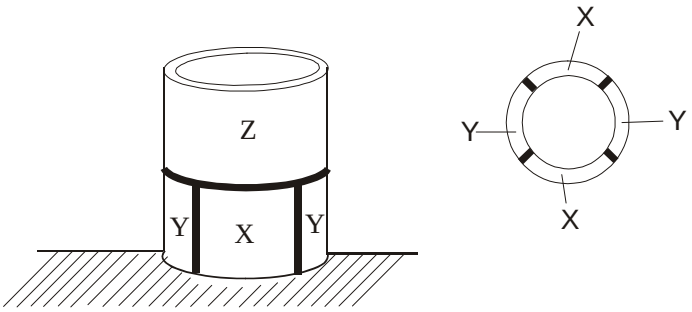


Рис. 4. Пьезокерамический сканер

Для перемещения образца используется пьезокерамическое сканирующее устройство (рис. 4). Пьезокерамическая трубка, из которой состоит устройство, при подаче напряжения может изгибаться по осям *X* и *Y*, а также удлиняться и сокращаться по оси *Z*.

Использование модуля генерации и детектирования потребовало создания специальной схемы управления и автоматизации исследований. Также потребовалось создать ряд переходников для совмещения макета модуля с вакуумной камерой электронного микроскопа. На рис. 5 приведена блок–схема макета устройства для автоматизации исследования локальной экзоэлектронной эмиссии на базе сканирующего силового микроскопа, совмещенного с электронным микроскопом и вторично–электронным умножителем, включенным в канал измерения экзоэлектронов.

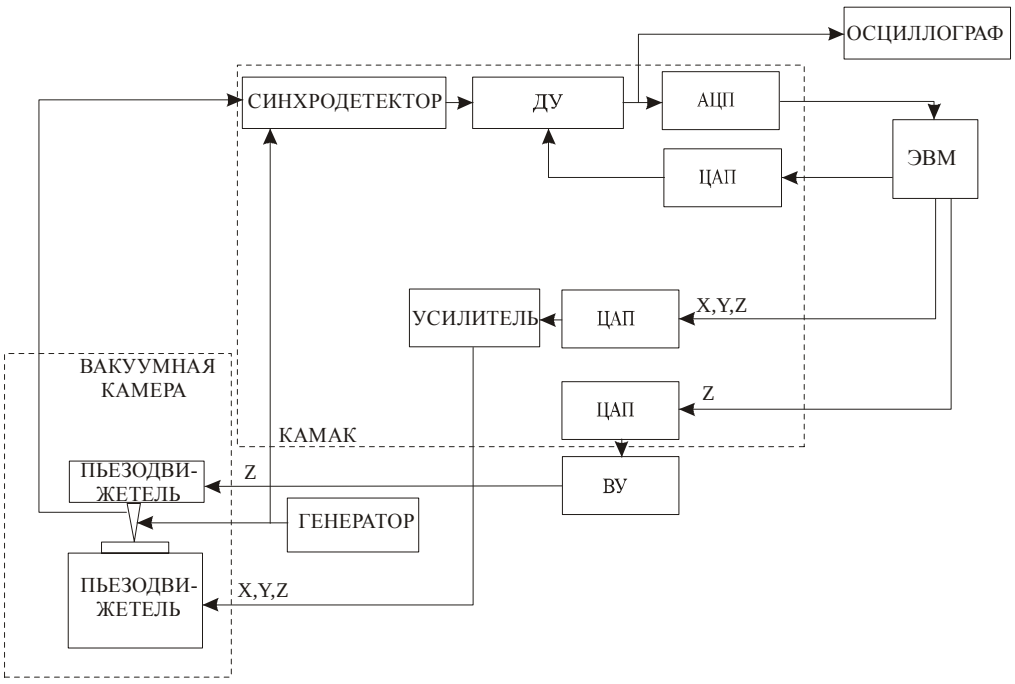


Рис. 5. Устройство автоматизации

С генератора на сенсор поступает синусоидальный сигнал, по частоте близкий к резонансной частоте сенсора. Это приводит к колебаниям сенсора на данной частоте. С сенсора сигнал поступает на синхродетектор, который выдает амплитуду поступающе-

го сигнала на частоте, задаваемой генератором. Далее амплитуда, в виде напряжения, поступает на дифференциальный усилитель, на второй вход которого подается опорный сигнал, пропорциональный силе взаимодействия зонд–образец (этот сигнал задается заранее с помощью персонального компьютера). Результат поступает на осциллограф для контроля, и через АЦП – в компьютер для обработки.

Связь с персональным компьютером осуществляется при помощи интерфейса КАМАК. КАМАК представляет собой модульную систему, предназначенную для связи измерительных устройств с цифровой аппаратурой обработки данных (в большинстве случаев его роль выполняет компьютер). Интерфейс КАМАК позволяет управлять устройствами, находящимся на одной шине с контроллером, который принимает команды от персонального компьютера и интерпретирует их в команды, понятные устройству. Интерфейс КАМАК представляет собой относительно недорогую и гибкую систему, что является достаточно веским основанием для его использования. Персональный компьютер по поступившему сигналу подает через ЦАП управляющие импульсы на пьезодвижители.

Сканирующий силовой микроскоп работает в двух режимах: режиме захвата взаимодействия и режиме сканировании. В режиме захвата взаимодействия персональный компьютер выдает управляющие сигнал на пьезодвижитель грубого сближения, сигнал представляет собой пилообразный импульс, благодаря которому пьезодвижитель сначала вытягивается, а затем резко сокращается. Результирующие шаги – 50–100 нм. После каждого шага пьезодвижитель сканирования вытягивается на полную длину для захвата взаимодействия. Управление пьезодвижителем сканирования осуществляется последовательным плавным увеличением и уменьшением напряжения. Если захват не произошел, пьезодвижитель сканирования втягивается обратно и делает следующий шаг. В режиме сканирования работает только пьезодвижитель сканирования, который под управлением персонального компьютера удерживает взаимодействие постоянным. Картина топографии поверхности строится на основе сигнала от дифференциального усилителя.

Для исследования экзоэлектронной эмиссии использовался режим сближения. На дифференциальном усилителе выставляется значение, заведомо большее, чем может получиться в результате взаимодействия. Такой прием позволяет нанести удар, достаточно сильный для получения экзоэлектронов.

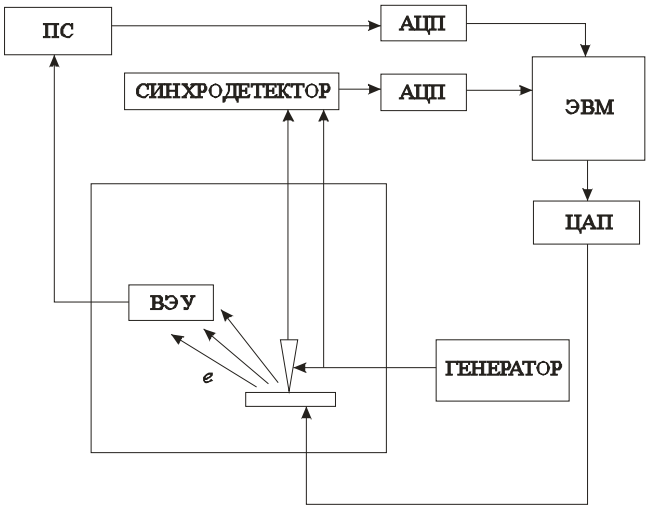


Рис. 6 Блок-схема установки для исследования локальной экзоэлектронной эмиссии

Для чистоты эксперимента и уменьшения шумов модуль генерации и детектирования помещается в вакуумную камеру электронного микроскопа. Фотоэлектронный умножитель электронного микроскопа дает возможность регистрировать экзоэмиссию. Электронный микроскоп используется также для выбора участка сканирования и контроля качества зонда. Схема разработанной установки приведена на рис. 6 [3].

Серия экспериментов, проведенных на макете, позволила построить алгоритм получения локальной экзоэлектронной эмиссии, представленный на рис. 7.

Результат работы алгоритма в виде эмиссии приведен на рис. 8. До появления взаимодействия между зондом и образцом регистрируются только шумы. В момент появления взаимодействия на изображении сигнала возникает резкий всплеск, свидетельствующий о появлении экзоэлектронов и вылете их из образца. После прекращения экзоэмиссии система возвращается в исходное состояние.

Рис. 7 Алгоритм проведения эксперимента

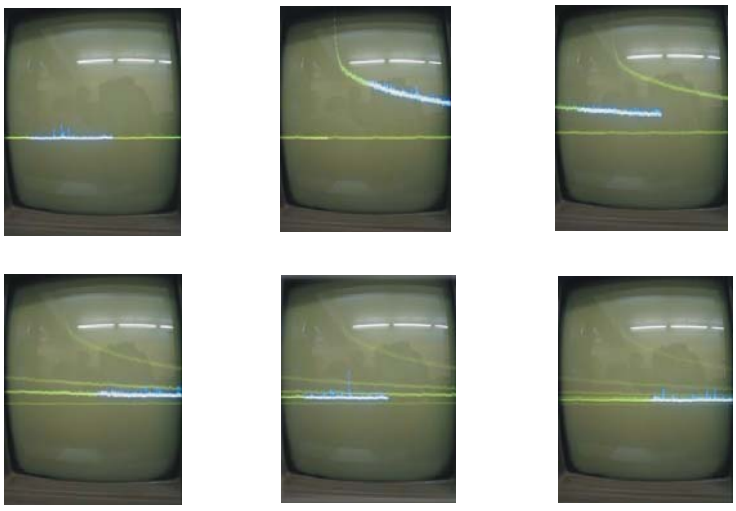


Рис. 8. Результат эксперимента

Заключение

Полученные результаты первичных экспериментов демонстрируют работоспособность установки и позволяют надеяться, что при дальнейших исследованиях, с использованием вторично–электронного умножителя и пересчетной схемы для передачи данных в персональный компьютер, будет зарегистрирован экзоэлектронный спектр. В дальнейшем планируется разработка нового высокоточного метода определения качественного и количественного состава образца, для чего перед вторично–электронным умножителем будет установлен энергоанализатор, включенный по схеме задерживающего потенциала.

Литература

1. Магонов С.Н. Сканирующая силовая микроскопия полимеров и родственных материалов. // Высокомолекулярные соединения. 1996. Т. 38. №1. С.143–182.
2. Клюев В.А., Кутузова О.А., Ревина Е.С., Топоров Ю.П. Влияние механоактивации на экзоэмиссионные свойства активированного угля. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. №5. С. 32–35.
3. Голубок А.О., Дюбарев А.А., Керпелева С.Ю., Сапожников И.Д., Чуркина А.К. Локальная электронная экзоэмиссия как метод диагностики материалов. // Научно–технический вестник СПбГИТМО (ТУ). 2003. №9. С. 175–180.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ МИКРОФЛЮИДНЫХ ЧИПОВ

Е.В. Бородина, А.А. Евстрапов, Е.А. Лизоркина

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется разработке современного аналитического оборудования, в основе которого лежит так называемая концепция построения «лаборатории на чипе» («lab-on-a-chip» или «μ-TAS» - micro-Total Analytical System), разработанная в 1990–1993 гг (Manz A., Harrison D.J., Ramsey J.M.). Сущность ее заключается в том, что все аналитические операции с образцом, включая дозирование (в объеме нано- и пико- литров) и подготовку пробы, смешивание с реагентами, химические реакции, разделение полученного продукта и детектирование, производятся на компактном устройстве – микрочипе (микрофлюидном чипе). Возможности создания микроканалов произвольного профиля, любой топологии и пространственного расположения, встраивания различных типов микрореакторов, насосов, фильтров, напыление электродов позволяют управлять потоками веществ, реализовать многостадийные аналитические реакции [1–6]. Методы получения микрочипов разнообразны и достаточно подробно изложены в [7–9].

Подобные микрофлюидные аналитические системы (МФАС) построены с использованием современных высокотехнологичных и «наукоемких» элементов микроэлектроники, оптики, гидравлики, пневматики и теплотехники. Можно отметить следующие тенденции развития микрофлюидных чипов (МФЧ): создание полимерных МФЧ, как правило, однократного применения [10], создание стеклянных МФЧ многократного применения [11, 12] и создание гибридных МФЧ с относительно невысокой стоимостью (например, полидиметилсилоксан-стеклянных [13]).

Результаты анализа на МФЧ могут регистрируются с помощью высокочувствительных системам детектирования (электрохимическими, фотометрическими, флуориметрическими и др. [14]) – как специально разработанными для МФЧ, так и универсальными (например, микроскопами с устройствами анализа изображений).

Бесспорными преимуществами микрофлюидных аналитических систем по сравнению с классическими аналогами являются: сверхмалый объем анализируемой пробы и расход реагентов, резкое сокращение времени проведения анализа, высокая селективность и чувствительность, возможность полной автоматизации всех этапов анализа и организации замкнутого цикла при анализе.

Микрофлюидными технологиями занимаются такие известные фирмы, как Shimadzu Cor. (Япония), Agilent Technologies Inc и Caliper Technologies Inc (США), Nanogen Inc. (США), Aclara BioSciences Inc. (США), BioMicro Systems (США), Fluidigm Corporation (США), Mezzo Systems (США), Mildendo GmbH (Германия). С вышеперечисленными компаниями активно сотрудничают исследовательские центры и университеты. В настоящее время деятельность многих исследователей (например, в Harvard University) направлена на создание полимерных чипов, что позволит значительно снизить стоимость анализа и оперативно получать чипы заданной архитектуры.

Большое количество статей по микрофлюидным системам в журналах Electrophoresis, Analytical Chemistry, Analyst, Biosensors and Bioelectronics, Sensors and Actuators, Journal of Micromechanics and Microengineering, Clinical Chemistry, Luminescence, Lab on a Chip Miniaturisation for Chemistry and Biology и других свидетельствует об интересе зарубежных исследователей к МФАС.

В Институте аналитического приборостроения РАН ведутся работы по созданию аналитических приборов на основе микроразмерных устройств – микрофлюидных чипов. В результате этих работ был создан прототип МФАС, составной частью которой

является микрофлюидный чип [15]. На МФЧ осуществляется процесс электрофоретического разделения исследуемого вещества с последующим детектированием компонентов методом лазер-индуцированной флуоресценции.

Конструктивно МФЧ представляют собой канализированные (на длину несколько сантиметров) и герметично соединенные между собой пластины из кремния, стекла, кварца или пластика с травленными, выплавленными или тиснеными камерами и каналами, глубина которых составляет десятки микрон.

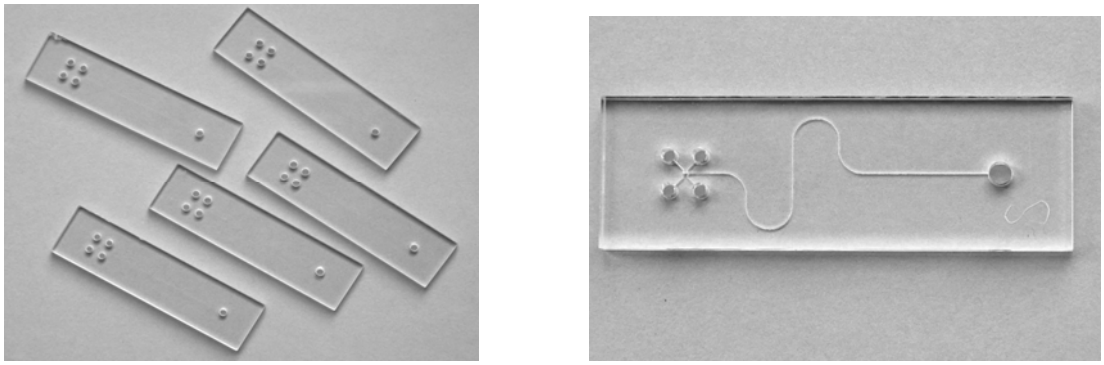
Кремниевые и стеклянные чипы обычно изготовляются стандартными методами фотолитографии и травления, заимствованными из микроэлектроники. Для изготовления полимерных чипов используются горячее тиснение, инжекционное литье, лазерная абляция (испарение материала), а также глубокая рентгеновская литография (LIGA – технологии, обеспечивающие изготовление форм для литья полимеров – изготовления пластиковых чипов) [7].

Данная работа посвящена сравнительному анализу двух методов получения МФЧ: из стекла и полимера – полиметилметакрилата (ПММА).

Микрофлюидные чипы: получение, герметизация, измерения

Одной из основных проблем при изготовлении МФЧ является проблема формирования герметичных каналов. Герметизация стеклянных МФЧ осуществляется применением специальных, нейтральных к биологическим пробам, скотчей (например, Optically Clear laminating Adhesives 8141, 8142 или аналогичных фирмы 3M, Великобритания); нанесением полимерных пленок; приклеиванием защитного стекла с помощью полимеров; методом глубокого оптического контакта и методом спекания с помощью легкоплавких стекол. Процесс герметизации каналов МФЧ из полимера осуществляется несколькими способами: применением специальных, нейтральных к биологическим пробам, скотчей; спеканием полимеров; склеиванием полимеров; применением полимерных фоторезистов; сваркой.

Стеклянные МФЧ были получены из фоторезиста ФП-617 методом фотолитографии и травления по стандартной технологии (ОАО «Светлана», Санкт-Петербург) с последующей герметизацией микроструктур методом глубокого оптического контакта с защитным стеклом марки К8 (ОАО «ЛОМО», Санкт-Петербург). Фотография стеклянного МФЧ приведена на рис. 1, а.

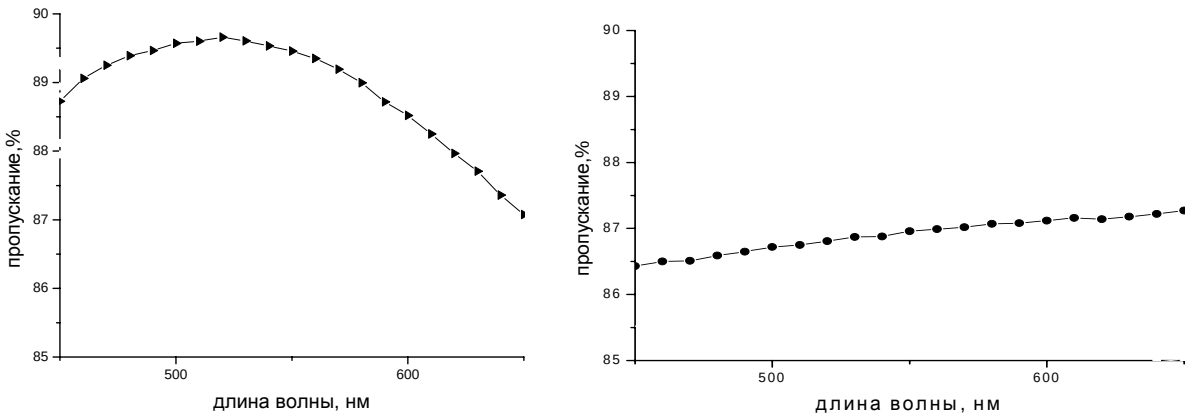


а) б)

Рис. 1. Микрофлюидные чипы: а) стеклянные; б) полимерные (ПММА)

Так как МФЧ используются с детектором лазер-индуцированной флуоресценции, то изучали оптические свойства микрочипов. Измеряли светопропускание в спектральном диапазоне 450–650 нм и уровень фоновой флуоресценции в спектральном диапазоне 480–650 нм при возбуждении на длине волны 473 нм. При измерениях использовали спектрофотометр HITACHI U-3410 и спектрофлуориметр HITACHI F-4010 (Япония).

Спектральная зависимость светопропускания МФЧ представлена на рис. 2, а. По результатам измерений определены оптические характеристики: показатель поглощения и оптическая плотность.



а) б)

Рис. 2. Спектральные зависимости светопропускания МФЧ: а) стеклянного; б) полимерного (ПММА)

Были проведены исследования поверхности и профиля микроканалов на конфокальном сканирующем лазерном микроскопе Leica. Изучалась топология канала и проводились необходимые измерения: ширины канала на поверхности пластины (79,05 мкм), ширины дна канала (54,08 мкм), отклонения по ширине канала (0,3 мкм), глубины канала (60 мкм). Исследования показали, что выбранный метод изготовления микроструктур из стеклянных материалов (фотолитографии и травления) позволяет получить структуры, обладающие требуемой чистотой поверхности и однородностью.

Полимерные (ПММА) МФЧ были получены методом лазерной абляции (Центр лазерной технологии, Санкт-Петербург) с последующей герметизацией методом спекания полимеров при температуре 102^0 С в течение 15–20 мин. Фотография ПММА МФЧ представлена на рис. 1, б.

Герметичность ПММА МФЧ проверяли неразрушающими оптическими методами. Определяли изменения оптических характеристик в зависимости от температуры спекания, затем сравнивали полученные характеристики с аналогичными для монолитного слоя. Если характеристики, полученные для МФЧ при некоторой температуре спекания, близки к соответствующим характеристикам монолитного слоя, то такая температура считалась наиболее приемлемой. Кроме того, проводили проверку герметичности МФЧ при заполнении каналов раствором флуоресцеина. В случае отсутствия герметичности наблюдалась диффузия раствора вне каналов чипа – по границе спекания. Этот эффект оценивался на оптическом микроскопе при освещении канала МФЧ с раствором флуоресцеина световым потоком в диапазоне длин волн 400-490 нм.

Воздействие температуры на профиль микроканала ПММА МФЧ изучали в диапазоне температур от 95 до 180 °С. Эксперименты показали, что профиль канала практически не изменился. Это объясняется тем, что канал сформирован методом разрушения материала под воздействием высокой температуры, поэтому поверхность канала является термоустойчивой

Для МФЧ из ПММА, как и для стеклянных МФЧ, измеряли светопропускание и уровень фоновой флуоресценции. Спектральная зависимость светопропускания МФЧ из ПММА представлена на рис. 2, б. По результатам измерений определяли оптические характеристики: показатель поглощения и оптическая плотность.

Обсуждение результатов

Полученные данные свидетельствуют о том, что светопропускание стеклянных МФЧ выше светопропускания МФЧ из ПММА, а уровень фоновой флуоресценции стеклянных МФЧ в 3–4 раза ниже чипов из ПММА.

Микроструктуры, сформированные из стекла методом фотолитографии и травления, отличаются высокой чистотой поверхности в отличие от микроструктур, полученных в ПММА методом лазерной абляции. Однако формирование микроструктур в стекле – более трудоемкий и длительный процесс, в отличие от аналогичного процесса для ПММА.

Получение стеклянных МФЧ требует использования разнопрофильных оборудования и технологических процессов (фотолитография, жидкостное травление, нанесение покрытий, глубокий оптический контакт). Все это влияет на конечную стоимость получения стеклянных МФЧ, которая оказывается в несколько раз выше стоимости ПММА МФЧ. Получение ПММА чипов методом лазерной абляции и спекания – более оперативная и дешевая процедура создания МФЧ, хотя при этом, на данный момент, получаются МФЧ более низкого качества (чистота поверхности, однородность канала и т.п.). С другой стороны, полимерные МФЧ, как правило, используются однократно (или ограниченное число раз). Стеклянные МФЧ могут быть использованы многократно для анализа веществ после процедуры промывки каналов.

Таким образом, можно констатировать тот факт, что и стеклянные, и полимерных МФЧ имеют свои преимущества и недостатки, свои области применения. Однозначно отдать пальму первенства какому-либо материалу невозможно. Скорее всего, будут развиваться и стеклянные, и полимерные МФЧ, тем более, что эти материалы находят широкое применение при анализе биологических веществ. Простота утилизации полимерных МФЧ и их дешевизна, наверное, будут существенным преимуществом этих МФЧ при анализе особо опасных инфекций и вредных веществ.

Работа выполнена при поддержке грантов Научной программы Санкт-Петербургского научного центра РАН «Аналитические приборы на основе микрофлюидных технологий (раздел 2, проект 2, 2003 г.) и Межведомственной научно-технической программа: «Вакцины нового поколения и диагностические системы будущего», «Новые принципы детекции и разработка на их основе приборов для автоматизации лабораторно-диагностических методов исследования» (ГК N43.269.11.0206, 2002-2006 гг.).

Литература

1. Reyes D.R., Iossifidis D., Auroux P-A., Manz A. Micro Total Analysis Systems// Anal. Chem. 2002. 74. P. 2623–2652.
2. Sanders G.H.W., Manz A. Chip-based microsystems for genomic and proteomic analysis // Trends in analytical chemistry. 2000. Vol. 19. №. 6. P. 364-378.
3. Dolnic V., Liu S., Jovanovich S. Capillary electrophoresis on microchip // Electrophoresis. 2000. Vol. 21. P. 41-54.
4. Khandurina J., Guttman A. Bioanalysis in microfluidic devices// Chromatography A. 2001. Vol. 924 (1-2), p. 233-238.
5. Carey L., Mitnik L. Trends in DNA forensic analysis // Electrophoresis. 2002. 23. P. 1386–1397.
6. Verpoorte E. Microfluidic chips for clinical and forensic analysis // Electrophoresis. 2002. Vol. 23. p. 677-712.
7. Chen Y., Pepin A. Nanofabrication: Conventional and nonconventional methods)//Electrophoresis. 2001. Vol. 22. P.187-207,
8. Huang Y., Mather E.L.,. Bell J.L, Madou M. MEMS-based sample preparation for molecular diagnostics// Anal. Bioanal. Chem. 2002. 372. P. 49-65.
9. Proceeding of Micro Total Analysis Systems 2000./ Ed. Van den Berg A, Olthuis W & Bergveld P.. Academic Publisher, Dordrecht: Kluwer.
10. McDonald J. Et al. Fabricaton of microfluidic systems in polydimethilsiloxane // Electrophoresis. 2000. Vol. 21. P.27–40.
11. Attiya S, Jemere A.B., Tang T., Fitzpatrick G. et al. Design of an interface to allow microfluidic electrophoresis chips to drink from the fire hose of the external environment // Electrophoresis. 2001. Vol.22. P.318–327.
12. Lichtenberg J., Verpoorte E., Rooij N.F. Sample preconcentration by field amplification stacking for microchip-based capillary electrophoresis // Electrophoresis. 2001. Vol.22. P.258–271.
13. Hong J.W., Fujii T., Seki M., Yamamoto T., Endo I. Integration of gene amplification and capillary gel electrophoresis on a polydimethylsiloxane-glass hybrid microchip// Electrophoresis. 2001.Vol.22. P.328-333.
14. Swinney K., Bornhop D.J. Detection in capillary electrophoresis// Electrophoresis. 2000. Vol.21. P.1239-1250.
15. Евстрапов А.А., Беленький Б.Г., Курочкин В.Е., Суханов В.Л., Поздняков О.Ф., Буляница А.Л., Филимонов В.В. Микрофлюидные аналитические системы на основе электрофоретических методов анализа // Новости науки и техники. Серия Медицина. Аллергия, астма и клиническая иммунология. 2001. № 1. С.190-193.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ MATLAB ДЛЯ АНАЛИЗА МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРОВ

В.А. Валетов, А.В. Терещенко

Задача анализа микрогеометрии поверхностей деталей приборов или машин является весьма важным этапом при ее оптимизации для конкретных функциональных или эксплуатационных свойств. Анализируя микрогеометрии поверхностей, обработанных на различном оборудовании и режимах, и сопоставляя параметры микрогеометрии с параметрами полученных для конкретной детали функциональных свойств, мы имеем возможность подобрать наилучший по достигаемому уровню функционального или эксплуатационного свойства – из реально применимых в условиях конкретного производства – метод обработки поверхности детали.

Оптимизация микрогеометрии поверхностей – один из немногих практически осуществимых в настоящее время способов повышения качества изделий. Традиционные методы, такие как, например, использование новых материалов или повышение точности изготовления, либо неспособны удовлетворить объем запросов массового или крупносерийного производства, либо подошли к порогу экономической целесообразности своего применения. Микрогеометрия же, как давно и убедительно доказано, влияет на большое количество, минимум двадцать, функциональных и эксплуатационных свойств изделий. При этом сейчас фактически не используется возможность ее оптимизации, а значит, повышения уровня конкретных функциональных или эксплуатационных свойств.

В настоящее время применение ЭВМ позволяет значительно расширить возможности анализа микрогеометрии. ЭВМ позволяет, наряду с быстрым и точным расчетом любых параметров профиля, визуализировать и использовать непараметрические критерии анализа микрогеометрии, такие как функции и плотности распределения ординат и функции и плотности распределения тангенсов углов наклона профиля, каждая из которых содержит достаточно полную информацию об отклонениях профиля. [2]

В общем случае микрогеометрия поверхности зависит от многих факторов (режимы резания, качество режущего инструмента, исходные свойства заготовки и т.д.), поэтому её следует рассматривать как реализацию случайного профиля, тогда профиль реальной поверхности есть реализация случайной функции. [1]

Следует заметить, что наиболее полную информацию о профиле содержат плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона, а для приближённой оценки вполне достаточно функций распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей. Для проведения такого рода анализа на ЭВМ необходимо специальное программное обеспечение, примером которого является среда MATLAB компании MathWorks.

Сам производитель позиционирует MATLAB как высокопроизводительный язык для технических вычислений, который объединяет средства вычисления, виуализации и программирования в одну простую в использовании среду. Задачи и решения выражаются в ней в привычной математической нотации. MATLAB – это интерактивная система, базовым элементом данных в которой является массив, причем задание его размеров не требуется. Это позволяет решать многие задачи технических вычислений, в особенности те, которые формулируются в терминах матриц и векторов, за намного меньшее время, чем то, которое потребовалось бы на написание программы с использованием таких неинтерактивных скалярных языков, как С или Фортран.

Для анализа были взяты данные (см. рис. 1), полученные на ИВК «Профиль», включающем в себя стандартный прибор измерения шероховатости Калибр-250 и интерфейс связи прибора с IBM-совместимым компьютером.

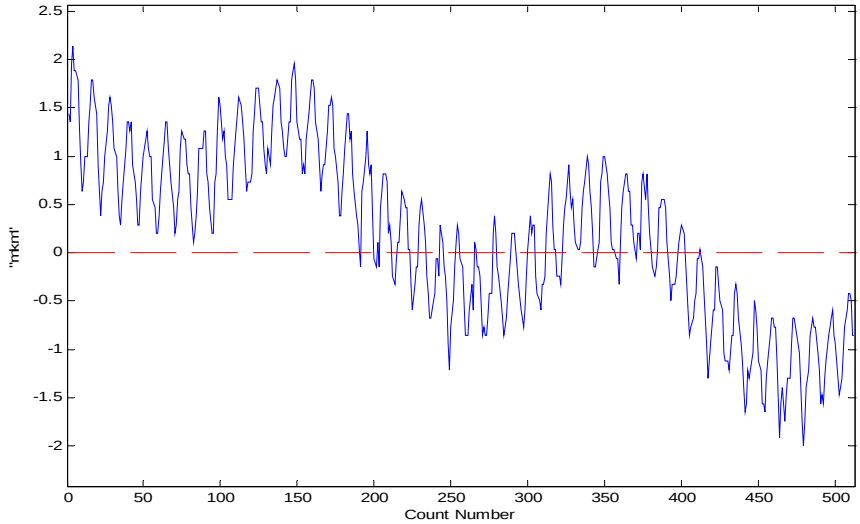


Рис. 1. Профиль поверхности, полученный на ИВК «Профиль»

Следует отметить, что данный доклад отражает состояние проекта по разработке программного продукта, предназначенного для обработки и анализа профилей микрогеометрии поверхностей при помощи ЭВМ. Так как проект еще не завершен, то в программу не введены коэффициенты пересчета уровней сигналов, получаемых с прибора и регистрируемых компьютером, в микрометры. Тем не менее, достоверность представленной информации не снижается, так как эти коэффициенты влияют лишь на абсолютные значения величин, но не на структуру их плотностей и функций распределения.

На данном этапе проекта с применением встроенного языка среды MATLAB уже созданы программные модули, реализующие подпрограммы расчета и визуализации базовых для непараметрического подхода к анализу микрогеометрии характеристик – плотности и функции распределения ординат профиля (рис. 2, 3), а также плотности и функции распределения его тангенсов углов наклона.

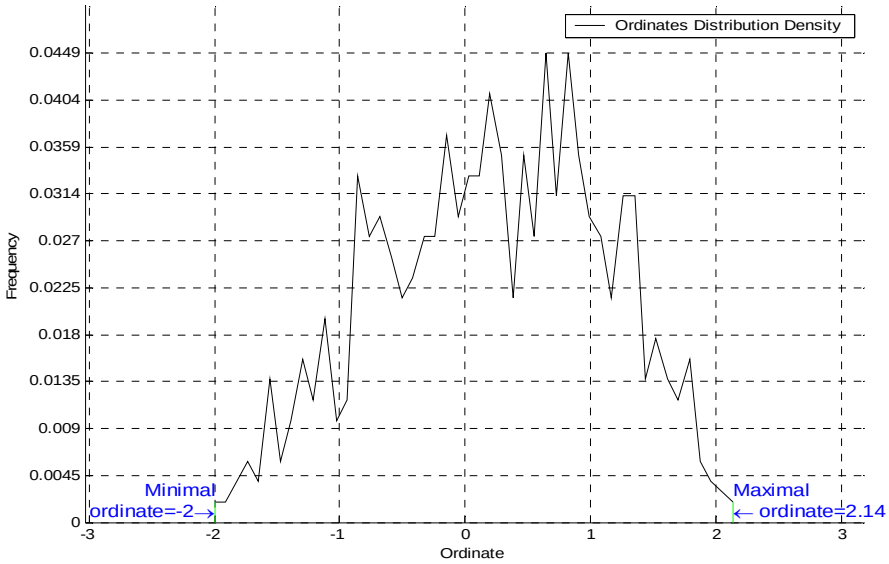


Рис. 2. Плотность распределения ординат профиля

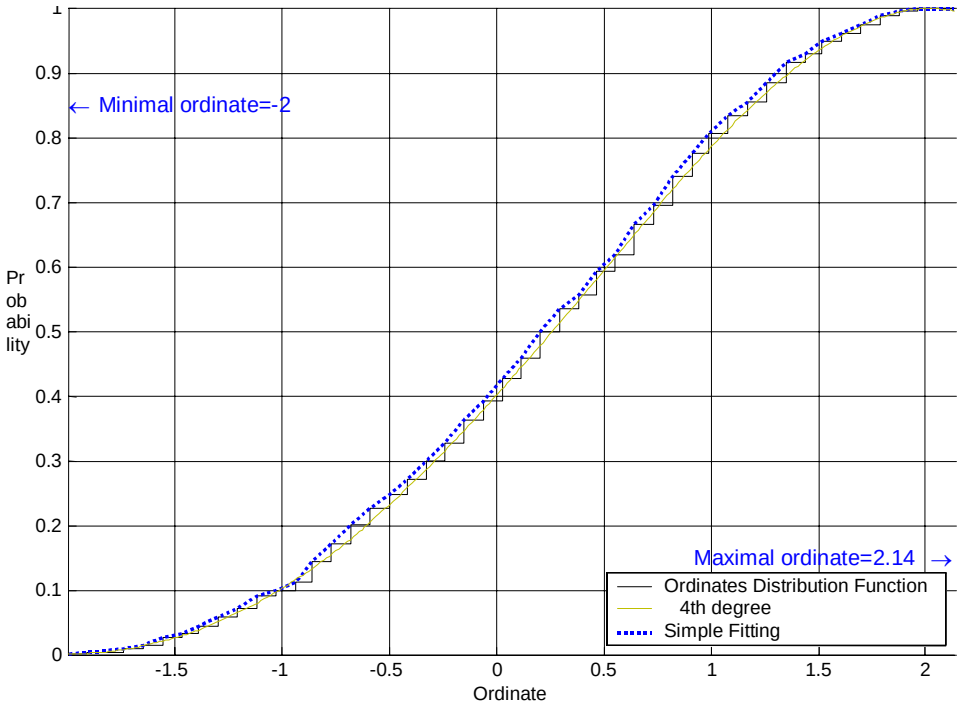


Рис. 3. Функция распределения ординат профиля, а также варианты сглаживания: простое и полиномиальное.

Кроме расчета и визуализации этих характеристик, возможно их сглаживание при помощи одного из трех методов: кусочно-кубического интерполяционного полинома Эрмита, кубического сплайна, полинома 4-й – 10-й степеней (рис. 4, 5).

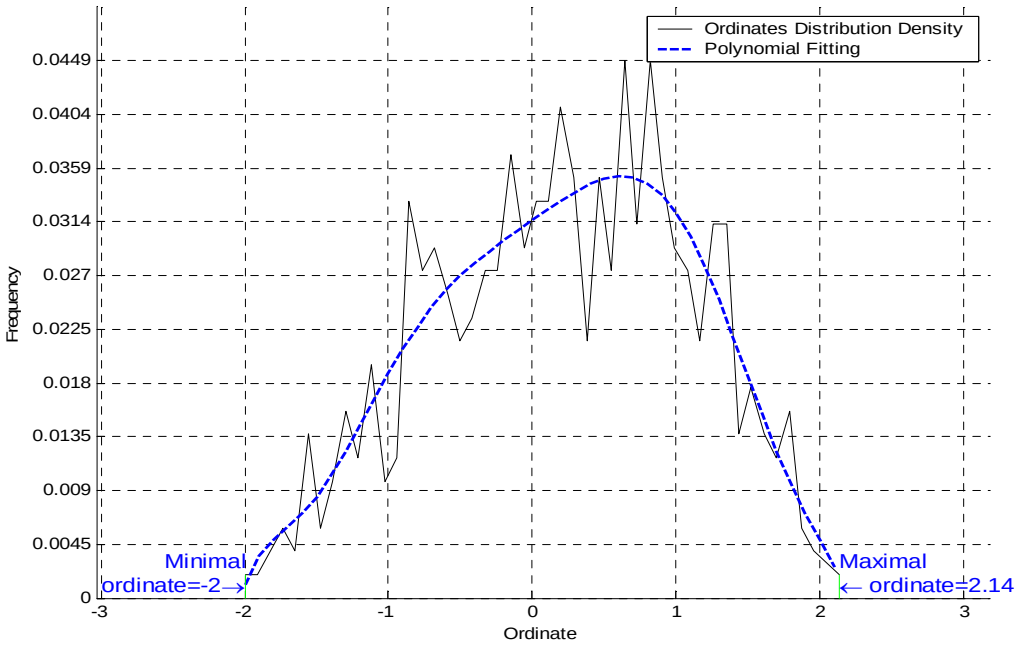


Рис. 4. Сглаживание плотности распределения ординат профиля при помощи полинома 8-й степени

В дальнейшем будут реализованы такие функции, как расчет стандартных параметров Ra, Rz, Rq, Rmax, Sm, S, и t_p, фильтрация отклонений формы исследуемой поверхности, а также шумов при помощи преобразования Фурье. Смысл преобразования

заключается в том, что после преобразования мы получаем амплитудный спектр, по которому можно точно определить частоту и амплитуду любой гармоники и оценить, к какому виду отклонений (отклонение формы поверхности, волнистость, погрешности установки) она относится, исключив из рассмотрения ненужные.

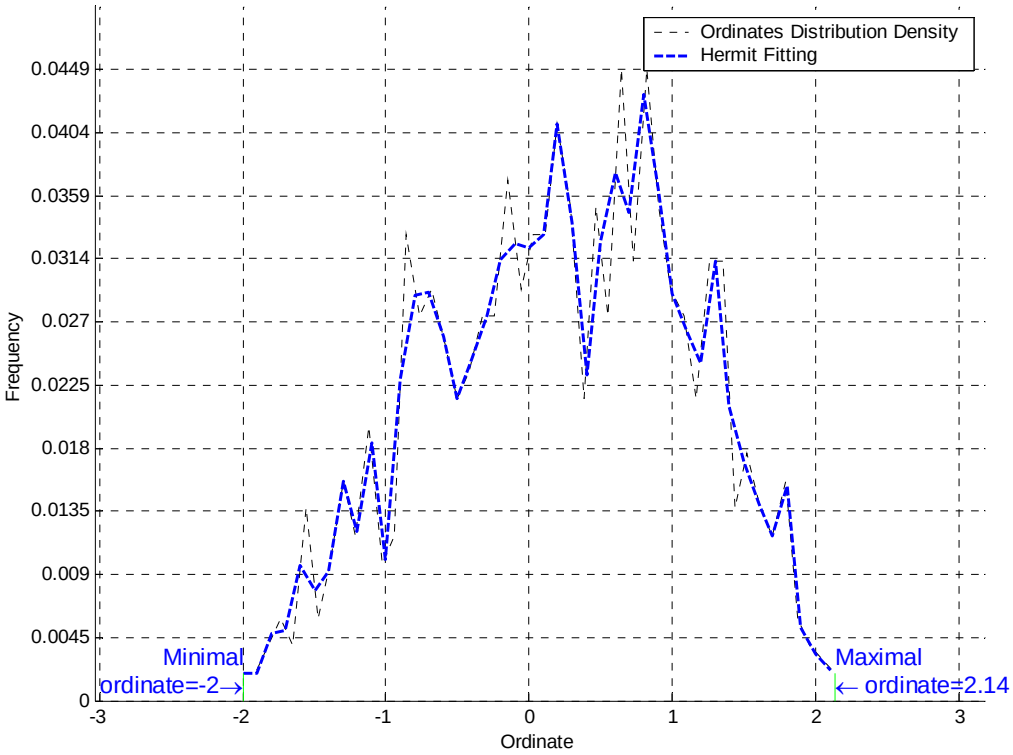


Рис. 5. Сглаживание плотности распределения ординат профиля при помощи полинома Эрмита

Путём обратного преобразования Фурье, преобразовав амплитудный спектр, получаем профиль, в котором исключены несущественные характеристики. Этот профиль обрабатывается любым способом для получения необходимых нам характеристик микрогеометрии поверхности.

Все эти функции достаточно легко реализуются в среде MATLAB благодаря наличию огромного количества готовых функций, которые собраны в модули, разделенные по тематике (статистика, обработка сигналов, работа с внешними устройствами, нечеткая логика, обработка изображений и прочие, всего около 30 модулей), гибкому встроенному С-подобному языку, а также весьма информативному и хорошо структурированному руководству пользователя.

Литература

1. Валетов В.А Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. / Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1989, с. 100.
2. Валетов В.А. Оценка шероховатости, волнистости, отклонений формы поверхностей с помощью ЭВМ. / В кн.: Технология судостроения, судового машиностроения, обработка металлов и сварка. Л.: ЛКИ, 1980. С. 133–135.
3. Электронный вариант руководства пользователя среды MATLAB.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРЕСС–ФОРМ С ПОМОЩЬЮ RP–ТЕХНОЛОГИЙ

В.А. Валетов, С.В. Бобцова

Технологии быстрого прототипирования предоставили новые возможности развития производства. За последние несколько лет произошли существенные изменения в новых технологиях, которые повлияли на то, как промышленность может использовать эти технологии в точном литье по выжигаемым моделям для быстрого изготовления функциональных металлических образцов и как ключевой шаг в быстром изготовлении оснастки.

Всем хорошо известны традиционные способы изготовления оснастки – механическая обработка, литье, а также метод гальванопластики. Но существует также ряд других способов изготовления форм, сокращающих время, а также стоимость изготовления пресс-форм. Речь идет о таких технологиях, как изготовление силиконовых форм, и об использовании RP-технологий для изготовления изделий из листового материала.

Эластичные силиконовые формы

Эластичные силиконовые формы незаменимы в том случае, когда необходимо получить опытные образцы и небольшие партии пластмассовых деталей любой сложности и габаритов без изготовления стандартной оснастки. Для создания формы необходимо получить модель, которая изготавливается методами быстрого прототипирования (частный случай), например, стереолитографией. Форма изготавливается заливкой полимеризующегося силикона вокруг модели. Модель удаляется из силиконовой формы после надреза формы по разделительной плоскости. Форма готова. Далее в нее можно залить любую двухкомпонентную полиуритановую смолу. Литьевые смолы смешиваются в вакуумной камере установки и автоматически заливаются в силиконовую форму.

Недостаток заключается в том, что сама силиконовая форма изготавливается за очень короткое время - приблизительно за шесть часов после получения модели. Однако для получения полиуретановой копии требуется гораздо больше времени. Как правило, в день можно изготовить 4–8 деталей.

Промежуточная оснастка

В том случае, когда требуются 20–100 прототипов и необходимо, чтобы они были отлиты под давлением из промышленной пластмассы, эластичная оснастка не подходит. В то же время, при изготовлении нескольких сотен деталей, невозможно окупить затраты на серийную стальную оснастку. Эту задачу можно решить с помощью так называемой «промежуточной оснастки». Основное преимущество данного способа состоит в том, что формообразующие пуансона и матрицы изготавливаются непосредственно на установке стереолитографии из полимера. Следовательно, никакие вспомогательные процессы, за исключением очистки стереолитографической детали, удаления элементов поддержки, пескоструйной обработки и полировки, не требуются.

Для повышения стойкости формы, что необходимо при больших сериях изготавливаемых изделий, вместо построения монолитной формообразующий на стереолитографической установке строится относительная тонкая оболочка. После построения оболочек, их очистки, удаления элементов поддержки и доотверждения ультрафиолетовым облучением их заливают с обратной стороны вспомогательным материалом – двухкомпонентной эпоксидной смолой с наполнителем из алюминиевого порошка. Это позволяет:

- сократить время построения на стереолитографической установке;
- увеличить удельную теплопроводность;
- снизить затраты, так как стоимость эпоксидной смолы с алюминиевым наполнителем ниже, чем стоимость полимера [1].

RP – технологии с использованием листовых материалов

В крупносерийном и массовом производстве пластмассовых изделий стойкость пресс-форм должна обеспечивать изготовление тысяч изделий, что предопределяет необходимость использования металлических пресс-форм из качественных сталей. Проблема осложняется тем, что для получения высококачественных изделий необходимо обеспечить строгий и равномерный режим охлаждения пластмассы в пресс-форме. Практически это означает, что охлаждающие каналы должны максимально повторять формы изготавливаемых изделий, что невозможно сделать с помощью традиционных технологий.

Как известно, RP–технологии за счет послойного наращивания изделий позволяют получать любою формы и размеры поверхностей, включая закрытые полости. Для вышеуказанной цели больше всего подходит идея RP-технологии с использованием листовых материалов. Несмотря на то, что промышленные установки не предусматривают использование металлических листов или полос, сама идея реализована в промышленности в виде отдельных, непосредственно не связанных между собой блоков. Суть этой технологии заключается в следующем: изделие, в данном случае пресс-форма, проектируется на компьютере. При этом формы и размеры охлаждающих каналов соответствуют строгим теоретическим расчетам, гарантирующим высокое качество изготавливаемого изделия.

Рис. 1. Схема процесса создания пресс-форм

По результатам компьютерного проектирования каждый слой изготавливается с помощью лазерной установки из листового материала требуемой марки. В частном случае эта операция может выполняться с помощью традиционных технологий, например, фрезерование. Изготовленные из листового материала слои пресс-формы собира-

ются вместе и сжимаются с помощью специальных устройств, например, скоб. Сжатый пакет листовых слоев сваривается с помощью диффузионной сварки, приобретая монолитный характер, т.е. соответствующий по прочности изделию из цельного металла.

При использовании технологий, не требующих разогрева пластмасс до высоких температур, вместо сварки можно использовать склеивание. В отдельных случаях вполне допустимым может оказаться простое механическое скрепление листов в единое целое с помощью, например, болтовых соединений. В случае необходимости отдельные поверхности изделия можно подвергать традиционной механической обработке дополнительно.

Этот процесс создания изделий от возникновения идеи до запуска в производство схематически изображен на рис. 1.

Как известно, традиционные методы создания металлических пресс-форм, в зависимости от сложности конструкции, требуют больших и временных, и финансовых затрат, что отодвигает сроки выхода изделия на рынок от момента возникновения идеи в среднем на один год и более. Использование RP–технологий не только существенно сокращает сроки проектирования изделий, но и обеспечивает их более высокое качество. Благодаря возможности изготовления охлаждающих каналов любой формы, процесс изготовления изделий в таких пресс-формах можно полностью автоматизировать, но главное, это обеспечивает надежность получения высококачественных изделий [2].

В заключение следует отметить, что возможности RP–технологий используются пока явно недостаточно, а возможности эти поистине безграничны. При этом положительный эффект достигается на всех стадиях создания изделия – от возникновения идеи до выхода изделия на рынок и даже в процессе его эксплуатации.

Литература

1. Gebhardt A. «Rapid Prototyping. Werzeuge fuer die schnelle Produktentstehung», Hanser, Hamburg, 2002, 550 s.
2. Wiesner P. Umformwerzeuge aus Blechlamellen schnell und massgenau hergestellt, // Produktion. 2002. S. 26-28

ИНТЕГРАЦИЯ CAD CAPP СИСТЕМ И ОТРАБОТКА НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ.

В.С. Кишкурно

В статье рассматривается подход к интеграции автоматизированных систем конструкторской и технологической подготовки производства, в основе которого лежит преобразование информации об изделии, описывающей проблемную область. Подход базируется на преобразовании языков, описывающих модель изделия. В качестве критерия правильности преобразования выбран показатель технологичности изготовления изделия на определенном производстве.

Современные требования к системам автоматизации проектных, конструкторских и технологических систем предприятий ставят вопрос о необходимости создания сквозных автоматизированных комплексов проектирования и подготовки производства – интегрированных автоматизированных систем технической подготовки производства (ИАСТхПП). Экономическая целесообразность ИАСТхПП определяется повышением качества процесса подготовки (конструкторской и технологической) производства, что влечет за собой повышение качества выпускаемой продукции, её конкурентоспособности. Одновременно с этим снижаются затраты на устранение ошибок проектирования и сокращается время на подготовку производства[2].

Технологичность изделия – комплексная характеристика изделия, показывающая, насколько совместимы конструкция и оптимальные условия изготовления изделия. Обеспечение технологичности необходимо проводить на всех этапах технологической подготовки производства (ТПП). Основной задачей отработки изделия на технологичность является придание изделию такого комплекса свойств, который обеспечивает необходимое качество изделия при оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени на технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание, ремонт и утилизацию в конкретных условиях производства, эксплуатации. Результат обеспечения технологичности оценивается показателями стоимости и ресурсоемкости (трудоемкости, материалоемкости) изготовления изделия. Состав свойств, по которым оценивается технологичность изделия, включает следующие классы: функциональные, структурные, геометрические, точностные, физико-механические.

Критерии технологичности формируются на основе возможностей технологических процессов, анализа возможностей технологического оборудования и устоявшихся производственных практик. Каждый из показателей характеризуется степенью влияния на общий показатель технологичности изделия. Необходимо отметить, что критерии технологичности являются зависимыми друг от друга и создают некоторую систему граничных значений оценок технологичности, которая является одной из характеристик производственной системы.

Существует ряд проблем, связанных с обеспечением технологичности новых изделий[1]:

- для многих вновь создаваемых изделий сложно найти изделие-аналог, это приводит к сложности формирования оценок технологичности на этапе конструирования;
- другим важным моментом является длительность процесса проектирования нового изделия. Для изделий с длительным сроком конструкторской подготовки необходимо учитывать изменение показателей технологичности в связи с совершенствованием технологий, возникновением новых материалов.

На этапе КПП требования к технологичности изделия (детали, сборки) в основном относятся к конструктору и формулируются в виде рекомендаций по применению тех или иных элементов в конструкции детали[3]. Можно выделить два типа таких элементов:

1.) типовые элементы конструкций изделий, которым соответствует готовый технологический процесс – аналог;
2.) типовые элементы, которым соответствуют отдельные операции и переходы.

Основное отличие состоит в том, что первый тип элементов обладает большим постоянством с точки зрения изменения технологичности во времени, нежели второй. На основе первого типа можно сформировать библиотеки конструкторских элементов и использовать их в проектировании. В отношении применения второго типа элементов конструктор обладает большей свободой. Фактически такие элементы, выраженные средствами CAD систем, являются элементами геометрии изделия. С другой стороны, элементы второго типа учитывают возможности, состояние и практики текущего производства с точки зрения технолога, в том случае, если на их применение наложены некоторые ограничения. Ограничения состоят в задании используемого множества элементов второго типа и ограничениях крайних значений параметров таких элементов. Ограничения множества элементов второго типа вытекают из технологической возможности произвести элемент с заданной геометрической формой на производстве в принципе, т.е. технологической возможности воспроизвести класс деталей.

$$C = F(e_1, e_2, \ldots, e_n) : e_i \in E^M,$$

где С – деталь, e_i - i-ый элемент детали, E^M – множество элементов деталей, воспроизводимых на производстве, теоретически E^M должно быть подмножеством G – множества классов деталей, изготавливаемых на производстве, чтобы можно было говорить о возможности изготовления детали.

Ограничения крайних значений параметров вытекают из технологической возможности выполнить элемент заданной геометрической формой с определенными значениями параметров:

$$p_{ij} = P(e_i, j) : p_{ij} \in [\min(P_j^M); \max(P_j^M)],$$

где p_{ij} – j-ый параметр элемента e_i, P(…) – функция получения данного параметра, P_j^M – множество значений параметров j для производства M. Множество параметров элемента:

$$P = \{D, \Sigma, R, H, ...\},$$

где D – множество габаритных параметров элемента, Σ – множество точностных параметров, R – множество параметров поверхности элемента, H – множество параметров материала детали. В дальнейшем речь будет вестись об элементах второго типа.

Введем определение структурированной модели представления информации об изделии. Модель состоит из нескольких уровней, каждый из которых содержит определенный набор средств описания изделия. Можно говорить, что каждый уровень ориентирован на определенный класс или множество классов задач подготовки производства. Информация, необходимая для решения задач определенного класса, представляется уровнем модели. Теоретически технолог и конструктор готовят два разных представления модели одного и того же изделия.

В общем, информацию об изделии можно разбить на геометрическое и проблемно-ориентированное представление. Геометрическое представление описывает изделие (деталь) как геометрическое тело. Конструкторская подготовка производства изделия ведется обычно на одном из геометрических уровней представления детали. Проблемно-ориентированное представление описывает изделие с точки зрения конкретного изделия и включает характеристики материала, систему размеров, точность размеров, качество поверхности. Проблемно-ориентированная информация «надстраивается» над геометрической, она задается путем параметризации геометрического представления. Фактически проблемно-ориентированное представления детали состоит из геометрического представления и множества параметров, соответствующего множеству парамет-

ров элемента (изделия, детали) P. Проектирование технологической системы (ТС) для изделия ведется на проблемно-ориентированных уровнях модели.

Каждый уровень содержит некоторое множество элементов (словарь) и действий над ними. Можно говорить, что для каждого $i-го$ уровня модели задана грамматика G_i описывающая язык представления изделия на этом уровне. В теории формальных грамматик понятие «грамматика» определяется как совокупность четырех объектов[5]:

$$G = \{V_T, V_A, \langle I \rangle \in V_A, R\},$$

где V_T – терминальный алфавит, алфавит символов, входящих в цепочки получаемого языка, V_A – нетерминальный алфавит, алфавит символов, использующихся при генерации языка, но не входящих в конечный результат, $\langle I \rangle$ – начальный символ грамматики, с которого начинается построение языка, R – множество правил вывода или порождающих правил. Правило вывода – правило $\alpha \to \beta$, где α, β – цепочки символов, входящих в алфавит $V_T \cup V_A$, называемый полным алфавитом грамматики. Нетерминальный алфавит используется только как посредник на этапе генерации языка. На его состав, в данном случае, накладывается только требование достаточности для генерации. Ведущую роль в модели играют терминальный алфавит (состав слов выходного языка) и правила вывода (определяют порядок сбора букв в слово). Язык представляет собой множество цепочек, сформированных на основе грамматики.

Таким образом, на каждом уровне формируется свой язык $L_i(G_i)$, описывающий модель представления информации об изделии на этом уровне. Общая модель представления информации об изделии представляет собой совокупность языков всех уровней модели:

$$M = \sum_{i=0}^{n} L_i(G_i).$$

В табл. 1 приведен пример такой модели. Однако необходимо отметить, что уровень 2 может быть исключен. В данной модели он отражает возможность построения плоских чертежей изделия.

Каждая система автоматизированной подготовки производства использует один или несколько уровней полученной модели для представления информации об изделии. Информационная интеграция систем автоматизированной подготовки производства заключается в создании единой информационной среды подготовки производства. Можно выделить два направления интеграции: физическая интеграция и информационная интеграция. Физическая интеграция заключается в реализации единообразных, стандартных методов доступа к информации внутри ИАСТхПП. Начиная с 5-го уровня, представляемая моделью информация приобретает ориентированность на ТПП, а на 6-м уровне – ориентированность на возможности предприятия. Информационная интеграция заключается в реализации интероперабельности моделей разных уровней представления информации об изделии, т.е. свободного преобразования информации между уровнями модели. Информационная интеграция CAD/CAPP систем заключается, в частности, в интероперабельности моделей 3го-6го уровней.

Для реализации данного требования необходимо проанализировать состав уровней модели. Несложно заметить, что для некоторых уровней словарь включает в себя элементы (или состоит из элементов) языка предыдущего уровня, а операции представляют собой операции перехода на более высокий уровень. Это позволяет утверждать о возможности решения проблемы интеграции путем задания транслирующей грамматики. Однако при переходе с геометрических уровней на прикладные возникает разрыв, заключающийся в том, что содержание словаря и возможности параметризации элементов прикладного уровня обусловлены технологическими возможностями производства.

Уровень		Состав терминального алфавита	Состав операций
Проблемно-ориентированные уровни	7.Язык технологической системы	Множество операций (операционный базис производства)	Операции группирования и маршрутизации
	6.Система базовых технологических элементов производства	Словарь предыдущего уровня, дополненный элементами, специфичными для конкретного производства.	Операции группирования в иерархии, адресации и параметризации объектов.
	5.Система общих базовых технологических элементов	Трехмерные объекты, соответствующие элементам, получаемым в результате технологических действий	Операции группирования в иерархии, адресации и параметризации объектов.
Геометрические уровни	4.Система тел (твердотельная модель)	Трехмерные объекты	Операции твердотельного моделирования (пересечение, вычитание, объединение, присоединение). Операции параметризации (задания атрибутов) объектов.
	3.Объемная модель	Контуры, системы линий	Операции генерации 3х-мерных объектов (тел, поверхностей): Вращение, вытягивание,…
	2.Плоская модель	Контуры, системы линий, системы условных обозначений	Операции над контурами (объединение, пересечение)
	1.Язык построений	Точка, растр	Базовые операции построения плоских геометрических объектов

Таблица 1 Уровни модели представления информации об изделии

Таким образом, транслирующая грамматика для перехода с геометрического уровня на проблемно ориентированный (в представленной модели с 4-го на 5-й) приобретает вид

$$G = \{V_{t\_in}, V_{t\_out}, V_a, \langle I \rangle, R\},$$

где V_{t_in} – словарь языка геометрического уровня (входной с точки зрения перевода), V_{t_out} – словарь языка проблемно-ориентированного уровня (выходной с точки зрения перевода).

Правила вывода в такой грамматике определяют соответствие геометрических элементов конструкции геометрическим элементам, отражающим технологические возможности производства. При таком переводе существует возможность сопоставления одному элементу геометрического уровня нескольких элементов проблемно-ориентированного уровня. Это естественно ввиду множественности геометрических форм, получаемых на технологическом оборудовании. Для того чтобы сделать правильный перевод, к каждому правилу вывода должно быть добавлено правило вычисления оценки показывающей, насколько выгодно использовать тот или иной вариант в случае множественности решений. Примером такого правила может служить ограничение какого-либо габаритного размера определенным диапазоном значений габаритных

размеров деталей, обрабатываемых заданным типом оборудования. Оценка должна зависеть от того, насколько близко находится данный размер к середине диапазона, насколько близок порядок диапазона к размеру (насколько размер соответствует возможностям оборудования). Наибольшая сумма оценок соответствует правилу вывода, перевод которого наилучшим образом удовлетворяет технологическим особенностям производства. Фактически такой перевод учитывает сложившиеся практики производства и подбирает наиболее технологичную модель проблемно-ориентированного представления изделия.

Введя информационную связь между прикладным и геометрическим представлением детали, мы можем автоматизировать передачу информации об изделии от систем КПП к системам ТПП[4]. Результатом такой интеграции будет снижение ошибок ручного построения технологических моделей, сокращение времени начальных этапов ТПП, ускорение подготовки производства в целом и получение более конкурентноспособных процессов на предприятии.

Литература

1. Соколов В.П., Цырков А.В. Информационные технологии в обеспечении технологической подготовки производства. http://lab18.ipu.rssi.ru/labconf/aticle.asp?num=78
2. Энгельке У.Д. Как интегрировать САПР и АСТПП. М.:Машиностроение, 1990.
3. Киселев Г.А., Гуленков В.Ю. Гипкие производственные системы в машиностроении. М. :Издательство стандартов, 1987
4. Падун Б.С., Кишкурно В.С. Информационная интеграция CAD и CAPP систем.
5. Фомичев В.С. Формальные языки, грамматики и автоматы.

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ НА ВИРТУАЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

С.А. Гнездилова

Виртуальные предприятия в настоящее время составляют конкуренцию крупным современным предприятиям. Для повышения эффективности работы виртуальных предприятий рекомендуется применение специальных экспертных систем в технологическом проектировании.

Введение

Виртуализация современного производства при использовании самых передовых технологий ведет к быстрому выпуску высококачественной услуги или изделия. Виртуальное предприятие перестраивает свою конфигурацию и структуру производственных процессов под запросы рынка.

Для повышения эффективности производства необходимо обеспечить достаточный уровень оперативности и обоснованности управляющих воздействий и проектных решений. С этой целью процессы управления и проектирования автоматизируются. Наиболее предпочтительная форма автоматизации – экспертные системы, так как они позволяют повысить качество технологической подготовки производства при неполной формализации правил технологического проектирования и управления.

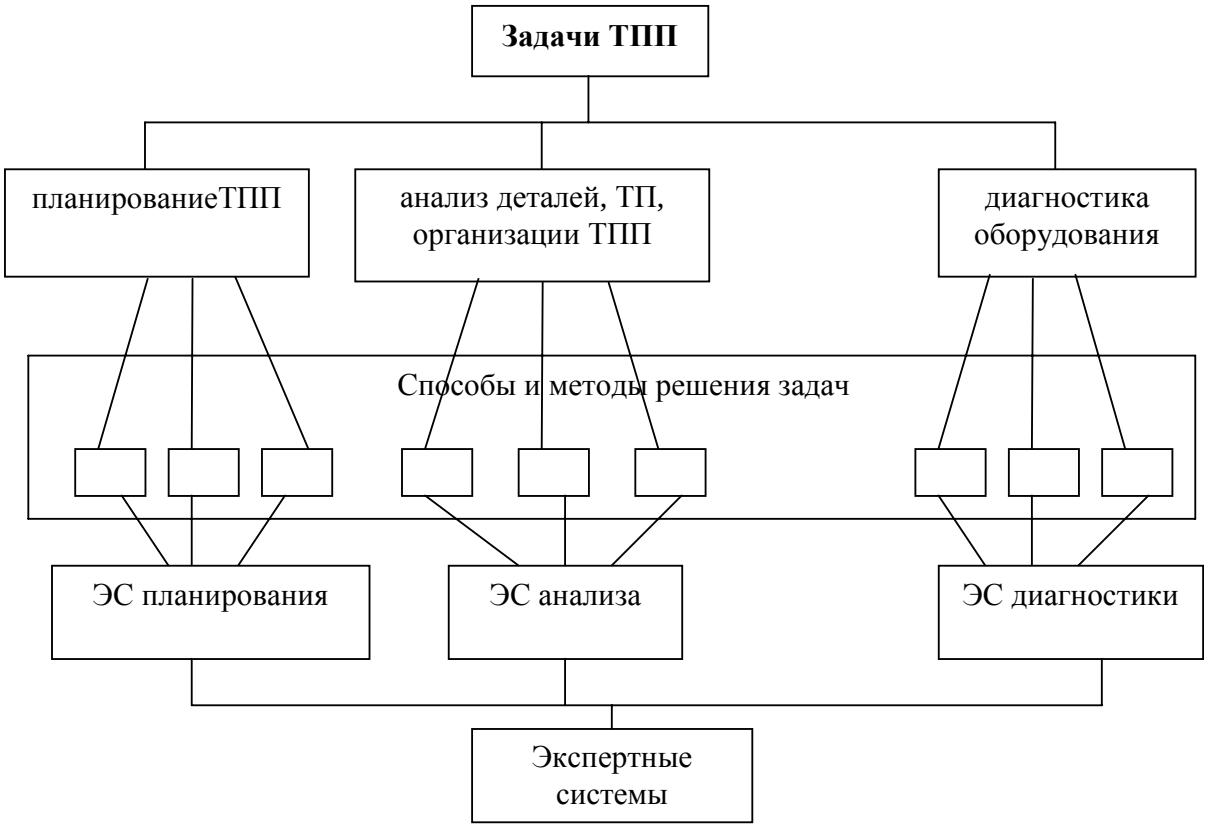


Рис. 1. Структура экспертных систем

В настоящее время для решения технологических задач применяется ряд экспертных систем, ориентированных на производственные задачи планирования, анализа и диагностирования, управления, технологического проектирования. Каждая экспертная система ориентирована на конкретную задачу (см. рис. 1). Например, для проектирова-

ния технологических процессов используется система TECHCARD, для нормирования операций и расчетов режимов резания – TECHEXP, для диагностирования оборудования – EMYCIN. Каждая из этих систем имеет свой набор правил обучения и управления данными.

Теоретическая часть

В планировании производства существуют различные методы решения задач, которые ориентированы на различные специфические ситуации. Каждая ситуация описывается оригинальным составом данных и решений. Цель метода – учитывать каждую технологическую операцию с ее индивидуальными ограничениями и обеспечить минимизацию незапланированных затрат. Нетрудно заметить, что существует тенденция увеличения сложности задачи по мере возрастания числа полностью спланированных технологических операций, к тому же по возможности установленные сроки выполнения операций не должны изменяться. Чтобы противодействовать этой тенденции, целесообразно решение задачи начинать с тех операций, которые накладывают самые большие ограничения по запросам дефицита, сроков и затрат.

На основе анализа загрузки имеющихся ресурсов устанавливаются сроки производственной программы и определяется подготовительное время для каждой операции[1, 2].

После поступления заказа на головное предприятие экспертная система, обладающая специализированной базой данных и базой знаний в области проектирования и изготовления оснастки, проводит анализ вновь поступившего заказа на основе экспертных оценок. Заказ дается в разных видах: чертеж готового изделия, деталь, пресс-форма и т.п. Оценка производится на стоимость заказа, время выполнения заказа и на возможность его выполнения в заданные сроки. Первые две оценки зависят от конкретного заказа, а последняя – от всех заказов, которые были приняты или рассматриваются на возможность их исполнения.

На все эти виды оценок влияют следующие параметры:

- сложность пресс-формы,
- время проектирования,
- время изготовления оснастки,
- себестоимость пресс-формы.

Сложность пресс-формы выступает здесь главным критерием, так как в зависимости от сложности пресс-формы рассчитывается время проектирования и изготовления оснастки, а также себестоимость пресс-формы.

На любом предприятии, в частном случае на виртуальном, необходимо проводить анализ имеющегося на складе материала и стандартных изделий для пресс-форм и штампов. Заложенная в систему информация о складах позволяет сократить сроки на приобретение необходимого материала и сократить время на изготовление деталей оснастки. Также нельзя забывать об эффективности эксплуатации различных моделей оборудования одинакового назначения. Экспертная система должна отслеживать загруженность оборудования и равномерно распределять выполнение работ во избежание простоя.

На основании заложенных в систему данных экспертная система определяет возможность и невозможность выполнения заказа. При этом должны быть задействованы ресурсы всех предприятий, входящих в состав виртуального предприятия.

Окончательное решение о заказе выбирается из множества решений, полученных экспертной системой, на основании экспертных оценок, анализа имеющихся на складе комплектов заготовок и субъективной оценки пользователя.

Заказы, поступающие на предприятие, группируются: выбираются одинаковые задания на изготовление с похожими характерными чертами. Система анализирует все задания на изготовление относительно этих свойств и относит их к стадии завершения подготовки планирования. Незапланированные технологические операции система перемещает по оси времени без соблюдения сроков ограничения. Таким образом, обеспечивается полное планирование всех технологических операций [1, 2].

В заключительной стадии улучшения планирования система ищет потенциалы оптимизации.

Для решения задач анализа применяются системы анализа и диагностирования, которые отвечают за анализ данных, причины неисправностей средств производства, анализ использования средств производства, диагностирование причин несоблюдения сроков выполнения заказов, отслеживание занятости станков (машин) и загруженности заданиями, анализ расходов (рассмотрение возможности использования менее дорогой технологии производства).

Каждая из перечисленных выше экспертных систем должна обладать своей базой данных и базой знаний, своим набором правил, чтобы отвечать предъявляемым к ней требованиям. Например, в системе TECHEXP экспертные знания представляются в виде формул и таблиц. Формулы широко используются там, где требуемое значение можно получить путем обычных математических вычислений из других параметров. Так, для получения минимальных размеров заготовки можно взять габаритные размеры детали из чертежа и прибавить припуски на обработку. Если такой математической зависимости нет, то можно задать различные значения нужного параметра при разных условиях, в результате чего получается таблица, очень похожая на таблицы, приводимые в технологических справочниках [3].

Экспертная система для планирования производством должна иметь базу, содержащую информацию о технологических операциях, оборудовании, инструменте. Правила системы необходимо ориентировать на выполнение поставленной задачи с учетом отведенных сроков. Система TECHCARD позволяет создавать базы данных по стандартному и специальному оборудованию и инструменту; операциям. Данные базы используются технологами при написании технологических процессов, что существенно облегчает написание ТП с точки зрения удобства и быстроты.

Экспертная система, отвечающая за анализ и диагностирование, содержит информацию о заказах, загруженности оборудования, имеющемся на складе материале.

В процессе проектирования оснастки должны выполняться работы по формированию запросов на поиск аналогов, их систематизации и анализу. Отобранные аналоги должны быть использованы при проектировании изделий. При поиске аналога также необходима своя экспертная система, содержащая базы данных оснастки, технологических операций и переходов. Затем проводится проверка спроектированного изделия на соответствие техническому заданию на его проектирование и достигнутых показателей технологичности. База данных может быть создана в среде CAD/CAM Cimatron. Поиск в базе можно будет осуществлять по номеру оснастки и номеру чертежа.

Заключение

Для управления такой организационной структурой, как виртуальное предприятие, требуется использование самых передовых информационных технологий. В данной статье предлагается использование экспертных систем для управления виртуальным предприятием, так как экспертные системы могут охватывать любые предметные области, моделируя механизм мышления человека, а их применение приносит значительный экономический эффект.

Экспертная система, направленная конкретно на решение технологических задач, помимо традиционных требований, предъявляемым ко всем экспертным системам, должна реализовывать следующие функциональности:

- распределение заданий на изготовление к средствам производства,
- размещение производственного оборудования,
- одновременная ориентация на общие знания и на конкретную организацию.

Литература

1. Wildemann H. Expertensystemen in der Produktion. München: gfmt, Ges, für Mänagement und Technologie, 1989.
2. Bernhard Mechler Intelligente Informationssysteme , Addison - Wesley (Deutschland) GmbH, 1995.
3. Куприянчик А.М., Гинзбург И.М., Печков Ф.И. Techcard.Версия 4.2. Руководство пользователя. Минск: Репринт, 2001.

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИЗДЕЛИЯ

И.И. Свердлина

В статье представлен метод управления точностью изделия, основанный на введении элементов управления проектированием технологических процессов. Необходимость разработки подобного метода вызвана отсутствием в современных системах управления точностью обратных связей, отслеживающих динамичное изменение производственной среды и отражающих эти изменения на всех этапах проектирования и изготовления изделия. Описанный подход позволит в процессе проектирования изделия прогнозировать возникновение погрешностей и предотвращать появление нежелательных ситуаций путем введения корректирующих воздействий.

Реализация любой технологии является взаимосвязью двух основных образующих потоков: материального и информационного. Подготовка и реализация материального потока есть задача конструкторской, технологической подготовок производства (КПП, ТПП), а также производственного процесса изготовления изделия по разработанной технологии. Информационный поток представляет собой определенное алгоритмическое заданное изменение параметров процесса во времени. Следовательно, любой технологический процесс (ТП) должен сопровождаться информацией о последовательности изменения состояния процесса во времени.

Необходимой составляющей информационного потока является управление, представляющее собой организацию целесообразных управляющих воздействий (УВ), направленных на достижение заданных показателей качества изделия. Обеспечение качества изделия невозможно без знания показателей о состоянии процесса и изделия, поэтому недостаточно одного информационного потока, характеризующего последовательность материальных изменений. Необходимо дополнение еще одним потоком, который должен нести информацию о текущем состоянии ТП и изделия. Такой поток реализуется введением обратных связей ОС [1–3].

Рассмотрим структуру управления качеством при проектировании нового изделия или коррекции уже имеющихся конструкций и технологий с введенными ОС. Структурно управление процессами изготовления изделия/детали можно представить в виде рис. 1.

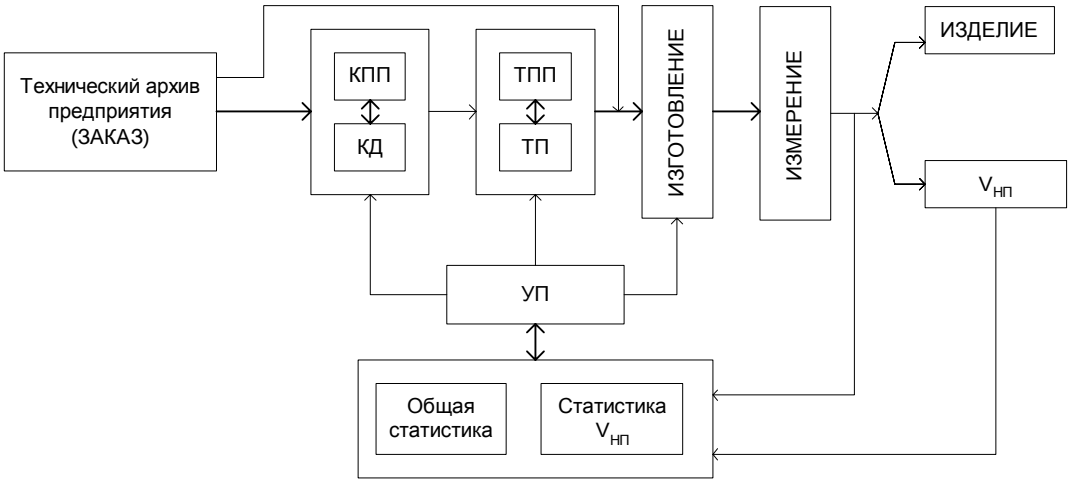


Рис. 1. Структурная схема управления ТП.

Для начала процесса проектирования и изготовления изделия предприятием формируется ЗАКАЗ. Это то основание, на котором делаются дальнейшие разработки и действия, направленные на получение изделия.

На этапе КПП проводится анализ функциональных эксплуатационных требований, разрабатывается конструкция будущего изделия. Результатом КПП является ком-

плект конструкторской документации (КД), который передается на следующий этап – ТПП. Результатом этого этапа является спроектированный ТП, который передается на производственные участки. Полученные в результате этих процессов составляющие изделия (детали, сборочные узлы) подвергаются контролю (измерению). Результатом совокупности этих действий является готовое изделие.

Однако процесс изготовления характеризуется наличием объема незавершенного производства $V_{НП}$ вследствие появления брака при несборке некоторого процента деталей. Накопление статистики $V_{НП}$ и общей статистики (о проконтролированных деталях и сборочных узлах $\delta T_{пр}$) происходит в базе данных (БД). Эти данные передаются в управляющую программу (УП), где происходит сравнение полученных результатов с требуемыми, их оценка, определение закономерностей, которые уточняются с дальнейшим набором статистических данных.

Далее информация, хранящаяся в БД, и соответствующие необходимые УВ передаются по трем уровням ОС. Первый уровень ОС – уровень, объединяющий производственные подразделения и участки. Контроль точности полученного после механообработки или сборки изделия проводится с установленной периодичностью, и при обнаружении отклонения полученных значений от заданных производятся необходимые действия по поднастройке оборудования. При этом происходит накопление информации о ТС и изделии по результатам проведенного контроля и снятия показаний о состоянии ТС. На данном этапе можно также говорить о двух подуровнях организации ОС:

– корректировка параметров ТС и изделия при изготовлении отдельных деталей изделия по результатам контроля обработанных деталей,
– корректировка параметров сборочного процесса и, соответственно, механообрабатывающего процесса по результатам сборки.

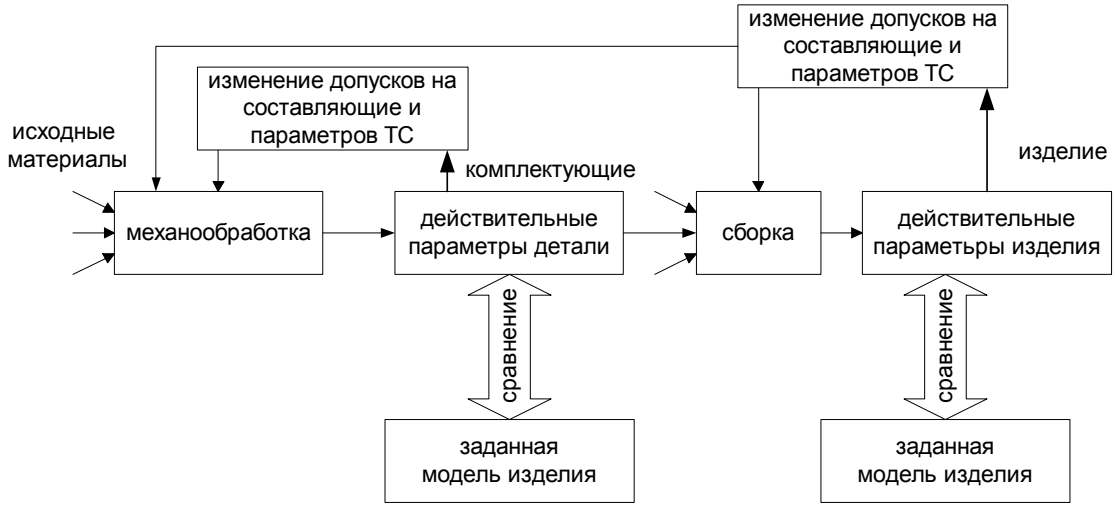


Рис. 2. Первый уровень организации ОС.

Второй уровень ОС – уровень, объединяющий производство и ТПП. Контроль отдельных составляющих деталей и всего изделия в целом позволяет определить для вновь проектируемого ТП периодичность проводимого контроля, оптимальное сочетание скорости резания и подачи, допуски на обработку и т.д. Набранная по результатам контроля статистика накапливается в соответствующих БД. В ходе ТПП информация для определения и принятия того или иного технологического решения берется из БД. При этом учитываются особенности предыдущего опыта получения аналогичных деталей или деталей с полным или частичным набором аналогичных параметров. Взаимо-

действие технолога с производственной средой происходит через БД, поэтому точность и качество подготовки производства зависит от получения наиболее достоверной информации о состоянии ТС , о качестве и точности изделия.

Третий уровень ОС – уровень, объединяющий процесс конструирования с этапами проектирования технологии и производством. На данном уровне ОС реализуется в основном на этапе опытного производства. По результатам изготовления разработанной конструкции проводится анализ полученных результатов: технологичность данной конструкции, возможность обеспечения требуемых параметров в предложенном ТП, возможность изменения элементов конструкции, расширения допусков в случае невозможности их обеспечения.

При разработке конструкции нового изделия информация, хранящаяся в БД, используется для учета в новой конструкции недостатков, допущенных ранее и выявленных только на этапе опытах образцов.

В том случае, когда требуется изготовить изделие, уже спроектированное и отработанное на данном предприятии, процесс начинается с непосредственного изготовления изделия. Если в процессе выявляется необходимость в корректировке параметров процесса, нормирования, ТП или КД, то результаты анализируются и приводятся в действие соответствующие уровни ОС. При этом для обеспечения требуемого качества изделия учитываются отклонения действительных производственных значений допусков от требуемых в конструкции, и УВ, принятые для их компенсации, а также $V_{НП}$, существующий на данный момент, с учетом которого необходимо реализовывать запуск ТП.

Таким образом, реализуется управление точностью и качеством изделия на протяжении всего цикла его изготовления.

В основе описания метода адаптивного управления точностью изделия на этапе ТПП можно положить один из известных методов проектирования ТП – проектирование ТП с заимствованием с изменением структуры ТП-аналога [4]. Для этого в традиционную схему проектирования включаются некоторые управляющие воздействия УВ, полученные по результатам обработки статистических данных и передающиеся УП на этап ТПП:

$$УВ = f\left(V_{НП}, \delta T_{пр}\right).$$

УВ вырабатываются УП по результатам проведенных измерений полученных изделий и сравнения полученных результатов с требуемыми. Передача УВ осуществляется с помощью трех описанных уровней ОС. Своевременность применения УВ зависит от оптимальности организации ОС, т.е. от временного разрыва между:

– получением измеренных данных,
– сопоставлением их с требуемыми параметрами,
– выработкой и принятием УВ,
– передачей УВ на соответствующий уровень подготовки и изготовления изделия.

Такие УВ являются новой составляющей при проектировании ТП, учитывающей динамику производства. Эта составляющая изменяет метода решения задачи ТПП, которая формально будет описываться следующим образом:

$$\begin{cases} LKN\Gamma_k P\Gamma_a(УВ)d = t; \\ \Gamma_a d = G^a; \\ PG^a = T^a, t_i^a \in T^a, \\ N\Gamma_k T^a(УВ^a) = T, t \in T, \end{cases}$$

Здесь $УВ^a$ – возможные управления, принимаемые для конкретного ТП t изготовления изделия *d*, находящиеся в базе данных УВ, являющиеся аналогом принимаемым для T^a, *L* – операция, выполняемая оператором, если варианты не различимы по заданному критерию, К – критерий выбора оптимального варианта из множества отобранных на

предыдущем этапе ТП-аналогов T^a, Р – поисковая процедура, $Г_a$ – алгоритмы адресации к классам (группам, типам) изделий, $Г_k$ – алгоритмы корректировки структуры ТП аналогов T^a, t^a – ТП-аналог конкретной операции, d – заданное изделие, G^a – множество классов, к которым адресуется изделие d, N – алгоритм параметрической настройки по характеристикам конкретного изделия, t – ТП изготовления изделия d после параметрической настройки, T – множество ТП изготовления изделия d, t_i^a - унифицированный ТП, соответствующий группе изделий G^a.

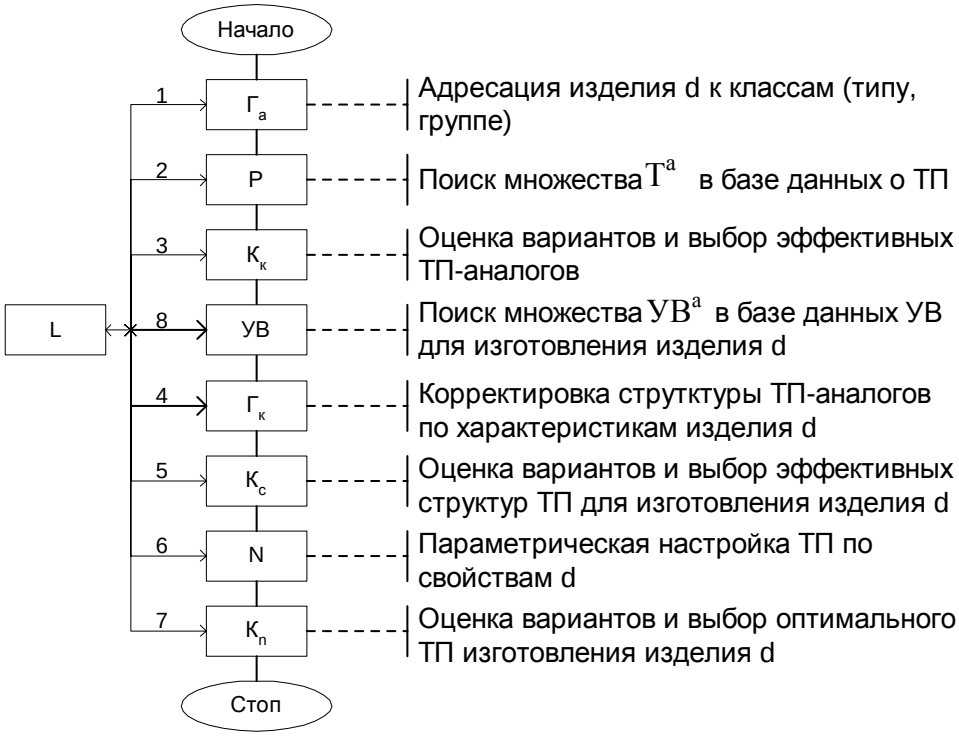


Рис. 3. Схема проектирования ТП методом заимствования с изменением структуры ТП-аналога с элементами управления процессом.

При управлении точностью изготовления изделия d (рис.3) процесс формирования параметров начинается с формирования запроса на поиск в базе данных ТП из множества T^a для конкретного изделия d. После того как будет выбран t для конкретного изделия d, можно переходить к поиску необходимых УВ. По совокупности характеристик изделия d и найденного t выбираются из БД принимаемые ранее для данной совокупности признаков УВ (8). Таких УВ может быть несколько вариантов, поэтому технологу необходимо будет выбрать оптимальное сочетание параметров d, ТП и УВ. В связи с выбранными (одним или несколькими) УВ при необходимости производится новый расчет размерных характеристик ТС и изделия (4) или при необходимости меняется его структура (6).

Результат параметрической настройки N(6) можно описать как

$$\{v, s, t, T, T_i, \Delta_k, t_{ув}\} = N,$$

где v – скорость резания, s – подача, t – глубина резания, T – нормы времени, δT_i – размерные характеристики изделия и ТС, $\Delta_к$ - величина компенсации по результатам принятого УВ, $t_{ув}$ – период управляющего воздействия.

Необходимо отметить, что может возникнуть ситуация, когда структура ТП-аналога остается неизменной. Это может произойти в двух случаях:

- последовательность операций и переходов ТП-аналога можно полностью применить для изготовления нового изделия, изменив только параметрическую настройку,

- при изготовлении партии деталей/изделий, уже отработанных на данном предприятии, на которые уже имеется разработанный ранее комплект конструкторско-технологической документации.

В последнем случае может возникнуть только необходимость в изменении параметров ТС или перерасчете режимов, для чего вводятся УВ ОС первого уровня (рис. 2).

Такой метод обеспечения заданной точности изделия при управлении ТПП, в частности, позволяет оптимально использовать имеющиеся возможности парка оборудования предприятия, сократить время на отработку опытной партии изделия. Прогнозирование возможных ситуаций в производственной среде позволит сократить сроки на освоение и адаптацию новых видов изделий за счет применения накопленного производственного опыта.

Литература

1. Киселев Г.А., Гуленков В.А. Гибкие производственные системы в машиностроении. М.: Издательство стандартов, 1987.
2. Телешевский В.И. Принципы построения компьютеризированных систем обеспечения качества, ж. «Автоматизация проектирования», Издательство «Открытые системы» 01, 1999 // http://www.osp.ru/ap/1999/01/21.
3. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Протопопов С.П. и др. Адаптивное управление технологическими процессами. М.: Машиностроение, 1980.
4. Митрофанов С.П., Куликов Д.Д., Миляев О.Н., Падун Б.С. Технологическая подготовка гибких производственных систем, Л.: Машиностроение, ЛО, 1987.

СОЗДАНИЕ БАЗ ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

П.Д.Юсупов, Д.Д.Куликов

В работе рассматриваются принципы создания баз данных технологического назначения (БДТН) для использования в среде PDM системы на примере выбора технологического оснащения.

Введение

Базы данных АСТПП характеризуются большим количеством наборов данных (несколько тысяч) при относительно небольшом объеме самих наборов (10^2–10^4 байт). Эти базы содержат информацию о технологическом оснащении, заготовках, припусках и режимах резания и т.д. Использование PDM–систем позволяет по-новому организовать базы данных технологического назначения (БД ТН). Во-первых, базы данных могут рассматриваться как составная часть GMP, во-вторых, для поиска может использоваться поисковый инструментарий PDM–системы. В-третьих, достаточно просто организовать и использовать распределенные базы данных.

Использование БДТН для выбора технологического оснащения

Применительно к технологическому оснащению разработано несколько иерархических классов объектов: «Класс ТО»; «Подкласс ТО»; «Вид ТО»; «Типоразмеры ТО».

Информацию об объектах технологического оснащения можно разделить на четыре части:

- общие характеристики;
- обозначение объекта;
- эскиз объекта;
- «паспорт» объекта.

Общие характеристики объекта представляют собой комплекс параметров, по которым ведется поиск при решении технологических задач. Обозначение объекта как результат поиска в базе данных фиксируется в технологической карте. Эскиз объекта – графический файл, который используется для вывода на экран и проверки правильности выбора найденного объекта. «Паспорт» объекта – дополнительная информация об объекте, необходимая для решения отдельных задач ТПП. Наибольшее применение «паспорт» получил для технологического оборудования. Информация из паспорта, после того как найдена модель оборудования, используется для расчета режимов резания.

Информация, которую необходимо поместить в паспорт объекта, весьма разнообразна и может по составу параметров меняться от объекта к объекту, т.е. паспорт является информационным объектом с переменной структурой. Объекты такого типа названы сложными объектами, и для них предложено хранение в базе в виде фрейма, слоты которого содержат обозначения и значение параметра объекта. Исследования показали, что фреймовая форма записи является удобной формой хранения информации для сложных объектов, так как позволяет, с одной стороны, достаточно просто менять структуру объекта, а, с другой стороны, имеет регулярную внутреннюю структуру хранения, что дает возможность проводить обработку фрейма простыми процедурами.

Поиск технологического оснащения выполняется в три этапа:

- выбор вида технологического оснащения,
- выбор конкретного объекта технологического оснащения,
- определение возможности использования найденного объекта.

Первый этап выбора ТО. Выбор вида технологического оснащения можно обобщенно выразить с помощью соответствия

$\Gamma_1 = (G_1, V_1, R_1)$;

$R_1 = \{r_{1,j}\}$, $j = 1,m_1$;

$V_1 = \{v_{1,i}\}$, $I = 1, n_1$;

$G_1 = \{< v_{1,i} , r_{1,j} >\}$,

где G_1 – график соответствия; V_1 – входные элементы; R_1 – множество решений.

Принятие решения может быть сформулировано как получение образа соответствия от заданного входного множества $\{v_1\}$. Следовательно, множество полученных решений можно записать следующим образом:

$MR_1 = \Gamma_1(\{v_1\})$;

$MR_1 = \{r_{1,k}\}$

$r_{1,k} = \{nr_k, nn_k, S_k\}$;

где r_k – номер решения; nn_k – номер набора данных с объектами найденного вида; S_k – приоритет. Из массива решений выбирается решение с наибольшим приоритетом.

$MR_1 \rightarrow r_{1,t}$ при $S_{t,\max}$

Сложность реализации указанного соответствия заключается задании входных элементов. Если i-ый входной элемент представить как множество входных параметров $v_i = \{p_{i,j}\}$, $j = 1, \ldots, n_i$, то для каждого вида объекта требуется свой состав входных параметров для входного элемента. Отсюда следует важный вывод: для каждого вида инструмента требуется свой алгоритм для его выбора.

При процедурном представлении алгоритма выбора ТО этот алгоритм программируется, возможно, в виде отдельного модуля и отлаживается. Таких модулей может набраться несколько тысяч. Общий объем программ выбора видов ТО становится весьма большим. Разработка и сопровождение всего комплекса программ требует больших затрат. Кроме того, процедурное представление алгоритма в виде исполняемого программного модуля является слишком «жестким» и обладает слабыми адаптивными свойствами. Любые изменения алгоритма требуют корректировки и отладки соответствующего программного модуля. Поэтому было решено использовать декларативное представление алгоритма, что позволяет выражать алгоритм на непроцедурном языке и хранить такое представление в базе данных (знаний). Это дает возможность технологам легко добавлять в базу данных (знаний) новые виды технологического оснащения или исправлять назначение уже имеющихся видов ТО.

Такой подход позволяет повысить адаптивные свойства САПР ТП и достаточно просто приспосабливать задачу назначения ТО под особенности конкретного предприятия без перепрограммирования алгоритмов назначение вида ТО. Достаточно просто реализовать принцип последовательного повышения уровня автоматизации, добавляя в базу данных (знаний) новые виды ТО лишь по мере необходимости.

Для каждого класса и подкласса ТО (по классификатору ЕСКД) выбираются три группы параметров:

- технологические параметры;
- геометрические параметры;
- экономические параметры.

В каждой группе параметров отбирают наиболее важные параметры, и для каждого подкласса по ЕСКД создают свою таблицу для выбора вида ТО. Из этих таблиц создается реляционная база данных. Принятие решения в этом случае выполняется

- в режиме диалога;
- с помощью SQL – запросов;
- с помощью универсального модуля поиска ТО.

Для выбора вида ТО в режиме диалога предложено использование иерархического меню, при котором на экран монитора выводится список подклассов ТО. Для выбранного подкласса выводится список групп и так далее, пока не будет выведен список видов ТО, из которого и делается окончательный выбор. Эта самая простая форма принятия решения, предполагающая хорошее знание ситуаций, в которых используется тот

или иной вид ТО. Кроме сценария, хранимого в базе и содержащего иерархическое меню, необходимо иметь библиотеку с графическими файлами для вывода эскизов с разновидностями конфигураций ТО. В этих же эскизах можно фиксировать и условия выбора разновидностей ТО. В результате поиска находится набор данных с типоразмерами ТО найденного вида.

Другой подход к поиску вида ТО основан на использовании SQL – запросов. Используются либо заранее созданные SQL – запросы, либо запросы, создаваемые пользователем с помощью конструкторов запросов, имеющихся в универсальных СУБД, что предполагает хорошее знание такого конструктора.

Универсальный модуль поиска ТО используется приложениями и предполагает наличие в базе знаний поисковых предписаний, выраженных либо в виде SQL – запроса, либо на специализированном непроцедурном языке запросов.

В отличие от работ [1, 2], в данной работе методика выбора вида оснащения реализована на основе PDM – системы типа «SmarTeam». Этот выбор обусловлен тем, что, с одной стороны, в работе исследуется применение PDM – системы, в частности, системы «SmarTeam», для автоматизации ТПП, а, с другой стороны, PDM – система имеет необходимый инструментарий, на основе которого возможно решение задачи поиска вида ТО. Основные особенности методики поиска вида объекта на основе PDM – системы заключаются в следующем:

- использован объектно-ориентированный подход к созданию базы данных для ТО, на базе которого создано иерархическое дерево классификационных объектов;
- в учетной карточке папок, отражающих классы, подклассы, группы и виды ТО, фиксируются атрибуты, по которым возможно проводить поиск вида объекта;
- разработаны стандартные запросы на поиск различных видов ТО и собраны в отдельную библиотеку;
- разработан ряд процедур для классификации ТО и обращения к папкам из приложений, решающих технологические задачи

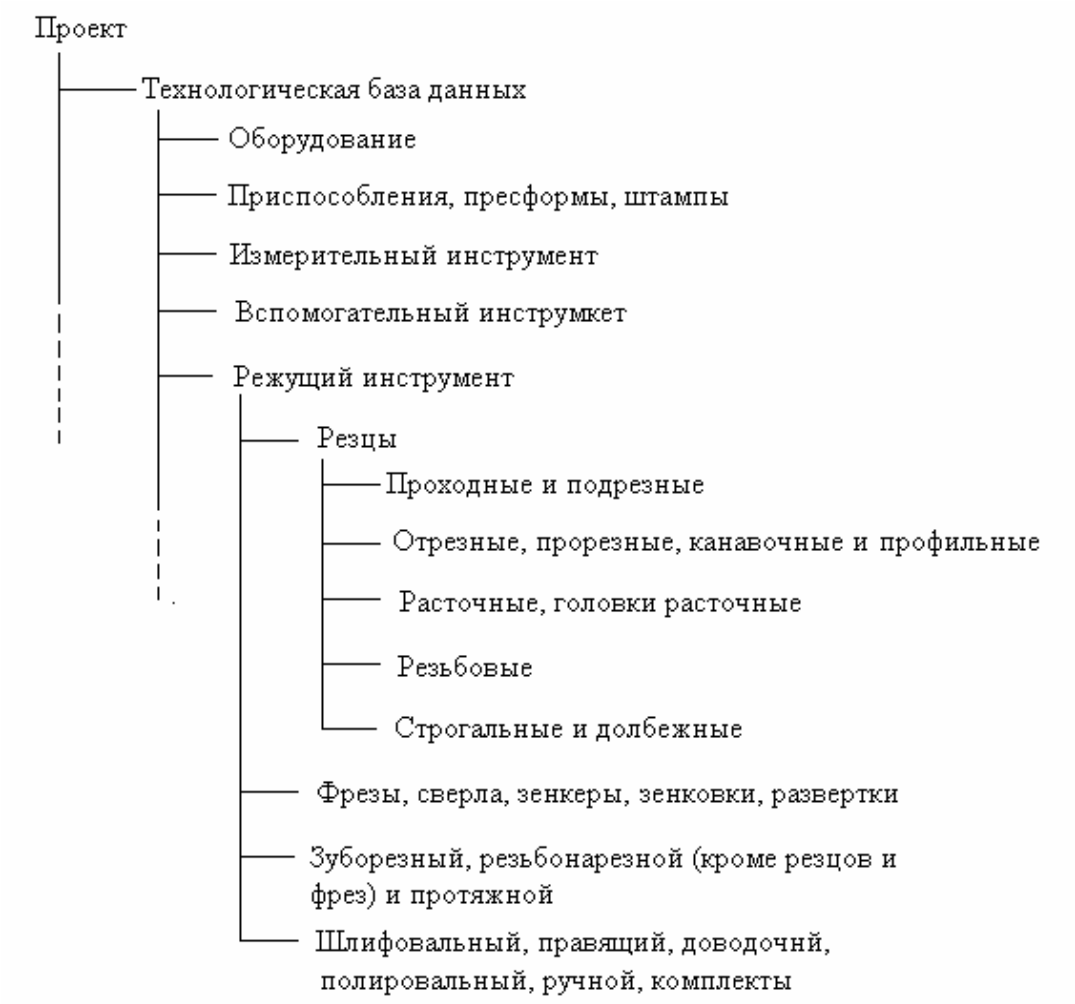
Рассмотрим указанные особенности методики поиска более подробно. На основе объектно-ориентированного подхода разработаны соответствующие классы и подклассы объектов ТО. В основу деления на подклассы, группы и виды положена классификация объектов ТО по классификатору ЕСКД. Базы данных включаются в дерево проекта самостоятельной ветвью. На рис. 1 показан пример конкретной ветви дерева проекта, у которой раскрыта часть папок.

Каждая классификационная единица выражается в виде папки, в учетной карточке которой фиксируются атрибуты, по которым возможно проводить поиск вида объекта. В этой же карточке фиксируется и приоритет объекта. Главным поисковым атрибутом является шестизначный код по классификатору ЕСКД.

Перечислим достоинства такого подхода к выбору вида оснащения:

- простота поиска вида оснащения в режиме диалога; поиск заключается в последовательном спуске по дереву проекта путем раскрытия соответствующих папок на экране дисплея;
- не нужна процедура классификации ТО и сценарий классификации;
- простота использования библиотеки с типовыми запросами на поиск;
- информация о классификационных объектах фиксируется в их учетных карточках, что позволяет осуществить поиск по атрибутам учетной карточки с помощью стандартных средств PDM – системы.

Как было указано выше, переход ко второму этапу поиска заключается в последовательном спуске по дереву проекта путем раскрытия соответствующих папок на экране дисплея. В результате находится вершина (папка), содержащая набор с информацией о конкретных объектах – возможно, эскиз вида объекта и другую необходимую информацию



.Рис. 1.Пример конкретной ветви дерева проекта

Второй этап выбора ТО. На этом этапе выбирается конкретный объект ТО для выбранного вида технологического оснащения:

$\Gamma_2 = < G_2 , V_2 , R_2 >$;

$V_2 = \{v_{2,i}\}$, i=1, n_2;

$R_2 = \{r_{2,j}\}$, j=1, m_2.

Принятие решения может быть сформулировано как получение образа соответствия от заданного входного множества $\{v_{2,i}\}$. Следовательно, множество полученных решений можно записать следующим образом:

$MR_2 = \Gamma_2(\{v_{2,i}\})$;

Полученное множество решений MR_2 содержит модели выбранных объектов ТО.

$MR_2 = \{r_{2,k}\}$; $r_{2,k} = < p_1, \ldots ,p_t, m, s >$;

где $p_1, \ldots , p_t$ – параметры выбранного объекта ТО; m – наименование объекта ТО; s – приоритет выбранного объекта ТО. Из найденных моделей объектов выбирается модель с наибольшим приоритетом:

$MR_2 \rightarrow r_{2,v}$, при $S_{v,\,max}$

Реализация второго этапа поиска может быть выполнена различными способами. Процедурная реализация соответствия Γ_2 обычно не применяется из-за переменных условий поиска.

В простейшем случае поиск выполняется путем прямого просмотра набора с информацией о конкретных объектах – например, просмотр набора с моделями оборудования выбранного вида или просмотр набора с типоразмерами режущего инструмента выбранного вида.

Для задания условий поиска могут использоваться конструкторы запросов, имеющиеся в универсальных СУБД, или специализированные диалоговые процедуры [1]. Типизация поисковых предписаний (ПП) достаточно сложна, однако возможна. Например, ПП для поиска сверла в наборе с типоразмерами сверл найденного вида может содержать выражение $D_s = d$, где D_s – обозначение поля с диаметрами сверл, а d – диаметр отверстия, которое необходимо сверлить. Если этот ПП выражен в виде SQL – запроса, то необходимо достать его из библиотеки типовых запросов и сделать подстановку: вместо d подставить значение диаметра отверстия, которое необходимо сверлить. Необходимость выполнения таких подстановок затрудняет использование типовых ПП для поиска конкретных объектов.

Применение PDM–системы для второго этапа поиска позволяет достаточно просто реализовать различные схемы поиска. Наличие большого количества процедур просмотра файлов дает возможность осуществить просмотр файлов с информацией о конкретных объектах независимо от того, с помощью какой СУБД это файл сформирован. При наличии типового запроса на поиск он выбирается из библиотеки и может быть легко отредактирован применительно к конкретной ситуации.

Рис. 2. Класс «Стандарт на технологическое оснащение» для каждой классификационной единицы

Формирование базы данных для ТО – трудоемкий процесс, который может затянуться на долгие месяцы, поэтому для ускорения этого процесса на первых этапах возможно сканирование стандартов на ТО и ввод полученных документов в базу данных. Поиск в наборах данных на первых этапах автоматизации поиска оснащения заменяется просмотром соответствующих стандартов на экране дисплея. Поэтому введен класс «Стандарт на технологическое оснащение» для каждой классификационной единицы (рис. 2). Папка этого класса содержит документы со стандартами ТО (ГОСТ, ОСТ, СТП, ТУ). Выбор классификационной единицы, на уровне которой необходимо поместить документ, зависит от содержания стандарта. Если, например, стандарт содержит информацию обо всех видах какой-либо группы ТО, то его размещают в папке группы ТО.

Третий этап выбора ТО. На третьем этапе выбранная модель объекта проверяется на возможность использования в конкретных условиях. Этот этап слабо формализо-

ван и выполняется обычно в режиме диалога. Если на этом этапе подтвердится возможность использования выбранной модели объекта для данной операции, то в дальнейшем обозначение объекта (оборудования, приспособления или инструмента) заносится в технологическую карту. Аналогичная методика выбора объектов может быть предложена для проката и материала. Соответствующая методика организация базы данных показана на рис. 3.

Рис. 3. Методика организация базы данных для третьего этапа

Отметим достоинства использования PDM – системы для организации баз данных и знаний:

- возможность организации базы данных в архитектуре «клиент-сервер»;
- объектно-ориентированный подход к организации базы данных позволяет эффективно организовать поиск видов объектов;
- наличие большого количества процедур просмотра файлов дает возможность осуществить просмотр файлов с информацией о конкретных объектах;
- удобный инструментарий поиска по запросам дает возможность создать библиотеку типовых запросов для поиска как видов объектов, так и конкретных объектов;
- наличие библиотеки процедур работы с деревом проекта дает возможность из приложений обращаться к дереву проекта и заносить, искать или выбирать любую информацию, содержащуюся в дереве проекта.

Важный класс информации, используемая для решения задач ТПП – это информация о припусках и режимах резания. В справочниках по припускам и режимам резания принятие решения осуществляется по таблицам со сложными условиями выбора.

Условия выбора решений в ТС достаточно сложны. Их трудно или невозможно выразить в виде SQL – запроса. Поэтому используется подход, основанный на разработке входного языка для записи С–таблиц и программного модуля интерпретирующего типа для их обработки. Этот модуль позволяет организовать базу знаний, содержащую С–таблицы, выбирать их из базы и принимать решение на основе обработки этих таблиц. Примером такого подхода может служить система проектирования технологических процессов «TechCard», у которой имеется модуль для обработки одно- и двухвходовых таблиц.

Заключение

В СПбГИТМО разрабатывается система работы с таблицами соответствий, получившая название «Табличный процессор» (ТаП), однако разработка этой системы еще не закончена, поэтому здесь не рассматривается. Необходимо заметить, что эта система также будет работать в среде PDM – системы типа «SmarTeam».

Литература

1. Технологическая подготовка ГПС. СПб: Машиностроение, 1987. 92 с.
2. Куликов Д.Д. Учебное пособие. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 1993. 28 с.

СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА С МНОГОФАЗНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ

В.А. Толмачев, В.В. Кротенко, М.В. Никитина

Совершенствование систем управления различными технологическими процессами, в том и числе и процессами импульсного электролиза, требует применения мощных источников электропитания с программируемой формой выходного параметра (напряжения или тока). Принципы построения энергетических подсистем таких источников для установок нестационарного электролиза, перспективные пути совершенствования их технических характеристик и методика параметрического синтеза аналоговых систем управления из условия обеспечения предельного быстродействия рассмотрены в работе [1, 2] и др.

Применение современной микропроцессорной техники в системе управления позволяет повысить надежность и снизить функциональную сложность источника. Актуальной является проблема приближения статических и динамических качеств цифровых систем управления источников тока программируемой формы с транзисторным ШИП к соответствующим качествам эталонных непрерывных систем предельного быстродействия.

В работе [3] изложена методика параметрического синтеза цифровой системы управления источника тока с одномодульным усилительно-преобразовательным устройством (УПУ) из условия обеспечения экспоненциального характера переходного процесса с постоянной времени T_m.

Заданный экспоненциальный характер переходного процесса и время реакции на скачок задающего воздействия $t_ф \approx 3T_m$ обеспечивается лишь при условии $I_{зад\,макс} \le I_{гр}$, где $I_{гр}$ – граничное значение амплитуды тока задания. С уменьшением T_m уменьшается и значение $I_{гр}$, и при $I_{зад\,макс} > I_{гр}$ широтно-импульсный преобразователь (ШИП) в процессе отработки скачка задающего воздействия входит в режим насыщения, поэтому увеличивается длительность и характер переходного процесса.

Повышение значения $I_{гр}$ возможно при использовании в системе управления многомодульного УПУ с многофазным принципом синхронизации ШИП, что позволяет повысить частоту пульсаций тока в нагрузке, не увеличивая частоту коммутации силовых ключей [2]. Вопросы выбора структуры системы управления источников с многомодульным УПУ рассмотрены в работе [4]. При незначительном разбросе параметров силовых цепей каналов УПУ может быть выбрана одноконтурная система управления со структурной схемой, представленной на рис/ 1. Система содержит N реверсивных ШИП, работающих на общую нагрузку резистивного характера R, и один контур регулирования тока нагрузки $i_н$. Каждый ШИП содержит силовой каскад мостового типа на четырех транзисторных ключах с напряжением питания $U_п$ и широтно-импульсный модулятор (ШИМ), осуществляющий коммутацию силовых ключей с постоянным периодом $T_к$ по несимметричному закону и обеспечивающий род модуляции первого рода (ШИМ1). Напряжение на нагрузке имеет вид импульсов с амплитудой $U_п$, относительной длительностью γ, пропорциональной величине выходного сигнала $u_у$ цифрового ПИ-регулятора тока и полярностью,

определяемой полярностью последнего. На входе регулятора осуществляется сравнение напряжения $U_{зад}$, пропорционального заданному значению тока нагрузки $I_{зад}$ и напряжения $u_{ос}$, поступающего с датчика тока ДТ с коэффициентом передачи $K_{дт}$ и пропорционального истинному значению тока нагрузки. В представленной структуре разделительные дроссели каналов с параметрами r, L осуществляют одновременно и сглаживание пульсаций токов каналов i_n.

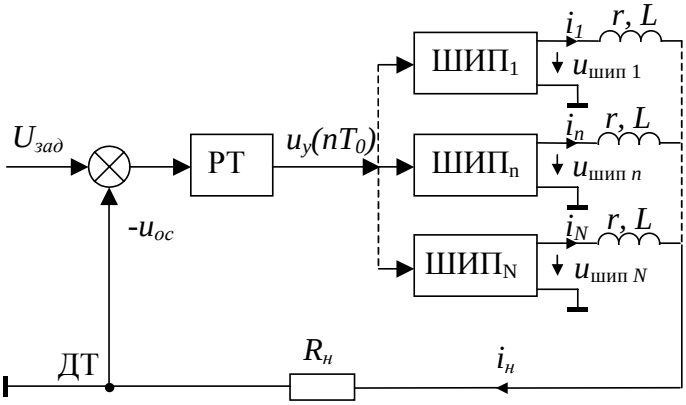


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы управления тока

В соответствие системе, представленной на рис. 1, можно поставить линейную модель первого приближения, составленную относительно усредненных гладких составляющих тока нагрузки $i_н$ и выходного напряжения ШИП, со структурной схемой, приведенной на рис. 2.

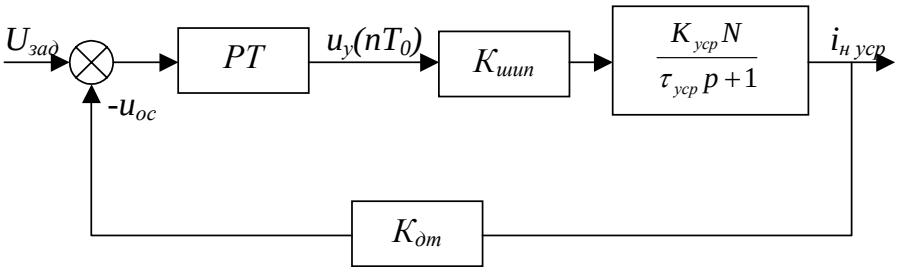


Рис. 2. Линейная модель цифровой системы управления тока

В представленной модели

$$K_{уср} = 1/(r + NR), \tag{1а}$$

$$\tau_{уср} = L/(r + NR), \tag{1б}$$

$$K_{ШИП} = U_n / U_{оп}, \tag{1в}$$

где $U_{оп}$ – амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИП. Процесс изменения тока в представленной на рис. 2 системе состоит из отрезков экспонент, характеризуемых на n-ом интервале управления выражением

$$i(t) = i(0)e^{-t/\tau_{уср}} + \left(1 - e^{-t/\tau_{уср}}\right)K_{ШИП}K_{уср}NU_y, \tag{2}$$

он может быть лишь приближен по характеру к требуемому экспоненциальному процессу с постоянной времени T_m

$$i_{зад}(t) = I_{зад\,макс}\left(1 - e^{-t/T_m}\right). \tag{3}$$

На рис. 3 представлены требуемый эталонный экспоненциальный процесс $i_э(t)$ и процесс в исследуемой системе $i(t)$ с периодом дискретности T_0, совпадающий с эталонным лишь в моменты времени $t = nT_0$ (n – целое число)

$$i(nT_0) = i_э(nT_0) \qquad (4)$$

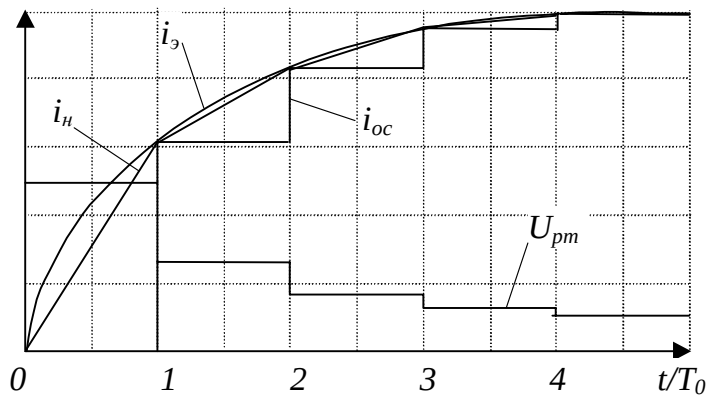


Рис. 3. Эталонный экспоненциальный процесс и процесс в исследуемой системе

Будем считать, что переходной процесс в исследуемой цифровой системе соответствует заданному качеству при отработке скачка задающего воздействия, если выполняется условие (4).

Представим уравнение (2) в дискретном виде

$$i(n+1) = A \cdot i(n) + B \cdot U_y(n), \qquad (5)$$

где $A = e^{-T_0/\tau_{уср}}$, $B = (1-A) \cdot K_{уср} \cdot N \cdot K_{шип}$, T_0 – период дискретности, в течение которого сигнал на выходе регулятора тока $U_y(n)$ остается неизменным. Будем искать управление в виде уравнения

$$U_y(n) = U_y(n\text{-}1) + \alpha \cdot \varepsilon(n) + \beta \cdot \varepsilon(n\text{-}1), \qquad (6)$$

соответствующего дискретному ПИ-регулятору [5], где $\varepsilon(n)$, $\varepsilon(n-1)$, $U_y(n)$, $U_y(n-1)$ – сигналы рассогласования и сигналы регулятора, вычисленные в дискретные моменты времени, а α, β – искомые параметры регулятора.

При выборе параметров α и β регулятора (9) на основании соотношений

$$\alpha = \frac{1}{K_{ШИП} \cdot K_{уср} \cdot N \cdot K_{дт}} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_m}}{1 - e^{-T_0/\tau_{уср}}}, \qquad (7а)$$

$$\beta = \frac{-e^{-T_0/T_m}}{K_{ШИП} \cdot K_{уср} \cdot N \cdot K_{дт}} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_m}}{1 - e^{-T_0/\tau_{уср}}}. \qquad (7б)$$

в рассматриваемой системе имеет место переходной процесс, удовлетворяющий условию (4). При $N = 1$ выражения (7) совпадают с выражениями (11) работы [3], определяющими параметры цифрового ПИ-регулятора тока одномодульного источника.

При реализации модулятора, осуществляющего широтно-импульсную модуляцию первого рода (ШИМ1) с периодом коммутации силовых ключей $T_к$, возможно формирование модуляции переднего фронта импульса (M=0), заднего фронта импульса (M=1) и, наконец, двухсторонней модуляции фронтов импульса (M=0,5). В первых двух случаях в квазистатическом режиме работы имеют место, соответственно, положительная или отрицательная статические ошибки [3].

Параметрический синтез указанной структуры при заданном периоде коммутации силовых ключей $T_к$ состоит в таком выборе числа модулей N, индуктивностей разделительных дросселей L и параметров цифрового ПИ-регулятора тока α и β, чтобы, с одной стороны, был обеспечен допустимый уровень пульсаций тока в нагрузке, а с другой – экспоненциальный переходной процесс с постоянной времени T_m при граничном значении тока задания $I_{гр} \geq I_{зад\,макс}$. Для решения поставленных задач необходимо рас-

полагать расчетными соотношениями, связывающими вышеперечисленные параметры между собой. Такие соотношения были получены в работе [2]:

$$\beta_L = \frac{r+R}{2Nr} \cdot \left[\ln \frac{r+R+\chi_{доп} \cdot (r+NR)}{r+R-\chi_{доп} \cdot (r+NR)} \right]^{-1}, \tag{8}$$

$$\beta_L = \frac{I_{макс}}{I_{з\,макс}} \frac{N \cdot (r+R)}{r} \cdot \left(\frac{T_m}{T_к} + M \right) - M \cdot \frac{r+NR}{r}, \tag{9}$$

где

$$I_{макс} = U_n / (R+r), \tag{10}$$

$$\chi_{доп} = 2\Delta I / I_{макс}, \tag{11}$$

$$\beta_L = L / (r \cdot T_к). \tag{12}$$

Приведенные расчетные соотношения составляют основу простой методики синтеза цифровой системы управления при заданных ее параметрах U_n, $U_{оп}$, r, R, $T_к$, T_0 и $k_{дт}$ и требованиях обеспечения $\Delta I_{доп}$, T_m, $I_{гр} = I_{зад\,макс}$. Методика состоит в следующем: рассчитываются $\chi_{доп}$ и $I_{макс}$, соответственно, по формулам (11) и (10); строятся зависимости β_L по формулам (8) и (9); по точке их пересечения находятся требуемые значения N и β_L (а, следовательно, и L); рассчитываются параметры регулятора по формулам (7) с учетом соотношений (1).

На рис. 4, а, б представлены переходные процессы в системе регулирования тока с параметрами: $U_n = 36$ В, $U_{оп}$=10 В, r=0.03 Ом, R=0.1 Ом, $T_к$=25 мкс, $k_{дт}$=0.1 В/А, $\Delta I_{доп}$=2.5 А, $T_m = T_к$, $I_{зад\,макс}$=50 А, N=2, L=22.5 мкГн (последние два определяются по предложенной выше методике), где $i_н$ – ток нагрузки, $i_э$ – эталонная кривая, i_1, i_2 – токи сглаживающих дросселей каналов, $u_{шип1}$, $u_{шип2}$ – выходные напряжения ШИП каналов, $u_{оп1}$, $u_{оп2}$ – опорные напряжения ШИП, $u_{рт}$ – выходной сигнал регулятора тока.

На рис. 4, а изображены процессы в системе с $T_0 = T_к$ и параметрами ПИ-регулятора α=0.895 и β=-0.693, определяющимися на основании соотношений (4). На рис. 4, б изображены процессы в системе с $T_0 = 0.5 \cdot T_к$ и параметрами ПИ-регулятора α=1,148 и β=-0.922, определяющимися на основании соотношений (4). Представленные переходные процессы близки к эталонному экспоненциальному процессу, отличаясь лишь на величину пульсаций тока в переходном и квазистатическом режимах, не превышающую допустимого значения. Длительность импульса каждого из ШИП в переходном процессе не превышает периода коммутации.

Приведенные методика позволяют выбирать параметры элементов энергетической и информационной подсистем из условия обеспечения заданного быстродействия при допустимом уровне пульсаций тока в нагрузке и заданной частоте коммутации силовых ключей при неизменных или мало меняющихся параметрах нагрузки и напряжения питания ШИП.

При сильном изменении параметров нагрузки и напряжения питания динамические характеристики в цифровой системе управления источника тока будут отличаться от расчетных. Заданное качество процессов в таких системах обеспечивается при построении ее по адаптивной схеме с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Конкурсного центра фундаментального естествознания (шифр гранта № А03-3.16-159).

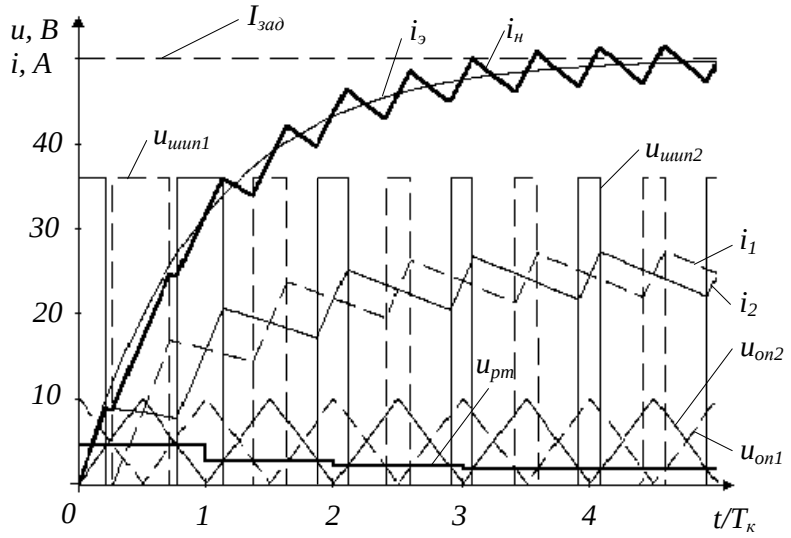


Рис. 4, а. Переходные процессы в системе при $T_0 = T_к$.

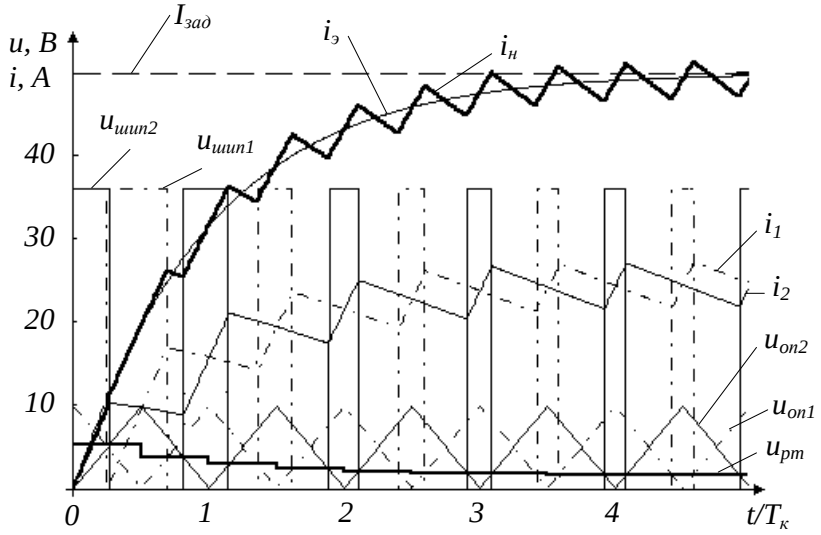


Рис. 4, б. Переходные процессы в системе при $T_0 = 0.5 \cdot T_к$.

Литература

1. Принципы построения и пути совершенствования технических характеристик мощных источников электропитания с программируемой формой выходного параметра. / В.А. Синицын, В.А. Толмачев, В.С. Томасов // Изв. вузов. Приборостроение.1996. Т.39, №4.С.47-54.
2. Методика синтеза систем управления мощных источников тока программируемой формы на основе транзисторных ШИП ./ В.А. Толмачев, В.В. Кротенко// Деп. в ВИНИТИ № 3789-В98. 18.12.98.
3. Цифровая система управления источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП./ В.А. Гурьянов, В.В. Кротенко // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). Выпуск 3. Физические процессы, системы и технологии точной механики. СПб: СПб ГУИТМО, 2001. С. 120-125.
4. Синтез системы управления источника тока с многоканальным питанием нагрузки. // Изв. вузов. Приборостроение. 1995. Т. 38, № 11-12. С.40-43.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления М.: Мир, 1984.

МЕТОДИКА ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ШИП-ДПТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМА РАБОТЫ

В.С. Томасов, П.А. Борисов

Современные электротехнические комплексы и системы с использованием импульсных устройств силовой электроники строятся на базе двух подсистем: энергоподсистемы и информационной подсистемы. Энергоподсистема включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового преобразователя и нагрузки и осуществляет обмен энергией между первичным источником питания и нагрузкой. В системах автоматизированного электропривода информационная подсистема обеспечивает управление как полупроводниковым, так и электромеханическим преобразователями, а также осуществляет реализацию заданного алгоритма регулирования координат электропривода.

Структуры замкнутых систем электропривода с транзисторными широтно-импульсными преобразователями (ШИП), определяющие построение информационной подсистемы, отличаются большим разнообразием, предельные же динамические возможности электропривода определяются исключительно параметрами энергетической подсистемы. Поэтому никакая информационная подсистема не может обеспечить требуемые моменты, скорости и ускорения двигателя, если они не заложены в энергетической подсистеме [1]. В унифицированных системах автоматизированного электропривода вопросы обеспечения требуемой динамики неразрывно связаны с вопросами эффективного и рационального построения энергоподсистемы. При этом важным является вопрос выбора способа использования энергии рекуперации (возврата), так как при проектировании он определяет состав энергоподсистемы.

Различные условия работы производственных механизмов обусловливают различные режимы работы электроприводов. На первом этапе проектирования основной задачей является выбор мощности электродвигателя, исходя из обеспечения заданного режима работы, при соблюдении нормального теплового режима и допустимой механической перегрузки двигателя [2]. В работе [3] было показано, что наиболее тяжелым режимом работы замкнутой системы электропривода на базе ШИП – двигатель постоянного тока (ДПТ) является режим периодического реверса скорости с токоограничением, который и будем рассматривать далее. В работе [4] получены законы изменения скорости и момента для этого режима, которые позволяют определить требуемую мощность двигателя. Для наглядного представления всех составляющих производимой в электродвигателе работы и средних мощностей на различных интервалах движения удобно использовать механические характеристики ДПТ в замкнутой системе регулирования скорости. Дополним двухосевую систему координат (скорость, момент) механических характеристик третьей осью – временем. Отсчет времени начнем в момент, когда двигатель вступает на интервал разгона. В каждый последующий момент времени точка в плоскости (скорость, момент) отражает рабочее состояние в системе. ДПТ последовательно проходит интервалы разгона, движения с установившейся скоростью и торможения. Тогда работа на любом интервале движения определяется как объем фигуры, ограниченной поверхностями, проходящими через кривую движения рабочей точки перпендикулярно плоскостям, образованным осями координат (рис. 1). Средняя мощность за интервал времени равна работе (объем фигуры), деленной на величину соответствующего интервала времени.

Следующей задачей на этапе проектирования является определение электромагнитных нагрузок на элементы полупроводникового преобразователя, которые определяются возмущающим воздействием, в качестве которого выступает ток питания.

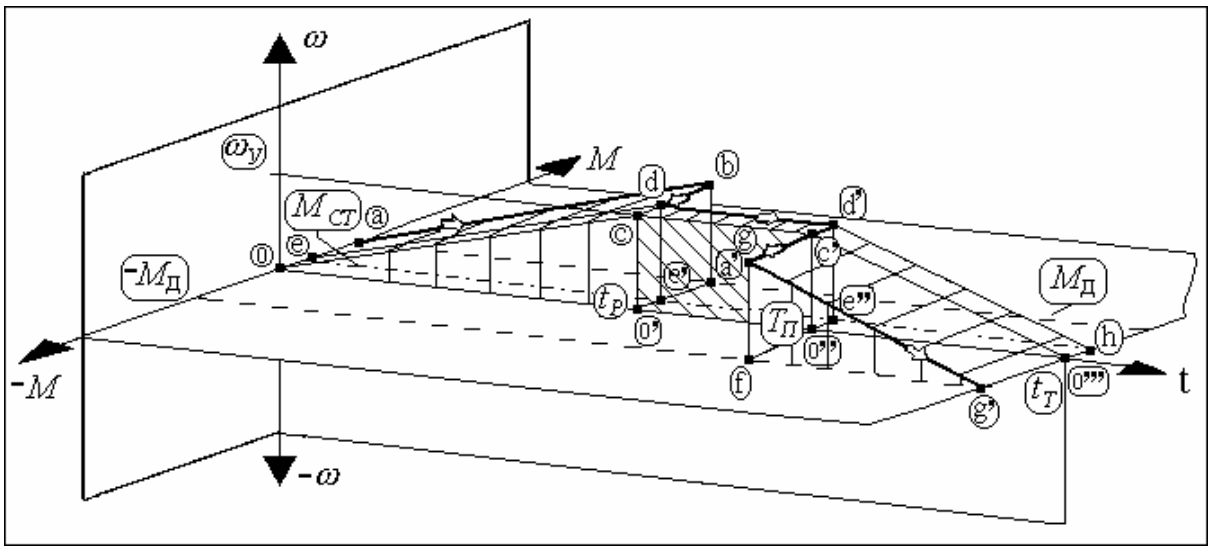


Рис. 1. Диаграмма производимой работы в замкнутой системе электропривода

Для решения указанной задачи ток питания удобно представить в виде ряда Фурье в форме:

$$i_П(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{n} A_k^{'} \sin(k\omega_П t) + \sum_{k=1}^{n} A_k^{''} \cos(k\omega_П t) = A_0 + \sum_{k=1}^{n} A_k \sin(k\omega_П t + \psi_k) \qquad (1)$$

где A_0, $A_k^{'}$, $A_k^{''}$, A_k –- коэффициенты ряда Фурье, $A_k = \sqrt{(A_k^{'})^2 + (A_k^{''})^2}$, $tg(\psi_k) = A_k^{''} / A_k^{'}$. Расчетные соотношения, связывающие коэффициенты ряда Фурье токового возмущения с режимами работы и параметрами всего электропривода, получены в работе [4]. Однако для придания методике универсальности их необходимо преобразовать. Время разгона, согласно [4]:

$$t_P = \frac{J\omega_У}{c_M^{'}(I_0 - I_{СТ})} = \frac{c_E^{'}\omega_У}{r_Я(I_0 - I_{СТ})} T_M = \frac{c_E^{'}\omega_У}{r_Я I_0(1-\alpha_{СТ})} T_M, \qquad (2)$$

где $r_Я$ – сопротивление обмотки якоря, I_0 – ток ограничения, $I_{СТ}$ – статический ток, $\alpha_{СТ} = I_{СТ} / I_0$, $c_M^{'}$ и $c_E^{'}$ – конструктивные коэффициенты, T_M – электромеханическая постоянная времени ДПТ. Время торможения определяется как

$$t_T = \frac{J\omega_У}{c_M^{'}(I_0 + I_{СТ})} = \frac{c_E^{'}\omega_У}{r_Я(I_0 + I_{СТ})} T_M = \frac{c_E^{'}\omega_У}{r_Я I_0(1+\alpha_{СТ})} T_M. \qquad (3)$$

Введем относительный коэффициент $K_{U/E} = r_Я I_0 / c_E^{'}\omega_У$, зависящий от типа ДПТ и параметров режима работы, и преобразуем (2), (3) к виду:

$$t_P = T_M / K_{U/E}(1-\alpha_{СТ}), \qquad (4)$$

$$t_T = T_M / K_{U/E}(1+\alpha_{СТ}), \qquad (5)$$

где $T_П = 1/f_П$, $f_П$ – частота реверса скорости. Введем также коэффициенты относительной продолжительности интервалов торможения и реверса:

$$K_{t_T/T_П} = t_T / T_П = 1/\{K_{U/E}(1+\alpha_{СТ})(T_П / T_M)\}, \qquad (6)$$

$$K_{t_{ПП}/T_П} = t_{ПП} / T_П = (t_T + t_P)/T_П = 2/\{K_{U/E}(1-\alpha_{СТ}^2)(T_П / T_M)\}. \qquad (7)$$

Очевидно, что основным требованием к замкнутой системе подчиненного регулирования является отработка заданного параметра. Условие для периода реверса, при котором заданный параметр (скорость) будет отработан, имеет вид

$$T_П \geq t_T + t_P = 2T_M / K_{U/E}(1-\alpha_{СТ}^2) \qquad (8)$$

или, с учетом (7),

$$K_{t_{ПП}/T_П} \le 1. \qquad (9)$$

Случаю, когда $K_{t_{ПП}/T_П} = 1$, соответствует «граничный» режим работы, при котором двигатель, пройдя интервалы торможения и разгона, сразу же вступает на новый этап реверса, т.е. интервал движения с установившейся скоростью отсутствует.

С учетом формул (4)–(7) получим систему уравнений для постоянных составляющих и амплитуд синусных и косинусных составляющих ряда Фурье токового возмущения на интервалах разгона, движения с установившейся скоростью и торможения.

$$(A_0)_P = K_I[\{1 + (1/2K_{U/E})\}(K_{t_{ПП}/T_П} - K_{t_T/T_П})], \qquad (10)$$

$$\begin{aligned}(A_k^{'})_P &= K_I[(1/\pi k)\{-\cos(2\pi k K_{t_{ПП}/T_П})\{(1/K_{U/E}) + 1\} + \cos(2\pi k K_{t_T/T_П})\} + \\ &+ \{(1-\alpha_{CT})/2(\pi k)^2\}\{\sin(2\pi k K_{t_{ПП}/T_П}) - \sin(2\pi k K_{t_T/T_П})\}(T_П/T_M)],\end{aligned} \qquad (11)$$

$$\begin{aligned}(A_k^{''})_P &= K_I[(1/\pi k)\{\sin(2\pi k K_{t_{ПП}/T_П})\{(1/K_{U/E}) + 1\} - \sin(2\pi k K_{t_T/T_П})\} + \\ &+ \{(1-\alpha_{CT})/2(\pi k)^2\}\{\cos(2\pi k K_{t_{ПП}/T_П}) - \cos(2\pi k K_{t_T/T_П})\}(T_П/T_M)],\end{aligned} \qquad (12)$$

$$(A_0)_У = K_I[\alpha_{CT}\{(1/K_{U/E}) + \alpha_{CT}\}(1 - K_{t_{ПП}/T_П})], \qquad (13)$$

$$(A_k^{'})_У = K_I[\{\alpha_{CT}((1/K_{U/E}) + \alpha_{CT})/\pi k\}(\cos(2\pi k K_{t_{ПП}/T_П}) - 1)], \qquad (14)$$

$$(A_k^{''})_У = K_I[\{-\alpha_{CT}((1/K_{U/E}) + \alpha_{CT})/\pi k\}\sin(2\pi k K_{t_{ПП}/T_П})], \qquad (15)$$

$$(A_0)_T = K_I[\{1 - (1/2K_{U/E})\}K_{t_T/T_П}], \qquad (16)$$

$$\begin{aligned}(A_k^{'})_T &= K_I[(1/\pi k)\{(1 - (1/K_{U/E})) - \cos(2\pi k K_{t_T/T_П})\} + \\ &+ \{(1+\alpha_{CT})/2(\pi k)^2\}\sin(2\pi k K_{t_T/T_П})(T_П/T_M)],\end{aligned} \qquad (17)$$

$$\begin{aligned}(A_k^{''})_T &= K_I[(1/\pi k)\sin(2\pi k K_{t_T/T_П}) + \{(1+\alpha_{CT})/2(\pi k)^2\}\cdot \\ &\cdot\{\cos(2\pi k K_{t_T/T_П}) - 1\}(T_П/T_M)],\end{aligned} \qquad (18)$$

где $K_I = r_Я I_0^2/\eta U_{ИП}$ в системе абсолютных единиц, в системе относительных единиц $\overline{K}_I = K_I/I_{KZ} = (1/\eta)(I_0/I_{KZ})^2$, $I_{KZ} = U_{ИП}/r_Я$, $U_{ИП}$ – напряжение в звене постоянного тока.

Выражения в квадратных скобках правых частей уравнений (10)–(18) представляют собой коэффициенты передачи соответствующих постоянных составляющих, синусных и косинусных составляющих токового возмущения. Полученные коэффициенты зависят только от трех относительных параметров: $T_П/T_M$, $K_{U/E}$, α_{CT}.

Оценивать действие токового возмущения можно по среднему и действующему (эффективному или среднеквадратичному) значению. Величина действующего значения тока питания определяется как

$$(I_П)_{RMS} = \sqrt{A_0^2 + \sum_{k=1}^{n} A_k^2/2}. \qquad (19)$$

Для определения действующего значения тока питания на каждом интервале (разгон, установившийся режим, торможение) необходимо произвести аналогичные действия с соответствующими составляющими тока питания. Графики функций коэффициентов передачи по току, которые получены аналогично формуле (19) с учетом 49 гармоник при «граничном» условии (9), для интервалов разгона, установившегося режима и торможения от относительных параметров $K_{U/E}$ и α_{CT} при величине $T_П/T_M = 10$, представлены на рис. 2.

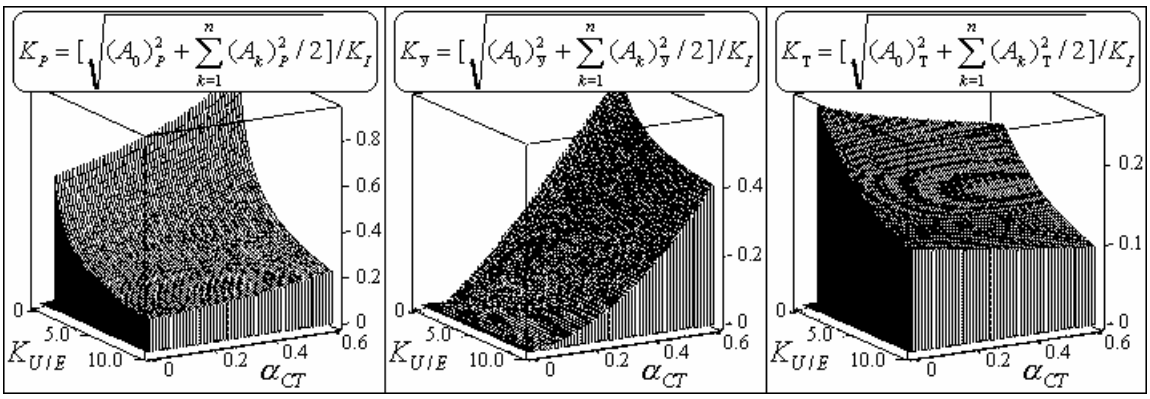


Рис. 2. Графики функций коэффициентов передачи по току: а) разгон, б) установившийся режим, в) торможение

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Чтобы привод мог тормозиться, должно быть гарантировано, что энергия торможения будет отведена. Поэтому необходимо избыточную энергию аккумулировать или преобразовывать в другую форму [5]. Принципиально существует четыре возможности:

- аккумулирование (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- использование тормозной цепи, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- рекуперация (возврат) энергии в сеть (использование электрической энергии другим пользователем);
- обмен энергией при многоосевом исполнении (использование энергии другими подключенными двигателями).

Располагая полученными выражениями для токового возмущения (10)–(18) в различных режимах работы замкнутой системы электропривода, можно произвести расчет электромагнитных нагрузок на все элементы энергоподсистемы. При этом характер электромагнитных нагрузок будет определяться цепью сброса энергии рекуперации, которая может иметь как пассивную, так и активную структуру [6].

В связи с тем, что конденсатор силового фильтра обладает конечной емкостью, применение способа, при котором энергия рекуперации запасается в конденсаторе, ограничено. Известно [7], что при эксплуатации конденсатора необходимо выполнять во всех режимах работы следующие условия:

- сумма постоянного напряжения и амплитуды переменной составляющей не должна превышать допустимого напряжения;
- амплитуда переменного напряжения не должна превышать значения напряжения, рассчитанного исходя из допустимой реактивной мощности;

Если электромагнитные нагрузки на конденсатор фильтра превышают допустимое значение, необходимо применять другие способы использования энергии рекуперации. Возврат энергии в сеть имеет то достоинство, что энергия торможения электропривода сохраняется как электрическая. Если энергия торможения невелика, то использование тормозной цепи может оказаться экономически более целесообразно, чем возврат энергии в сеть [5]. С другой стороны, зная частотный спектр токового возмущения, можно сформулировать требования к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) входной проводимости из условия ограничения пульсаций на конденсаторе силового фильтра. Для коррекции частотной характеристики используют одну или более корректирующих цепей, обладающих обратными частотными характеристиками [8]. Отметим, что в настоящее время, за счет создания и освоения промышленностью технологии изготовления сверхемких конденсаторов, область применимости способа, при

котором энергия рекуперации запасается в конденсаторе силового фильтра, может быть значительно расширена.

Заключая, можно сказать, что выбор наиболее эффективного способа использования энергии рекуперации при заданных условиях работы электропривода будет определяться, в конечном счете, требуемыми энергетическими, массогабаритными показателями энергоподсистемы и экономическими соображениями.

Статья выполнена при финансовой поддержке Министерства образования России в рамках работ по гранту А03-3.14-171.

Литература

1. Глазенко Т.А., Томасов В.С. Состояние и перспективы применения полупроводниковых преобразователей в приборостроении. // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39. № 3. с. 5.
2. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода. Учебник для вузов. / Изд. 5-е доп. и переработ. М.: Энергия, 1971. 432 с. с ил.
3. Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование электромагнитных процессов в силовой цепи замкнутой системы электропривода постоянного тока с ШИП. // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. V: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. 161 с.
4. Томасов В.С., Серебряков С.А., Борисов П.А. Электромагнитные процессы в силовой цепи источника питания транзисторного ШИП, работающего в замкнутой системе электропривода. // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 8. с. 42-50.
5. Практика приводной техники. Том 7. Сервоприводы. Основы, характеристики, проектирование. Издание 11/96. SEW Eurodrive.
6. Борисов П.А., Томасов В.С. Моделирование и анализ электромагнитных процессов в силовых цепях активных выпрямителей напряжения. // 5-ая Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение». МКЭЭЭ – 2003. Крым, Алушта. Часть I. с. 727-730.
7. Справочник по электрическим конденсаторам / М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др. Под общ. ред. И.И. Четверткова и В.Ф. Смирнова. М.: Радио и связь, 1983. 576 с.; ил.
8. Томасов В.С., Серебряков С.А., Борисов П.А. Анализ частотных характеристик обратимых источников питания транзисторных инверторов. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 3 (197). Физические процессы, системы и технологии точной механики / Главный редактор В. Н. Васильев. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. 226 с.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ИСТОЧНИКА ТОКА И ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

А.А. Усольцев, Д.В. Лукичев

Существует два основных способа управления асинхронными двигателями (АД). Наиболее часто в литературе разбирается способ, при котором асинхронная машина питается от источника электрической энергии с малым внутренним сопротивлением (источник ЭДС). При этом управляющее воздействие на электромагнитные процессы в АД и далее на электромеханические процессы осуществляется путем изменения амплитуды, частоты или фазы выходного напряжения источника питания (или его гладкой составляющей), т.е. образуется система управления АД с помощью напряжения (АДУН). Однако в современном автоматизированном приводе асинхронные двигатели зачастую питаются от силовых преобразователей электрической энергии импульсного типа. В большинстве случаев преобразователь охватывается обратной связью по току, образуя тем самым источник электрической энергии с бесконечно малой проводимостью, т.е. источник тока. При этом во всех режимах (генераторном, двигательном и тормозном) ток статора определяется только параметрами источника питания и в статическом режиме остается неизменным. Электромагнитные процессы в АД в этом случае протекают иначе, чем при питании от источника ЭДС, и для их понимания нужно рассмотреть некоторые детали и особенности. Включение АД в систему питания, в которой управляющее воздействие осуществляется изменением амплитуды, частоты или фазы выходного тока источника, соответствует токовому управлению АД или АД, управляемому током источника (АДУТ). Проведем сравнительный анализ механических характеристик асинхронной машины при использовании ее в системе АДУН и АДУТ.

Уравнения Кирхгофа, используемые для описания электромагнитных процессов в АД с параметрами обмотки ротора, приведенными к параметрам обмотки статора, составлены без учета типа источника питания, поэтому их можно использовать в обоих случаях.

$$\begin{aligned} &\underline{U}_1 = R_1\underline{I}_1 + jX_{1\sigma}\underline{I}_1 - \underline{E}_1 \\ &\underline{E}_2 = \underline{E}_1 = \frac{R_2}{s}\underline{I}_2 + jX_{2\sigma}\underline{I}_2 \,^{*} \\ &\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_m \end{aligned} \qquad (1)$$

Соответствующая этим уравнениям Т-образная схема замещения АД без учета магнитных потерь представлена на рис. 1.

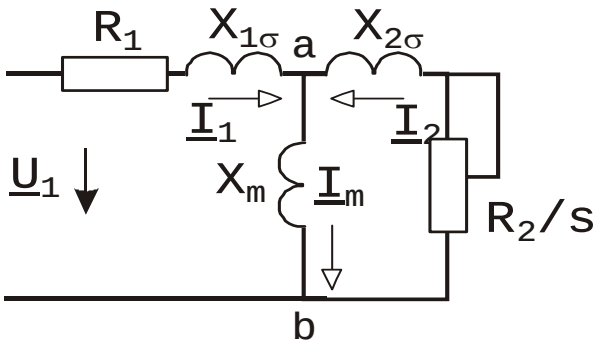


Рис. 1. Схема замещения АД без учета потерь в магнитопроводе.

* Здесь и далее в тексте для упрощения записи опущены апострофы приведённых величин.

АД при питании от источника напряжения (АДУН)

Для построения механической характеристики асинхронного двигателя (МХ АД) воспользуемся хорошо известной формулой М. Клосса, связывающей электромагнитный момент и скольжение АДУН [1]:

$$M = M_{\max} \cdot \frac{2 \cdot (1+c)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot c}, \tag{2}$$

где $s_k = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}$ – критическое скольжение, $X_k = X_{1\sigma} + X_{2\sigma}$ – полное индуктивное сопротивление короткого замыкания, $c = \frac{R_1}{R_2} \cdot s_k$ – переменная в формуле Клосса (при малых значениях скольжения, в области нормальных нагрузок ее обычно не учитывают), m_1 – число фаз статора, z_p – число пар полюсов. Тогда относительный момент АДУН будет выражаться следующим соотношением

$$\mu = 2 \cdot \frac{(1+c)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot c}. \tag{3}$$

Максимальный момент механической характеристики будет равен

$$M_{\max} = \pm \frac{z_p m_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi f_1 \cdot [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2}]}. \tag{4}$$

В области отрицательных и положительных скольжений он принимает разные значения, причем максимальный момент, развиваемый АДУН в генераторном режиме, по абсолютной величине превосходит аналогичный момент в двигательном режиме (рис 2 а).

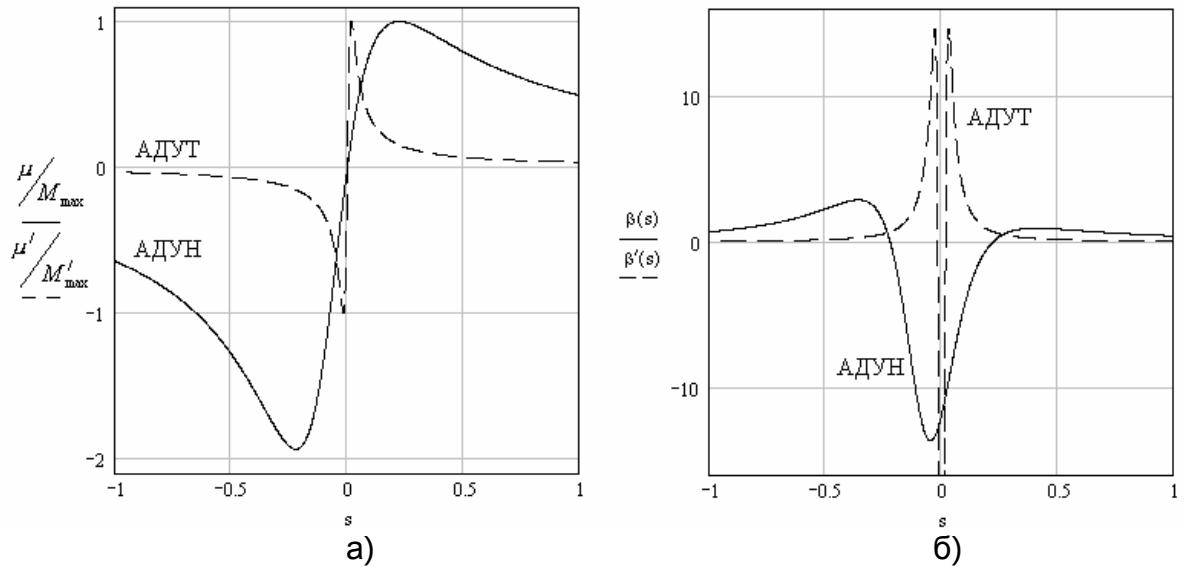


Рис. 2. Графики МХ АД а) и жесткости МХ АД б) на примере двигателя 4А112М4 (*Рн*=5.5 кВт) [2] при питании от различных источников.

Производная выражения (3) представляет собой жесткость МХ АДУН

$$\beta = \frac{d\mu}{ds} = 2 \cdot s_k \cdot (s_k^2 - s^2) \cdot \frac{(1+c)}{\left(s^2 + s_k^2 + 2 \cdot c \cdot s_k \cdot s\right)^2}. \tag{5}$$

Из рис. 2 б) видно, что жесткость МХ АДУН в области отрицательных и положительных скольжений сильно отличается. Причем отношение максимальных значений функции жесткости МХ АДУН, соответствующих генераторному и двигательному режимам АД, всегда больше единицы.

АД при питании от источника тока (АДУТ)

Определим электромагнитный момент АДУТ, воспользовавшись векторным представлением токов [3]

$$M^{/} = \frac{m_1}{2} z_p L_m \left| \underline{i}_2 \times \underline{i}_1 \right|, \tag{6}$$

где $\underline{i}_2$ и $\underline{i}_1$ – обобщенные векторы тока ротора и статора. После последовательных преобразований получаем

$$M^{/} = \frac{m_1}{2} z_p I_1^2 \frac{L_m^2}{L_{2\sigma} + L_m} \frac{2}{\frac{\rho}{\chi s} + \frac{\chi s}{\rho}} = M^{/}_{\max} \frac{2}{\frac{\rho}{\chi s} + \frac{\chi s}{\rho}}, \tag{7}$$

где $\sigma = \frac{X_{2\sigma}}{X_m}$ – коэффициент рассеяния ротора АД, $\chi = \frac{X_{2\sigma} + X_m}{X_m} = \frac{X_2}{X_m} = 1 + \sigma$, $\rho = \frac{R_2}{X_m}$ и $M^{/}_{\max} = \frac{m_1}{2} z_p I_1^2 \frac{L_m^2}{L_{2\sigma} + L_m}$ – максимальный момент АДУТ. Тогда относительный момент будет равен

$$\mu^{/} = \frac{2}{\frac{\rho}{\chi s} + \frac{\chi s}{\rho}}. \tag{8}$$

График МХ АДУТ представлен на рис. 2 а). В отличие от АДУН, асинхронный двигатель, питаемый от источника тока, имеет симметричную механическую характеристику в области положительных и отрицательных скольжений. Максимальный момент, который развивает АДУТ в генераторном и двигательном режимах, можно оценить по выражению (7). В отличие от максимального момента АДУН, максимальный момент АДУТ пропорционален квадрату тока статора. Многократное превышение значения максимального момента над пусковым говорит о трудностях, связанных с запуском АД, питаемого от источника тока.

Жесткость механической характеристики АДУТ получим, взяв производную $d\mu'/ds$:

$$\beta^{/} = \frac{d\mu^{/}}{ds} = \frac{2\left[1 - (\chi s/\rho)^2\right]\chi/\rho}{\left[1 + (\chi s/\rho)^2\right]^2}. \tag{9}$$

График жесткости МХ АДУТ приводится на рис 2 б). В силу симметрии МХ АДУТ максимальные значения жесткости в генераторном и двигательном режимах равны между собой и в несколько раз превышают аналогичные значения жесткости МХ АДУН. Также хорошо видно, что на участке устойчивой работы асинхронной машины жесткость МХ АДУТ по абсолютной величине больше жесткости МХ АДУН.

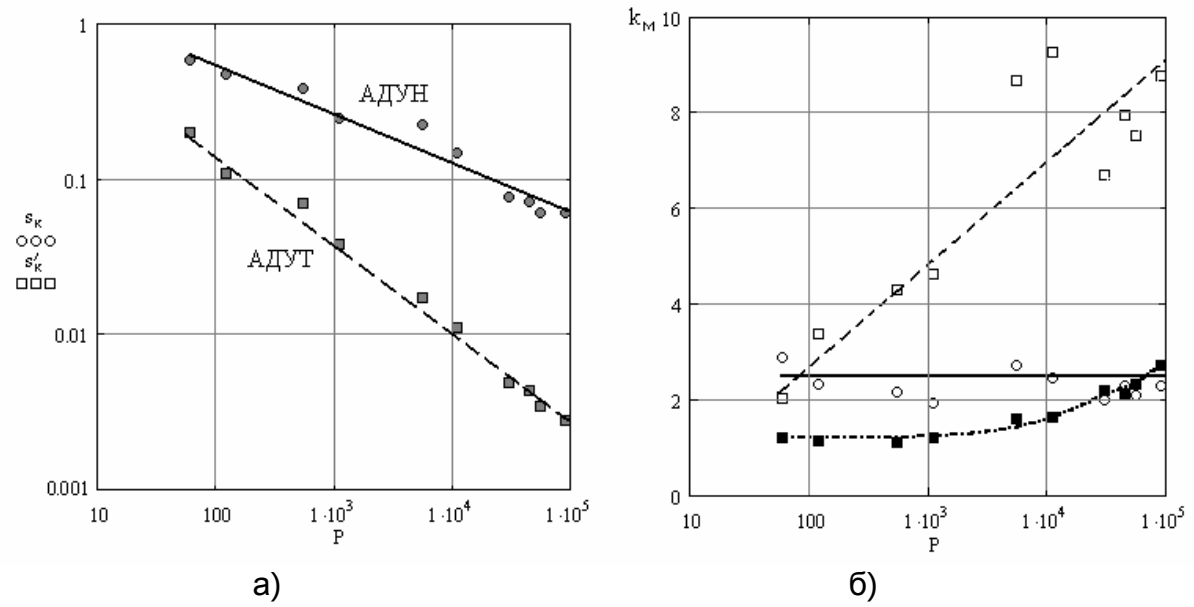
Приравнивая выражение (9) к нулю, мы получим условие экстремума, из которого найдем критическое скольжение

$$s_{\text{k}}^{/} = \pm\frac{\rho}{\chi} = \pm\frac{R_2}{X_2}. \tag{10}$$

Следовательно, относительный момент можем записать как

$$\mu' = \frac{2}{\frac{s'_k}{s} + \frac{s}{s'_k}}. \qquad (11)$$

Таким образом, критическое скольжение АДУТ существенно меньше, чем АДУН, так как $X_{1\sigma} << X_m \;\Rightarrow\; X_{1\sigma} + X_{2\sigma} \approx \sqrt{R_1^2 + \left(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}\right)^2} << X_m + X_{2\sigma}$.



а) б)

Рис. 3. Критическое скольжение машин серии 4А при питании от различных источников

а) перегрузочная способность АД серии 4А в режиме АДУН (——); АДУТ при номинальном токе (- · - · -) и при токе в режиме опрокидывания АДУН (------) б).

Определим теперь запас устойчивости АДУТ по выражению (7). Численно он выражается коэффициентом перегрузочной способности как отношение максимального электромагнитного момента к номинальному. Так как и максимальный, и номинальный моменты являются функциями относительного, то можно представить этот коэффициент в виде

$$k'_M = \frac{M'_{\max}}{M'_H} = \frac{1 + \left(\chi s'_{\text{н}} / \rho\right)^2}{2\chi s'_{\text{н}} / \rho}, \qquad (12)$$

где $s'_{\text{н}}$ – скольжение АДУТ в номинальном режиме.

Однако из предыдущего анализа нам известно, что АДУТ имеет существенно меньшее критическое скольжение, чем АДУН (рис. 3 а). Поэтому, если принять в качестве номинального скольжение в режиме АДУН, то может оказаться, что оно близко к критическому, и тогда коэффициент перегрузочной способности будет близок к единице. Найдем номинальное скольжение АДУТ из условия равенства номинальных моментов АДУТ и АДУН. Применим выражение (7) для номинального момента $M_{\text{н}}$ и выразим оттуда $s_{\text{н}}$. Наименьший из двух получившихся корней будет соответствовать номинальному режиму

$$s'_{\text{н}} = \frac{\rho}{2M_{\text{н}} L_2 \chi}\left[L_m^2 I_{1\text{н}}^2 z_p m_1 - \sqrt{L_m^4 I_{1\text{н}}^4 z_p^2 m_1^2 - 4M_{\text{н}}^2 L_2^2}\,\right]. \qquad (13)$$

На рис. 3 б) представлена кривая, построенная по выражениям (12), (13) в предположении равенства номинальных моментов АДУН и АДУТ. Если же учесть, что максимальный момент АДУН соответствует току статора, существенно превышающему номинальный, и предположить в АДУТ такое же соотношение токов, т.е. определить опрокидывающий момент АДУТ при токе $I_{1\text{кр}}$, равном току статора АДУН в режиме

опрокидывания, и соотнести его с моментом при номинальном токе $I_{1н}$, тогда запас устойчивости в первом приближении (с ошибкой в сторону занижения) будет равен отношению

$$k_M = \frac{I_{1кр}^2}{I_{1н}^2} .. \tag{14}$$

Ток статора, входящий в это выражение, можно определить из Г-образной схемы замещения как

$$I_{1кр} \approx I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s_к}\right)^2 + \left(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}\right)^2}} , \tag{15}$$

где $s_к = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + \left(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}\right)^2}}$.

Из данных, приведенных на рис. 3 б), следует, что увеличение тока статора АДУТ в функции момента на валу позволяет получить в этом режиме запас устойчивости, существенно превосходящий запас устойчивости в режиме АДУН. С помощью аналогичных выкладок можно доказать, что данное утверждение справедливо и для кратности пускового момента. Увеличение вращающего момента в АДУТ используют для быстрого разгона двигателей в разомкнутой системе управления путем повышения тока статора. Однако в общем случае обеспечение статической устойчивости в АДУТ возможно лишь в замкнутой системе управления.

Выводы

1. Механические характеристики машин серии 4А в режиме АДУТ на устойчивом участке имеют существенно большую жесткость и меньшее критическое скольжение.
2. При номинальном токе режим АДУТ не обеспечивает требуемого запаса устойчивости машин, однако при токах, соответствующих режиму опрокидывания АДУН, запас устойчивости, а также кратность пускового момента АДУТ существенно превышает АДУН.
3. Анализ полученных характеристик хорошо согласуется с известными данными теории и практики работы АД при питании от различных источников, а также с результатами моделирования в среде MatLab/Simulink.

Литература

1. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.II. Машины переменного тока. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: / Учеб. для вузов по спец. «Электромеханика». М.: Высш. шк., 1994.
3. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами / Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1982.

К АНАЛИЗУ ОСОБЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМОДУЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА С ИНДУКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

В.А. Толмачев, Д.В. Осипов

Разработан основанный на методе точечных отображений подход к анализу устойчивости САР тока с двухмодульным УПУ на базе индуктивного сглаживающего фильтра и транзисторного ШИП с многофазным принципом синхронизации ее модулей.

Актуальность исследования

Системы автоматического регулирования (САР), построенные на основе транзисторных широтно-импульсных преобразователей (ШИП) постоянного напряжения, находят широкое применение в современной преобразовательной технике. Одной из перспективных областей применения САР с ШИП являются мощные источники тока для установок нестационарного электролиза (УНЭ) [1]. Непрерывное повышение требований [2] к статическим и динамическим характеристикам таких источников ставит перед теорией САР новые, все усложняющиеся задачи. К ним в первую очередь относятся задачи синтеза и анализа САР.

Основной задачей синтеза САР тока для УНЭ является обеспечение в нагрузке (гальванической ванне) импульсов тока требуемой формы и поддержания ее в широких диапазонах возможных изменений параметров САР, в частности, самой нагрузки САР. Перспективны в этом отношении САР с N-модульными, где N – число модулей, усилительно-преобразовательными устройствами (УПУ) на базе транзисторных ШИП, построенные на основе одинаковых по структуре, соединенных параллельно друг другу и работающих на общую нагрузку модулей, каждый из которых состоит, в общем случае, из системы управления (СУ), ШИП и сглаживающего фильтра.

Существует большое множество структур САР с N-модульными УПУ, и все они могут быть классифицированы в зависимости от принципа синхронизации их модулей и от взаимного соотношения частот коммутации $f_к$ силовых ключей (СК) ШИП каждого из модулей следующим образом [3]: 1) модули САР работают синхронно, т.е. без сдвига фаз опорных напряжений их ШИП и на одной и той же частоте $f_к$ (синфазный принцип синхронизации модулей); 2) модули САР работают независимо друг от друга и на разных частотах $f_к$; 3) модули САР работают с перемежением во времени, т.е. с некоторым сдвигом фаз опорных напряжений их ШИП и на одинаковых частотах $f_к$ (многофазный принцип синхронизации модулей).

В первом случае N-модульная САР работает как одна «большая» одномодульная и характеризуется высоким уровнем амплитуды Δ пульсаций своего выходного параметра, например тока нагрузки, в квазиустановившемся режиме ее работы. Ярким примером подобных систем являются САР, построенные по принципу «ведущий − ведомый» или так называемые «master −slave» системы [4].

Во втором случае, как показано в работе [3], независимая работа N модулей позволяет снизить среднеквадратичную амплитуду пульсаций выходного параметра САР примерно в $N^{0.5}$ раз относительно Δ. Но наибольший эффект в этом отношении достигается в третьем случае, когда начальная фаза опорного сигнала ШИП каждого модуля САР сдвинута относительно начальной фазы соседнего модуля на величину $1/(Nf_к)$ [5], что позволяет снизить амплитуду пульсаций выходного параметра САР в N раз относительно Δ.

Необходимо отметить, что выбор конкретной структуры САР, а также значений ее параметров связан с решением ряда задач анализа САР, в частности, с задачей анализа ее устойчивости. Эта задача заключается в определении в пространстве парамет-

ров САР границ областей, в пределах которых обеспечивается нормальный режим (НР) ее работы. Нормальным для САР с ШИП является режим, в котором частота установившихся в ней колебаний равна $f_к$.

При эксплуатации или настройке САР возможны как незначительные, так и значительные изменения ее параметров, которые могут привести к нарушению ее устойчивости, в результате чего в ней возникают так называемые особые или ненормальные режимы ее работы. Характерными для САР с ШИП особыми режимами работы, в которых частота установившихся в ней колебаний не равна $f_к$, являются режим субгармонических автоколебаний и скользящий режим [6, 7]. Применительно к САР тока для УНЭ такие режимы относятся к нежелательным или даже опасным режимам работы САР. Таким образом, задача анализа устойчивости САР с ШИП является весьма актуальной и представляет как практический, так и теоретический интерес.

Если данная задача более или менее решена применительно к САР с одномодульными УПУ, то в отношении САР с *N*-модульными УПУ, как показывает обзор литературы, она остается открытой. Трудности здесь в первую очередь связаны с тем, что САР с ШИП вообще представляют собой нелинейные импульсные системы, где основными нелинейностями являются ограниченность длительностей импульсов на выходе ШИП, обусловленная возможностью насыщения ШИП, и нелинейность, свойственная самому принципу управления в системе с ШИП. Что же касается САР с *N*-модульными УПУ, то здесь возникает еще одна трудность, связанная с тем, что такие САР являются многосвязными системами, поскольку электромагнитные процессы в их модулях взаимосвязаны через нагрузку САР.

Отмеченные динамические особенности САР с *N*-модульными УПУ, а именно нелинейность, импульсность и многосвязность, не дают возможности представить их элементарными динамическими звеньями, что значительно затрудняет математическое описание процессов, протекающих в них. Разработка более или менее адекватных математических моделей таких САР, учитывающих все указанные их особенности и пригодных для анализа их устойчивости, также является актуальной задачей.

Методы исследования

К решению задачи анализа устойчивости САР с ШИП существует подход, основанный на их линеаризации (гармоническая линеаризация, усреднение переменных состояния, статистическая линеаризация) с последующим применением методов теории линейных САР и различных критериев их устойчивости (геометрический критерий Михайлова, алгебраические критерии Рауса и Гурвица, частотный критерий Найквиста). Но линеаризация имеет ряд существенных ограничений, связанных, в первую очередь, с тем, что получаемые математические модели САР с ШИП являются приближенными (методическая ошибка), что позволяет анализировать их устойчивость лишь «в малом». Более перспективен в этом отношении метод точечных отображений (МТО), разработанный академиком А.А. Андроновым [8]. МТО применительно к САР с ШИП позволяет учесть практически все их динамические особенности, в силу чего получаемые их математические модели в виде точечных отображений являются точными, что дает возможность анализировать их устойчивость как «в малом», так и «в большом».

Подход к решению задачи анализа устойчивости САР с ШИП, опирающийся на МТО, стал развиваться сравнительно недавно. К настоящему моменту времени в литературе приведено множество разработанных на его основе алгоритмов анализа устойчивости САР с ШИП, рассмотрены различные их структуры. Но все эти алгоритмы, как правило, ориентированы на САР лишь с одномодульными УПУ, а среди указанных

структур САР с N-модульными УПУ рассмотрена только «master − slave» [4], которая, как уже отмечено выше, работает как одна «большая» одномодульная.

Целью данной работы является разработка основанного на МТО подхода к анализу устойчивости САР с N-модульными УПУ на базе транзисторных ШИП с многофазным принципом их синхронизации. Поставленная цель потребовала решения задачи, связанной с формированием математических моделей таких САР в виде точечных отображений.

В качестве примера в данной работе рассматривается САР тока с двухмодульным УПУ, структурная схема и временные диаграммы работы которой в НР приведены на рис. 1 и 2 соответственно. САР содержит два модуля, работающих на общую нагрузку R резистивного характера, и одноконтурную СУ, состоящую из датчика тока (ДТ) с коэффициентом передачи $K_{дт}$, источника напряжения задания (ИНЗ) $U_з$ тока нагрузки и пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора тока (РТ) с коэффициентом передачи $K_п$ и постоянной времени интегрирования $T_и$. Каждый модуль содержит ШИП и индуктивный сглаживающий фильтр с индуктивностью L и активным сопротивлением r. ШИП каждого модуля состоит из блока транзисторных СК (БСК) мостового типа с напряжением питания U, формирователя управляющих импульсов (ФУИ), обеспечивающего несимметричный закон коммутации СК, компаратора (К), обеспечивающего широтно-импульсную модуляцию второго рода (ШИМ-2) с глубиной модуляции $M = 0.5$, и генератора опорного напряжения (ГОН) $u_о(t)$ треугольной формы с амплитудой $U_о$, периодом $T_к = 1/f_к$ и длительностями прямого и обратного ходов $T_п = MT_к$. Все структурные элементы и сигналы (рис. 1) первого и второго модулей, а также временные интервалы в пределах периода $T_к$ (рис. 2), соответствующие каждому из этих модулей, обозначены соответственно индексами “1” и “2”.

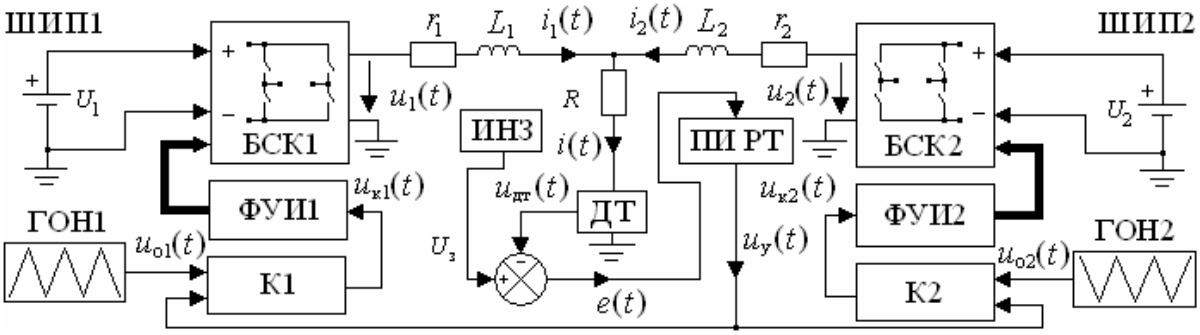
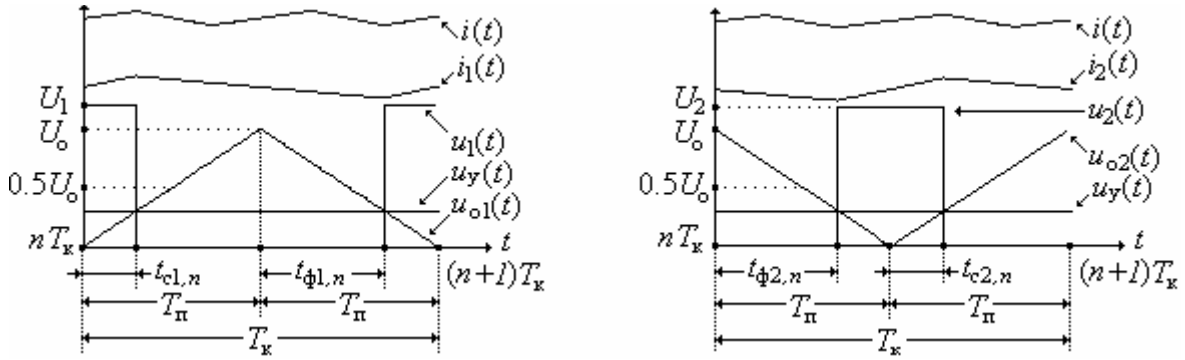


Рис. 1. Структурная схема САР



а) б)

Рис. 2. Временные диаграммы работы первого (а) и второго (б) модулей САР в нормальном режиме

РТ преобразует сигнал ошибки регулирования $e(t) = U_з - u_{дт}(t)$, где $u_{дт}(t) = K_{дт}i(t)$ − сигнал ДТ; $i(t) = i_1(t) + i_2(t)$ − ток нагрузки; $i_1(t)$ − ток первого, а $i_2(t)$ − ток второго модуля, в сигнал управления $u_у(t) = K_п e(t) + u_и(t)$, где $u_и(t)$ − интегральная его составляющая; $du_и(t)/dt = K_п e(t)/T_и$. Сформированный сигнал $u_у(t)$ сравнивается компараторами К1 и К2 с опорными сигналами $u_{о1}(t)$ и $u_{о2}(t)$, описываемыми соотношениями

$$u_{о1}(t) = t^{'}U_о / T_п;\ u_{о2}(t) = (T_п - t^{'})U_о / T_п \ \text{ при } (nT_к) \le t \le (nT_к + T_п);$$

$$u_{о1}(t) = (T_п - t^{'})U_о / T_п;\ u_{о2}(t) = t^{'}U_о / T_п \ \text{ при } (nT_к + T_п) \le t \le ((n+1)T_к),$$

где $t^{'} = \mathrm{mod}(t / T_к)$; mod − функция остатка от деления, в результате чего на выходах К1 и К2 формируются сигналы $u_{к1}(t)$ и $u_{к2}(t)$ соответственно в виде последовательностей однополярных импульсов с частотой следования $f_к$ и амплитудой, равной напряжению питания компараторов, обычно +5В. Затем ФУИ1 и ФУИ2 преобразуют сигналы $u_{к1}(t)$ и $u_{к2}(t)$ в импульсы, необходимые для управления БСК1 и БСК2, соответственно, и обеспечения несимметричного закона коммутации СК таким образом, что выходные импульсы ШИП1 $u_1(t)$ и ШИП2 $u_2(t)$ есть копии сигналов $u_{к1}(t)$ и $u_{к2}(t)$, но с амплитудами U_1 и U_2, соответственно, при этом срезы и фронты на n-ом периоде $T_к$ импульсов $u_1(t)$ формируются в конце интервалов времени $t_{с1,n}$ и $t_{ф1,n}$ (рис. 2, а), а импульсов $u_2(t)$ − в конце интервалов времени $t_{с2,n}$ и $t_{ф2,n}$ (рис. 2, б), соответственно.

Математическая модель САР в виде точечного отображения

Формирование модели САР основывается на рассмотрении процессов, протекающих в ней на каждом из интервалов n-ого периода $T_к$, в пределах которых ее структура остается постоянной. В зависимости от значений сигнала $u_у(t)$ в моменты равенства сигналов $u_{о1}(t)$ и $u_{о2}(t)$ друг другу можно выделить две последовательности таких интервалов. Первая из них, когда $u_у(nT_к + 0.5T_п) \le 0.5U_о$ и $u_у(nT_к + 1.5T_п) \le 0.5U_о$, состоит из интервалов

$$(nT_к) \le t \le (nT_к + t_{с1,n}),\ \text{где } u_1(t) = U_1;\ u_2(t) = 0\ ; \tag{1.1}$$

$$(nT_к + t_{с1,n}) \le t \le (nT_к + t_{ф2,n}),\ \text{где } u_1(t) = 0;\ u_2(t) = 0; \tag{1.2}$$

$$(n\,T_к + t_{ф2,n}) \le t \le (nT_к + T_п),\ \text{где } u_1(t) = 0;\ u_2(t) = U_2; \tag{1.3}$$

$$(n\,T_к + T_п) \le t \le (nT_к + T_п + t_{с2,n}),\ \text{где } u_1(t) = 0;\ u_2(t) = U_2; \tag{1.4}$$

$$(n\,T_к + T_п + t_{с2,n}) \le t \le (nT_к + T_п + t_{ф1,n}),\ \text{где } u_1(t) = 0;\ u_2(t) = 0; \tag{1.5}$$

$$(n\,T_к + T_п + t_{ф1,n}) \le t \le ((n+1)T_к),\ \text{где } u_1(t) = U_1;\ u_2(t) = 0; \tag{1.6}$$

а вторая, когда $u_у(nT_к + 0.5T_п) \ge 0.5U_о$ и $u_у(nT_к + 1.5T_п) \ge 0.5U_о$, – из интервалов

$$(nT_к) \le t \le (nT_к + t_{ф2,n}),\ \text{где } u_1(t) = U_1;\ u_2(t) = 0\ ; \tag{2.1}$$

$$(nT_к + t_{ф2,n}) \le t \le (nT_к + t_{с1,n}),\ \text{где } u_1(t) = U_1;\ u_2(t) = U_2; \tag{2.2}$$

$$(n\,T_к + t_{с1,n}) \le t \le (nT_к + T_п),\ \text{где } u_1(t) = 0;\ u_2(t) = U_2; \tag{2.3}$$

$$(n\,T_к + T_п) \le t \le (nT_к + T_п + t_{ф1,n}),\ \text{где } u_1(t) = 0;\ u_2(t) = U_2; \tag{2.4}$$

$$(n\,T_к + T_п + t_{ф1,n}) \le t \le (nT_к + T_п + t_{с2,n}),\ \text{где } u_1(t) = U_1;\ u_2(t) = U_2; \tag{2.5}$$

$$(n\,T_к + T_п + t_{с2,n}) \le t \le ((n+1)T_к),\ \text{где } u_1(t) = U_1;\ u_2(t) = 0. \tag{2.6}$$

В пределах каждого из интервалов последовательностей (1) и (2) процессы, протекающие в САР, описываются следующими векторно-матричными уравнениями:

$$d\mathbf{X}(t)/dt = \mathbf{AX}(t) + \mathbf{BU}(t);\ u_у(t) = \mathbf{CX}(t) + \mathbf{DU}(t), \tag{3}$$

где векторы и матрицы имеют вид

$$\mathbf{X}(t) = \left[i_1(t);\ i_2(t);\ u_и(t)\right]^{\mathrm{T}};\ \mathbf{U}(t) = \left[u_1(t);\ u_2(t);\ U_з\right]^{\mathrm{T}};$$

$$\mathbf{A}=-\begin{bmatrix}(R+r_1)/L_1 & R/L_1 & 0\\ R/L_2 & (R+r_2)/L_2 & 0\\ K_{\text{п}}K_{\text{дт}}/T_{\text{и}} & K_{\text{п}}K_{\text{дт}}/T_{\text{и}} & 0\end{bmatrix};\ \mathbf{B}=\begin{bmatrix}1/L_1 & 0 & 0\\ 0 & 1/L_2 & 0\\ 0 & 0 & K_{\text{п}}/T_{\text{и}}\end{bmatrix};\ \begin{cases}\mathbf{C}=\left[-K_{\text{п}}K_{\text{дт}};\,-K_{\text{п}}K_{\text{дт}};\,1\right];\\ \mathbf{D}=\left[0;\,0;\,K_{\text{п}}\right].\end{cases}$$

Рассмотрим последовательность (1). Формируя решения уравнений (3) на каждом из интервалов этой последовательности, а затем связывая их методом припасовывания, получаем промежуточное отображение на интервале $(nT_{\text{к}}) \le t \le (nT_{\text{к}} + T_{\text{п}})$:

$$\overline{\mathbf{X}}=\mathbf{F}(T_{\text{п}})\mathbf{X}+\mathbf{F}(T_{\text{п}}-t_{\text{c1}})\mathbf{V}(t_{\text{c1}})\mathbf{U}_{\text{ип}}+\mathbf{F}(T_{\text{п}}-t_{\text{ф2}})\mathbf{V}(t_{\text{ф2}}-t_{\text{c1}})\mathbf{U}_{\text{пп}}+\mathbf{V}(T_{\text{п}}-t_{\text{ф2}})\mathbf{U}_{\text{пи}};\quad (4.1)$$

$$t_{\text{c1}}=\text{fzero}(f_{\text{c1}}),\ \text{где}\ \ f_{\text{c1}}=\mathbf{C}(\mathbf{F}(t_{\text{c1}})\mathbf{X}+\mathbf{V}(t_{\text{c1}})\mathbf{U}_{\text{ип}})+\mathbf{D}\mathbf{U}_{\text{пп}}-t_{\text{c1}}U_{\text{о}}/T_{\text{п}};\quad (4.2)$$

$$t_{\text{ф2}}=\text{fzero}(f_{\text{ф2}}),\ \text{где}\ \ f_{\text{ф2}}=\mathbf{C}(\mathbf{F}(t_{\text{ф2}})\mathbf{X}+\mathbf{F}(t_{\text{ф2}}-t_{\text{c1}})\mathbf{V}(t_{\text{c1}})\mathbf{U}_{\text{ип}}+$$
$$+\mathbf{V}(t_{\text{ф2}}-t_{\text{c1}})\mathbf{U}_{\text{пп}})+\mathbf{D}\mathbf{U}_{\text{пп}}-(T_{\text{п}}-t_{\text{ф2}})U_{\text{о}}/T_{\text{п}};\quad (4.3)$$

и промежуточное отображение на интервале $(nT_{\text{к}} + T_{\text{п}}) \le t \le ((n + 1)T_{\text{к}})$:

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}}=\mathbf{F}(T_{\text{п}})\overline{\mathbf{X}}+\mathbf{F}(T_{\text{п}}-t_{\text{c2}})\mathbf{V}(t_{\text{c2}})\mathbf{U}_{\text{пи}}+\mathbf{F}(T_{\text{п}}-t_{\text{ф1}})\mathbf{V}(t_{\text{ф1}}-t_{\text{c2}})\mathbf{U}_{\text{пп}}+\mathbf{V}(T_{\text{п}}-t_{\text{ф1}})\mathbf{U}_{\text{ип}};\quad (5.1)$$

$$t_{\text{c2}}=\text{fzero}(f_{\text{c2}}),\ \text{где}\ \ f_{\text{c2}}=\mathbf{C}(\mathbf{F}(t_{\text{c2}})\overline{\mathbf{X}}+\mathbf{V}(t_{\text{c2}})\mathbf{U}_{\text{пи}})+\mathbf{D}\mathbf{U}_{\text{пп}}-t_{\text{c2}}U_{\text{о}}/T_{\text{п}};\quad (5.2)$$

$$t_{\text{ф1}}=\text{fzero}(f_{\text{ф1}}),\ \text{где}\ \ f_{\text{ф1}}=\mathbf{C}(\mathbf{F}(t_{\text{ф1}})\overline{\mathbf{X}}+\mathbf{F}(t_{\text{ф1}}-t_{\text{c2}})\mathbf{V}(t_{\text{c2}})\mathbf{U}_{\text{пи}}+$$
$$+\mathbf{V}(t_{\text{ф1}}-t_{\text{c2}})\mathbf{U}_{\text{пп}})+\mathbf{D}\mathbf{U}_{\text{пп}}-(T_{\text{п}}-t_{\text{ф1}})U_{\text{о}}/T_{\text{п}},\quad (5.3)$$

где fzero(y) – функция нуля некоторой нелинейной функции y; f_{c1}, f_{c2}, $f_{\text{ф1}}$ и $f_{\text{ф2}}$ – коммутационные функции; $\mathbf{F}(t) = \exp(\mathbf{A}t)$; $d\mathbf{V}(t)/dt = \mathbf{F}(t)\mathbf{B}$, а также приняты обозначения:

$$\mathbf{X}=\mathbf{X}(nT_{\text{к}});\ \overline{\mathbf{X}}=\mathbf{X}(nT_{\text{к}}+T_{\text{п}});\ \overline{\overline{\mathbf{X}}}=\mathbf{X}((n+1)T_{\text{к}});\ t_{\text{c1}}=t_{\text{c1},n};\ t_{\text{c2}}=t_{\text{c2},n};\ t_{\text{ф1}}=t_{\text{ф1},n};\quad (6.1)$$

$$t_{\text{ф2}}=t_{\text{ф2},n};\ \mathbf{U}_{\text{ип}}=\mathbf{U}(nT_{\text{к}})=\mathbf{U}(nT_{\text{к}}+T_{\text{п}}+t_{\text{ф1},n})=[U_1;\,0;\,U_{\text{з}}]^{\text{T}};\ \mathbf{U}_{\text{пп}}=\mathbf{U}(nT_{\text{к}}+t_{\text{c1},n})=$$
$$=\mathbf{U}(nT_{\text{к}}+T_{\text{п}}+t_{\text{c2},n})=[0;\,0;\,U_{\text{з}}]^{\text{T}};\ \mathbf{U}_{\text{пи}}=\mathbf{U}(nT_{\text{к}}+t_{\text{ф2},n})=\mathbf{U}(nT_{\text{к}}+T_{\text{п}})=[0;\,U_2;\,U_{\text{з}}]^{\text{T}}.\quad (6.2)$$

Следующим действием предполагается формирование модели САР в виде отображения $\overline{\overline{\mathbf{X}}}=h(\mathbf{X})$ путем подстановки (4) в (5). Но анализ процессов, протекающих в САР на n-ом периоде $T_{\text{к}}$, показал, что с качественной точки зрения при идентичности ее модулей, когда $r_1 = r_2 = r$, $L_1 = L_2 = L$ и $U_1 = U_2 = U$, на интервале $(nT_{\text{к}}) \le t \le (nT_{\text{к}} + T_{\text{п}})$ она ведет себя точно так же, как и на интервале $(nT_{\text{к}} + T_{\text{п}}) \le t \le ((n + 1)T_{\text{к}})$, если в пределах последнего условно переставить местами (знак ↔) и произвести замену (знак →):

$$i_1(t) \leftrightarrow i_2(t);\ u_1(t) \leftrightarrow u_2(t);\ t_{\text{c2}} \to t_{\text{c1}} \to t_{\text{c}};\ t_{\text{ф1}} \to t_{\text{ф2}} \to t_{\text{ф}};\ f_{\text{c2}} \to f_{\text{c1}} \to f_{\text{c}};\ f_{\text{ф1}} \to f_{\text{ф2}} \to f_{\text{ф}}.\quad (7)$$

Данное обстоятельство позволяет рассматривать в качестве НР работы САР режим, в котором частота установившихся в ней колебаний равна $1/T_{\text{п}}$, и, следовательно, в качестве ее модели при $u_{\text{у}}(nT_{\text{к}} + 0.5T_{\text{п}}) \le 0.5U_{\text{о}}$ и $u_{\text{у}}(nT_{\text{к}} + 1.5T_{\text{п}}) \le 0.5U_{\text{о}}$ использовать (4) и (5), которые с учетом (7) примут вид:

$$\overline{\mathbf{X}}=f_1(\mathbf{X})=\mathbf{F}(T_{\text{п}})\mathbf{E}\mathbf{X}+\mathbf{F}(T_{\text{п}}-t_{\text{c}})\mathbf{V}(t_{\text{c}})\mathbf{U}_{\text{ип}}+\mathbf{F}(T_{\text{п}}-t_{\text{ф}})\mathbf{V}(t_{\text{ф}}-t_{\text{c}})\mathbf{U}_{\text{пп}}+\mathbf{V}(T_{\text{п}}-t_{\text{ф}})\mathbf{U}_{\text{пи}};\quad (8.1)$$

$$t_{\text{c}}=\text{fzero}(f_{\text{c}}),\ \text{где}\ \ f_{\text{c}}=\mathbf{C}(\mathbf{F}(t_{\text{c}})\mathbf{E}\mathbf{X}+\mathbf{V}(t_{\text{c}})\mathbf{U}_{\text{ип}})+\mathbf{D}\mathbf{U}_{\text{пп}}-t_{\text{c}}U_{\text{о}}/T_{\text{п}};\quad (8.2)$$

$$t_{\text{ф}}=\text{fzero}(f_{\text{ф}}),\ \text{где}\ \ f_{\text{ф}}=\mathbf{C}(\mathbf{F}(t_{\text{ф}})\mathbf{E}\mathbf{X}+\mathbf{F}(t_{\text{ф}}-t_{\text{c}})\mathbf{V}(t_{\text{c}})\mathbf{U}_{\text{ип}}+$$
$$+\mathbf{V}(t_{\text{ф}}-t_{\text{c}})\mathbf{U}_{\text{пп}})+\mathbf{D}\mathbf{U}_{\text{пп}}-(T_{\text{п}}-t_{\text{ф}})U_{\text{о}}/T_{\text{п}},\quad (8.3)$$

где

$$\mathbf{E}=\begin{Bmatrix}\mathbf{1}\ \text{на интервале}\ \ (nT_{\text{к}})\le t\le(nT_{\text{к}}+T_{\text{п}})\\ \mathbf{1}''\ \text{на интервале}\ \ (nT_{\text{к}}+T_{\text{п}})\le t\le((n+1)T_{\text{к}})\end{Bmatrix};\ \mathbf{1}=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix};\ \mathbf{1}''=\begin{bmatrix}0&1&0\\1&0&0\\0&0&1\end{bmatrix};$$

f_1 – функция отображения; **1** – единичная матрица; **E** – матрица перехода между интервалами $(nT_к) \le t \le (nT_к + T_п)$ и $(nT_к + T_п) \le t \le ((n+1)T_к)$; $\mathbf{1}''$ – матрица перестановки координат $i_1(t)$ и $i_2(t)$ вектора состояния САР $\mathbf{X}(t)$.

Рассуждая аналогичным образом при рассмотрении последовательности (2), получаем с учетом (6) отображение при $u_у(nT_к + 0.5T_п) \ge 0.5U_о$ и $u_у(nT_к + 1.5T_п) \ge 0.5U_о$:

$$\overline{\mathbf{X}} = f_2(\mathbf{X}) = \mathbf{F}(T_п)\mathbf{E}\mathbf{X} + \mathbf{F}(T_п - t_ф)\mathbf{V}(t_ф)\mathbf{U}_{ип} + \mathbf{F}(T_п - t_с)\mathbf{V}(t_с - t_ф)\mathbf{U}_{ии} + \mathbf{V}(T_п - t_с)\mathbf{U}_{пи}; \tag{9.1}$$

$$t_ф = \mathrm{fzero}(f_ф), \text{ где } f_ф = \mathbf{C}(\mathbf{F}(t_ф)\mathbf{E}\mathbf{X} + \mathbf{V}(t_ф)\mathbf{U}_{ип}) + \mathbf{D}\mathbf{U}_{ии} - (T_п - t_ф)U_о / T_п; \tag{9.2}$$

$$t_с = \mathrm{fzero}(f_с), \text{ где } f_с = \mathbf{C}(\mathbf{F}(t_с)\mathbf{E}\mathbf{X} + \mathbf{F}(t_с - t_ф)\mathbf{V}(t_ф)\mathbf{U}_{ип} + \\ + \mathbf{V}(t_с - t_ф)\mathbf{U}_{ии}) + \mathbf{D}\mathbf{U}_{ии} - t_с U_о / T_п, \tag{9.3}$$

где $\mathbf{U}_{ии} = \mathbf{U}(nT_к + t_{ф2,\,n}) = \mathbf{U}(nT_к + T_п + t_{ф1,\,n}) = [U_1; U_2; U_з]^{\mathrm{T}}$; f_2 – функция отображения.

Исходя из принципа управления в системах с ШИП, длительности интервалов $t_с$ и $t_ф$ не могут быть отрицательными и ограничены «сверху» из-за возможности насыщения ШИП. Учтем это обстоятельство в (8) и (9) следующими неравенствами:

$$0 \le t_с \le T_п \;;\; 0 \le t_ф \le T_п. \tag{10}$$

Итак, математическая модель рассматриваемой САР в виде соотношений (8), (9) и (10) при абсолютной идентичности ее модулей представляет собой нелинейное, трехмерное и неоднозначное отображение вида $\overline{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X})$. Неоднозначность проявляется в том, что, во-первых, функция отображения f может принимать два значения, f_1 или f_2, и, во-вторых, матрица перехода **E** также может принимать два значения, **1** или $\mathbf{1}''$.

Подход к анализу устойчивости САР

Как было отмечено выше, задача анализа устойчивости заключается в определении в пространстве V параметров САР границ Γ областей, где обеспечивается нормальный режим ее работы. Он соответствует с позиций МТО однократной неподвижной точке отображения САР с координатами X_*, $t_{с*}$ и $t_{ф*}$. В общем случае эти координаты находятся в результате решения системы уравнений S, получаемой подстановкой $\overline{\mathbf{X}} = \mathbf{X} = \mathbf{X}_*$, $t_ф = t_{ф*}$ и $t_с = t_{с*}$ в уравнения, задающие отображение САР. Применительно к рассматриваемой САР такая подстановка в (8) и (9) из-за неоднозначности функции f приведет к двум системам уравнений:

$$S_1\colon \left\{\mathbf{X}_* = f_1(\mathbf{X}_*, t_{с*}, t_{ф*});\; f_с(\mathbf{X}_*, t_{с*}) = 0;\; f_ф(\mathbf{X}_*, t_{с*}, t_{ф*}) = 0\right\}; \tag{11.1}$$

$$S_2\colon \left\{\mathbf{X}_* = f_2(\mathbf{X}_*, t_{с*}, t_{ф*});\; f_ф(\mathbf{X}_*, t_{ф*}) = 0;\; f_с(\mathbf{X}_*, t_{с*}, t_{ф*}) = 0\right\}. \tag{11.2}$$

Поверхности Γ представляют собой совокупности точек в пространстве V, одной из координат которых является граничное значение $P_{гр}$ бифуркационного параметра САР P, вычисляемое как ноль некоторой нелинейной функции g, зависящей от P, т. е.

$$P_{гр} = \mathrm{fzero}(g, P_{гр0}); \;\; y = g(\mathbf{X}_*(P), t_{с*}(P), t_{ф*}(P), P), \tag{12}$$

где $P_{гр0}$ – начальное значение параметра P в окрестности $P_{гр}$.

Известный подход к построению поверхностей Γ для САР с одномодульными УПУ [9] основан на «сканировании» пространства V вдоль его координатной оси P и фиксации значения $P_{гр0}$ в момент изменения знака функции g. Применение этого подхода к анализу устойчивости рассматриваемой САР приводит к неопределенности в выборе подлежащей решению системы уравнений (S_1 или S_2) при расчете координат $X_*(P)$, $t_{с*}(P)$ и $t_{ф*}(P)$.

Предлагаемый подход позволяет разрешить эту неопределенность путем предварительного разбиения пространства V на области V_1 существования решений системы

уравнений S_1 и области V_2 существования решений системы уравнений S_2 посредством некоторых граничных поверхностей Γ_f.

Реализация подхода требует наличия расчетных соотношений, задающих координаты точек в пространстве V, образующих поверхности Γ_f. В качестве одной из этих координат принято значение P_f бифуркационного параметра P, соответствующее равенству решений систем S_1 и S_2. При этом условии после ряда преобразований из (11) получаем требуемое соотношение в виде:

$$P_f = \mathrm{fzero}(g_f, P_{f0});\ y = g_f(t_{c*}(P), t_{ф*}(P), P) = |t_{c*}(P)| - |t_{ф*}(P)|,$$

где P_{f0} – начальное значение параметра P в окрестности P_f, а координаты $t_{c*}(P)$ и $t_{ф*}(P)$ могут быть найдены в результате решения любой из систем уравнений, S_1 или S_2.

Результаты исследования и выводы

На рис. 3 приведена граничная поверхность Γ_f в пространстве параметров R, $U_з$ и $K_п$ для САР со следующими значениями остальных ее параметров $L_1 = L_2 = L = 33$ мкГн; $r_1 = r_2 = r = 0.03$ Ом; $U_1 = U_2 = U = 24$ В; $K_{дт} = 0.2$ В/А;$T_и = 0.1$ мс; $U_о = 10$ В; $f_к = 30$ кГц. В качестве бифуркационного параметра принято напряжение $U_з$.

Анализ поверхности Γ_f показывает, что параметр $K_п$ практически не влияет на ее кривизну, значит, при анализе устойчивости САР значение этого параметра можно задавать любым из диапазона $0.2 < K_п < 0.8$, в котором строилась эта поверхность, не опасаясь перехода значения бифуркационного параметра $U_з$ из области V_1 в область V_2 или обратно.

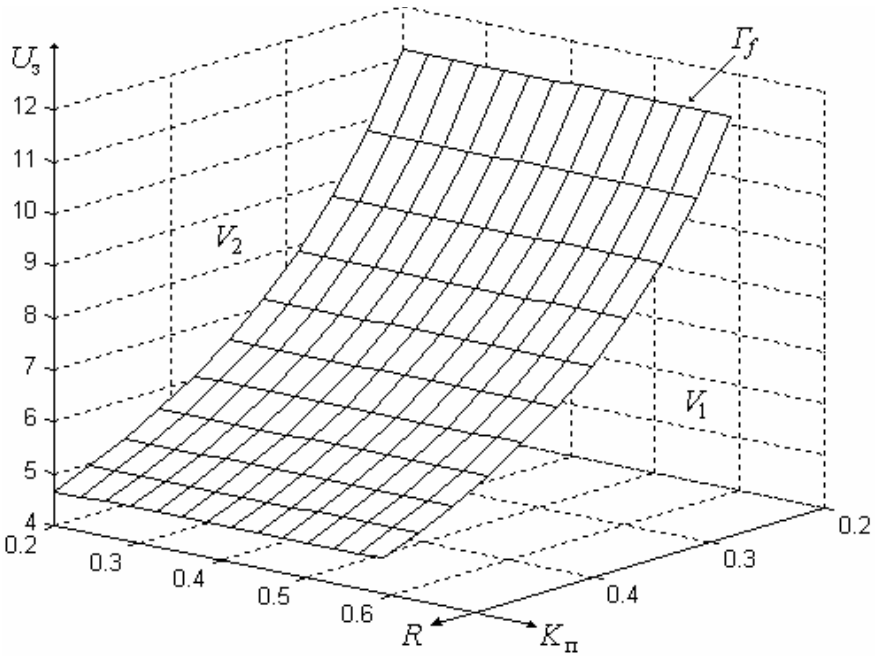


Рис. 3. Граничная поверхность Γ_f

Далее проводится анализ устойчивости рассматриваемой САР по алгоритму, приведенному, например, в той же работе [9], но уже не в пространстве V, а отдельно в его областях V_1 и V_2.

Литература

1. Костин Н.А., Кублановский В.С. Импульсный электролиз сплавов. Киев: Наукова думка, 1996. 207 с.
2. Синицын В.А., Толмачев В.А., Томасов В.С. Принципы построения и пути совершенствования технических характеристик мощных источников электропитания с произвольной формой выходного параметра // Известия вузов. Приборостроение. 1996. № 4. С. 47−54.
3. David J. Perreault, John G. Kassakian. Distributed Interleaving of Paralleled Power Converters. // IEEE Transactions on Circuits and Systems 1997. Part I. Vol. 44. № 8, pp. 728−734.
4. H. H. C. Iu, C. K. Tse. Bifurcation Behavior in Parallel-Connected Buck Converters. // IEEE Transactions on Circuits and Systems. February 2001. Part I. Vol. 48, No 2, pp. 233−240.
5. Толмачев В.А. Синтез системы управления многомодульного источника тока с индуктивным фильтром // Известия вузов. Приборостроение. 2001. № 3. С. 16−22.
6. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. И.М. Чиженко. Киев: Техника, 1978. 447 с.
7. Глазенко Т.А., Синицын В.А., Толмачев В.А. Сравнительный анализ динамических характеристик транзисторных широтно-импульсных преобразователей // Электротехника. 1988. № 3. С. 70−75.
8. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости / Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. М.: Наука, 1967. − 488 с.
9. Осипов Д.В. Программный комплекс для анализа устойчивости систем автоматического регулирования тока с широтно-импульсными преобразователями // Современные технологии: Сборник научных статей. Под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. СПб: Издательство СПбГИТМО (ТУ). 2002. С. 267−276.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В БАЗОВЫХ ОБЛАСТЯХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

В.В. Тогатов, П.А. Гнатюк

Предложен метод измерения времени жизни носителей заряда в базовых областях p^+-n-n^+ - структур, позволяющий производить измерения времен жизни, начиная с единиц наносекунд. Разработанная методика предусматривает такую же форму измерительного импульса тока, какая используется при стандартных измерениях времен восстановления диодных структур.

При измерении времени жизни носителей заряда в базовых областях p^+-n-n^+ – структур в качестве информативного параметра обычно используют либо длительность фазы высокой обратной проводимости (интервал рассасывания) [1–3], либо скорость спада послеинжекционной Э.Д.С. [4]. В первом случае через структуру пропускают прямоугольные импульсы прямого и обратного токов, регистрируя длительность интервала рассасывания. При этом время перехода тока с прямого на обратный должно быть на порядок меньше самого измеряемого интервала. Во втором случае через структуру пропускают прямоугольный импульс прямого тока и регистрируют спад послеинжекционной Э.Д.С. сразу после снятия импульса тока. Использование указанных методик становится проблематичным, если измеряемые времена жизни составляют единицы или десятки наносекунд. Это связано с тем, что при наносекундной коммутации тока в реальных измерительных приборах длительность переходных процессов, обусловленных паразитными параметрами (барьерной емкостью диода, индуктивностью зажимного устройства и т.д.), превосходит измеряемые временные интервалы. Вместе с тем разработка новых типов быстродействующих высоковольтных структур на основе кремния и особенно арсенида галлия требует регистрации именно таких величин времен жизни.

В данной работе дано обоснование методики, позволяющей производить измерение времен жизни носителей заряда, начиная с единиц наносекунд. Методика ориентирована на использование стандартной аппаратуры, предназначенной для измерения времен восстановления диодных структур.

Обоснование методики измерения

Схематическое изображение p^+-n-n^+ – структуры показано на рис. 1.

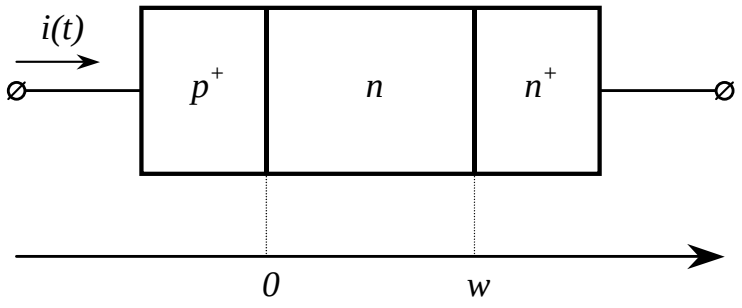


Рис. 1 Схематическое изображение p^+-n-n^+ – структуры

В качестве информативного параметра будем использовать длительность фазы высокой обратной проводимости (интервал рассасывания). Форма измерительного импульса тока приведена на рис. 2. Такая же форма тока используется при стандартных измерениях времени восстановления диодов t_{rr}.

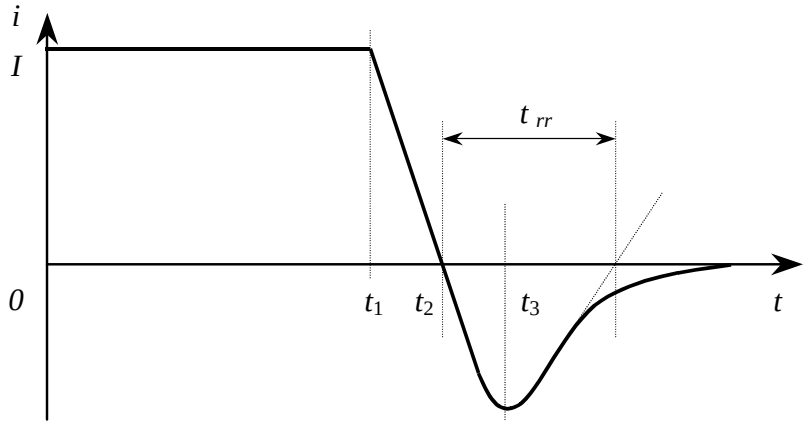


Рис. 2 Форма измерительного импульса тока

Вплоть до момента t_1 через p^+-n-n^+ – структуру проходит импульс прямого тока I, приводящий к установлению стационарного распределения концентрации дырок в базе. В момент t_1 начинается линейный спад тока. К моменту t_2 ток уменьшается до нуля и начинается интервал рассасывания, который заканчивается в момент обеднения p-n – перехода t_3. Очевидно, что при данной форме тока коммутация тока, во-первых, не является мгновенной и, во-вторых, начало коммутации отстоит от момента измерения на интервал $t_2 - t_1$. Длительность интервала рассасывания $t_{рас} = t_3 - t_2$ и является исследуемой функцией времени жизни дырок в базе. Таким образом, обоснование метода измерения связано с анализом нестационарной концентрации дырок в базе на этапе линейного спада тока.

Движение дырок в базе описывается нестационарным уравнением непрерывности

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p}{L_p^2} = \frac{\tau_p}{L_p^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}, \tag{1}$$

где τ_p и L_p – время жизни и диффузионная длина дырок, соответственно. Граничные условия задачи могут быть сформулированы из условия односторонней инжекции носителей из p^+ и n^+ – областей в область базы:

$$-\frac{\partial p}{\partial x}(0) = \frac{i(t)}{2qD_p}, \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}(w) = \frac{i(t)}{2bqD_p}. \tag{3}$$

В этих выражениях $i(t)$ – плотность тока, q – заряд электрона, D_p – коэффициент диффузии дырок, b – отношение подвижностей электронов и дырок. При выводе граничных условий (2) и (3) уровень инжекции в базе предполагался высоким. Так как начало процесса измерения выбрано совпадающим с фронтом измерительного импульса тока $t = 0$ (рис. 2), то начальное условие задачи – нулевое:

$$p(x,0) = 0. \tag{4}$$

Окончание интервала рассасывания соответствует снижению избыточной концентрации дырок у перехода до нуля, $p(0,t_3) = 0$. Поэтому при анализе уравнения непрерывности нас интересует только нестационарная концентрация дырок у перехода

$p(0,t)$. Решение уравнения непрерывности (1) с граничными условиями (2) и (3) и начальным условием (4), выполненное посредством преобразования Лапласа, приводит к следующему изображению концентрации дырок у перехода:

$$P(0,s)=\frac{I(s)(b\,\mathrm{ch}\,kw+1)}{2bqD_p k\,\mathrm{sh}\,kw}, \tag{5}$$

где $I(s)=\frac{I}{s}-\frac{a}{s^2}\ell^{-st_1}$ – изображение плотности тока, показанного на рис. 2, $a=\frac{di}{dt}$ – скорость перехода тока с прямого на обратный, $k=\frac{1}{L_p}\sqrt{1+\tau_p s}$.

Изображение (5) имеет кратный полюс в точке $s = 0$, а также простые полюса в точках $s=-\frac{1}{\tau_p}$ и $s_n=-\frac{1}{\tau_p}\left[1+\left(\frac{\pi n}{W}\right)^2\right]$, где $n = 1, 2, \ldots$, $W=w/L_p$ – нормированная ширина базы. Определяя сумму вычетов во всех особых точках, найдем нестационарную концентрацию дырок у перехода

$$p(0,t)=\frac{L_p}{2bqD_p}\left[F_1(t)+F_2(t)\right]. \tag{6}$$

Функция $F_1(t)$, определяемая вычетом в кратном полюсе, имеет вид

$$F_1(t)=\frac{b\,\mathrm{ch}W+1}{\mathrm{sh}W}\left[I-a(t-t_1)+\frac{a\tau_p}{2}(1+W\,\mathrm{cth}W)-\frac{ab\tau_p}{2}\cdot\frac{W\,\mathrm{sh}W}{b\,\mathrm{ch}W+1}\right]. \tag{7}$$

Функция $F_2(t)$ определяется суммой вычетов во всех простых полюсах и может быть представлена в виде

$$F_2(t)=-\frac{b+1}{W}\left(I\ell^{-\frac{t}{\tau_p}}+a\tau_p\ell^{-\frac{t-t_1}{\tau_p}}\right)-2\sum_{n=1}^{\infty}\left[b(-1)^n+1\right]\cdot\left[-\frac{(-1)^n I}{s_n\tau_p W}\ell^{s_n t}+\frac{(-1)^n a}{s_n^2\tau_p W}\ell^{s_n(t-t_1)}\right]. \tag{8}$$

В выражениях (7) и (8) $t > t_1$.

Проанализируем функции $F_1(t)$ и $F_2(t)$ при следующих допущениях. Во-первых, будем считать, что $t_1 \gg \tau_p$. Это условие всегда реализуется при проведении измерений. При этом в выражении (8) можно пренебречь первым слагаемым в круглых скобках, а также первым слагаемым во вторых квадратных скобках под знаком суммы. Во-вторых, будем полагать, что выполняется неравенство $W > 3$. Это условие заведомо выполняется у высоковольтных диодов с малыми временами переключения. В этом случае в функциях $F_1(t)$ и $F_2(t)$ $\mathrm{cth}W\approx 1$, $\mathrm{csch}W\approx 0$, в результате чего выражение $p(0,t)$ принимает вид

$$p(0,t)\approx\frac{aL_p}{2qD_p}\cdot\left[\frac{I}{a}-(t-t_1)+\frac{\tau_p}{2}-\frac{(b+1)\tau_p}{bW}\ell^{-\frac{t-t_1}{\tau_p}}-\frac{2}{b\tau_p W}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{b+(-1)^n}{s_n^2}\ell^{s_n(t-t_1)}\right]. \tag{9}$$

Напомним, что $s_n=-\frac{1}{\tau_p}\cdot\left[1+\left(\frac{\pi n}{W}\right)^2\right]$. Полагая в (9) $p(0,t_3)=0$, получим трансцендентное уравнение, определяющее момент обеднения перехода t_3. При этом t_3 в полученном уравнении присутствует только в комбинации $t_3 - t_1$, которую обозначим через Δt. Из рис. 2 следует, что интервал $\Delta t = t_3 - t_1$ включает время спада тока до нуля $t_{\text{сп}}=t_2-t_1=I/a$ и собственно интервал рассасывания $t_{\text{рас}} = t_3 - t_2$

$$\Delta t=t_3-t_1=\frac{I}{a}+t_{\text{рас}}. \tag{10}$$

С учетом (10) уравнение, определяющее $t_{\text{рас}}$, принимает вид

$$t_{\text{рас}} = \frac{\tau_p}{2} \cdot \left[1 - \frac{b+1}{b} \frac{2}{W} \ell^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} - \frac{4}{bW} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b + (-1)^n}{(s_n \tau_p)^2} \ell^{s_n \Delta t} \right]. \quad (11)$$

Быстрая сходимость ряда в (11) очевидна. Определим условие, при котором в (11) можно пренебречь всеми членами ряда, начиная с первого, по сравнению со вторым слагаемым. Отношение второго слагаемого к первому члену ряда при условии $W = \pi$ оказывается равным $[2(b+1)/(b-1)]\exp(\Delta t/\tau_p)$. Для приборов на основе GaAs, у которых $b \gg 1$, первый член ряда не превысит 2,5 % от второго слагаемого, если $\Delta t/\tau_p \geq 3$. У приборов на основе кремния при $\Delta t/\tau_p = 3$ эта величина еще меньше и составляет 1,25 %. Таким образом, условием, при котором можно заведомо пренебречь всеми членами ряда, является

$$\Delta t/\tau_p \geq 3. \quad (12)$$

Теперь оценим величину второго слагаемого в (11) по сравнению с первым при условии $\Delta t/\tau_p = 3$. Полагая, как и в предыдущем случае, $W = \pi$, найдем, что у приборов на основе GaAs величина второго слагаемого оказалась равной 0,03, а у приборов на основе кремния – 0,043. Таким образом, при выполнении условия (12) с погрешностью, не превышающей 5 %, величину времени жизни дырок в базе можно определять из соотношения

$$\tau_p = 2t_{\text{рас}}. \quad (13)$$

Выполнение условия (12) при проведении измерений не представляет трудностей и реализуется за счет выбора соответствующей величины $a = di/dt$. Например, если τ_p = 0,2 μs и измерение осуществляется при прямом токе 10 A, то $\Delta t = 3\tau_p$ = 0,6 μs может быть получено, если di/dt составит 20 A/μs. При уменьшении прямого тока до 5 A величина $\partial i/\partial t$ должна быть уменьшена до 10 A/μs. При этом имеется в виду, что в обоих случаях величина интервала рассасывания одинакова и равна $\tau_p/2$ = 0,1 μs.

Рассмотренный пример не означает, что при каждом изменении тока или значения τ_p следует изменять величину di/dt. При исследовании определенного типа приборов устанавливается минимальная величина di/dt, которая гарантирует выполнение условия (12) в заданном диапазоне токов и времен жизни.

Эксперимент

Для проверки правильности предложенной методики экспериментально исследовались серийные ультрабыстрые диоды HFA04TB60 фирмы International Rectifier и UF4004, а также быстродействующие диоды на основе арсенида галлия, разработанные фирмой Clifton.

Согласно результатам анализа уравнения непрерывности, при выполнении условия (12) величина интервала рассасывания $t_{\text{рас}}$ должна оставаться постоянной как при изменении амплитуды импульса тока I, так и величины di/dt. Для проверки этого положения измерялась величина $t_{\text{рас}}$ при изменении амплитуды тока в диапазоне 2–20 A и величины di/dt в диапазоне 5–40 A/μs. Для каждой совокупности величин I и di/dt проверялось выполнение условия (12).

Как показали результаты эксперимента, диапазон измеренных значений времени жизни составил 68–224 ns. У диодов UF4004 и арсенид-галлиевых диодов интервал рассасывания оставался постоянным во всем диапазоне изменения токов и величин di/dt, если они соответствовали условию (12). У диодов HFA04TB60 интервал расса-

сывания оставался неизменным в диапазоне токов до 15 А. При дальнейшем увеличении тока до 20 А наблюдался незначительный рост интервала рассасывания на 5÷8 %.

Литература

1. Lax B, Neustadtez S.F. Transient response of a p-n – junction. // J. Appl. Phys. 1954. 25. 1148–1154.
2. Тогатов В.В. Измерение времен жизни носителей заряда в p^+-n-n^+ – структурах с встроенными полями в базовых областях. // Радиотехника и электроника. 1979. 24. 2107–2114.
3. Kingston R.H. Switching time in junction diodes and junction transistors. // Proc. IRE. 1954. 42. 829–834.
4. Gossick B.R. Post-injection barrier electromotive force of *p-n* – junctions. // Phys. Rev. 1953. 91. 1012–1013.

ПРИБОР ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДНЫХ СТРУКТУР

В.В. Тогатов, П.А. Гнатюк

Разработан прибор для снятия переходных характеристик и измерения параметров ультрабыстрых диодных структур в различных исполнениях. Особенностью прибора является возможность измерений в наносекундном диапазоне. Управление процессом измерения, а также обработка, отображение и хранение информации осуществляется с помощью персонального компьютера.

При измерении временных параметров диодных структур формируют последовательность измерительных импульсов тока и напряжения, форма которых показана на рис. 1. При измерении времени восстановления t_{rr} регулируемыми параметрами являются величина прямого тока I_F, скорость перехода тока с прямого на обратный di_f^-/dt и величина обратного напряжения, прикладываемого к структуре V_R. При измерении максимального прямого напряжения V_{FM} регулируемым параметром является скорость нарастания прямого тока di_f^+/dt.

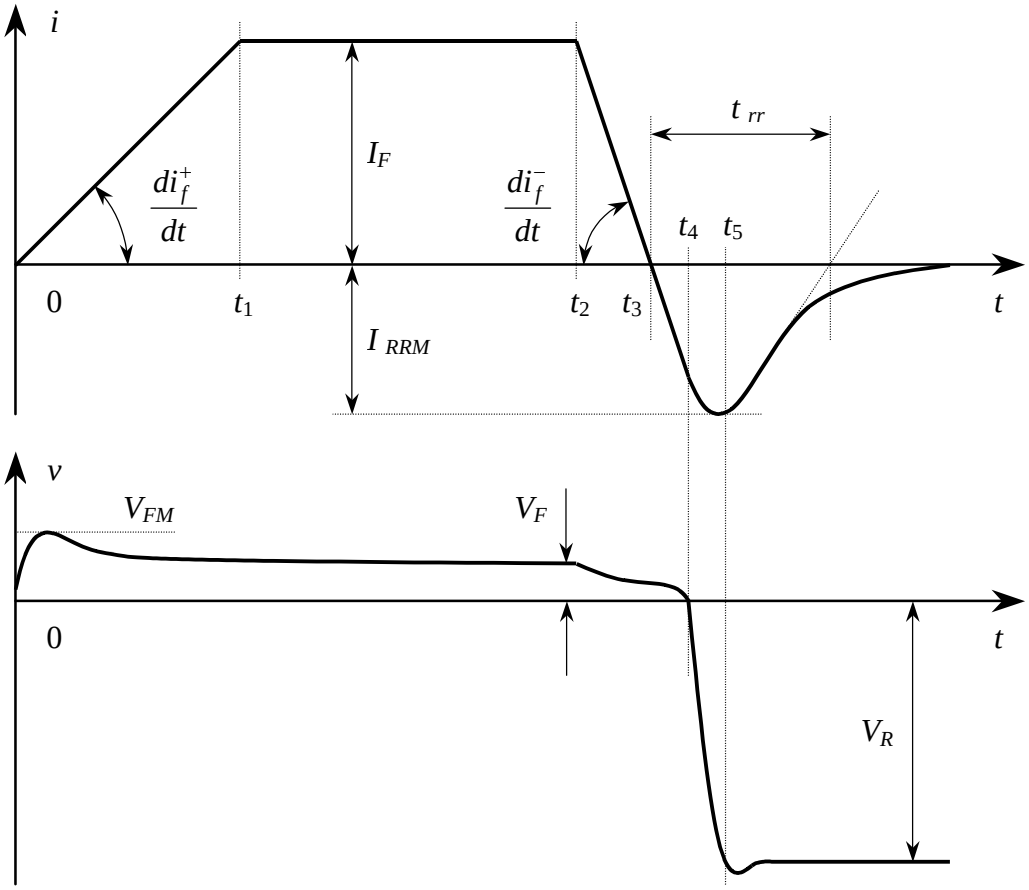


Рис. 1 Форма измерительных импульсов

Стандартная измерительная схема [1], реализующая указанную последовательность измерительных импульсов, приведена на рис. 2. В цепь затвора транзистора подается прямоугольный импульс напряжения, приводящий к его включению. Происходит линейный рост тока через индуктивность со скоростью V_R/L. Длительность импульса t_1 выбирается из условия $(V_R/L)\cdot t_1 = I_F$, где I_F – заданная величина прямого тока через диод. После снятия входного импульса (момент t_1) происходит выключение

транзистора, вследствие чего ток из цепи транзистора коммутирует в цепь испытуемого диода *D.U.T.* На этом этапе регистрируется величина V_{FM}, однако скорость роста тока через испытуемый диод в этой схеме практически не контролируется. После установления стационарного состояния диода в цепь затвора транзистора подается второй импульс напряжения, приводящий к его повторному включению (момент t_2). В цепь прямосмещенного диода подается обратное напряжение V_R, приводящее к изменению направления тока через диод. Скорость перехода тока с прямого на обратный di_f^-/dt определяется процессом заряда затворной емкости через переменный резистор. После обеднения перехода (момент t_4 на рис. 1) испытуемый диод восстанавливает блокирующие свойства, и обратный ток через диод быстро падает. На данном этапе регистрируется величина t_{rr}, после чего второй импульс входного напряжения снимается (момент t_3 на рис. 2). На этом измерительный цикл заканчивается.

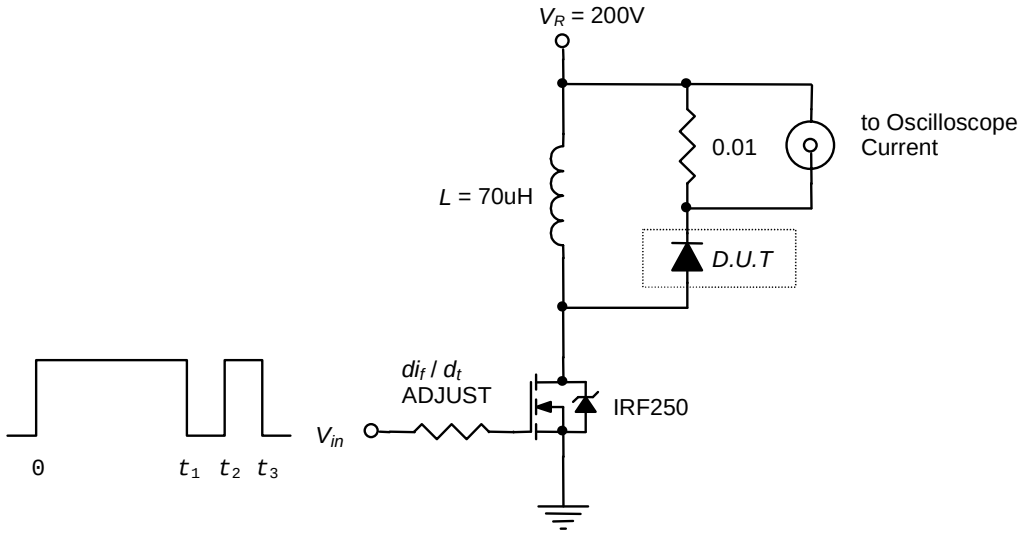


Рис. 2. Стандартная измерительная схема

Рассмотренная схема имеет следующие недостатки:

- узкий диапазон регулирования и нечеткую фиксацию параметров di_f^+/dt и di_f^-/dt, так как их величины зависят от паразитной емкости в цепи затвора транзистора;
- взаимозависимость параметров di_f^+/dt и di_f^-/dt, которые определяются одними и теми же величинами затворной емкости и сопротивления в цепи затвора;
- невозможность регистрации параметров V_{FM} и t_{rr} в пределах одного измерительного цикла, если устанавливаемые величины di_f^+/dt и di_f^-/dt существенно различны;
- сложную схему регистрации переходных характеристик тока и напряжения вследствие того, что испытуемый диод с датчиком тока находится под потенциалом относительно общей шины. Сложность регистрации еще более возрастает, если необходимо производить измерения на полупроводниковой пластине, содержащей десятки диодов.

На рис. 3 приведена электрическая схема, которая свободна от перечисленных недостатков. Схема состоит из формирователей импульсов прямого и обратного токов, подключенных непосредственно к испытуемому диоду *D.U.T.* Первый построен на транзисторе Q_2 по схеме источника стабильного тока с регулирующим усилителем U_3 в цепи обратной связи. Сам источник тока по отношению к нагрузке (диоду *D.U.T.*) включен по схеме модулятора с частичным разрядом накопительной емкости C_4. Последняя заряжается в паузе между импульсами от регулируемого источника до напряжения V_{PWR}. Индуктивность L_2, включенная последовательно в цепь источника прямого

тока, осуществляет импульсную развязку цепей формирователей. При этом величина L_2 совместно с величиной V_{PWR} определяют скорость нарастания прямого тока di_f^+/dt при измерении V_{FM}.

Формирователь импульсов обратного тока построен на транзисторе Q_1, который подключает обратное напряжение V_R к индуктивности L_1. Транзистор Q_1 управляется драйвером U_1, осуществляющим усиление входного сигнала по мощности, а потенциальная развязка цепи входного сигнала с цепью затвор-исток Q_1 обеспечивается оптопарой U_2. Конденсатор C_2 заряжается от регулируемого источника напряжения V_R, величина которого совместно с величиной L_1 определяют значение di_f^-/dt при измерении t_{rr}. Демпфирующий диод D_1 создает дополнительный контур тока после восстановления испытуемого диода *D.U.T.* Импульсы прямого и обратного токов через диод снимаются с шунта R_9, а импульсы напряжения на диоде – с катода *D.U.T.*

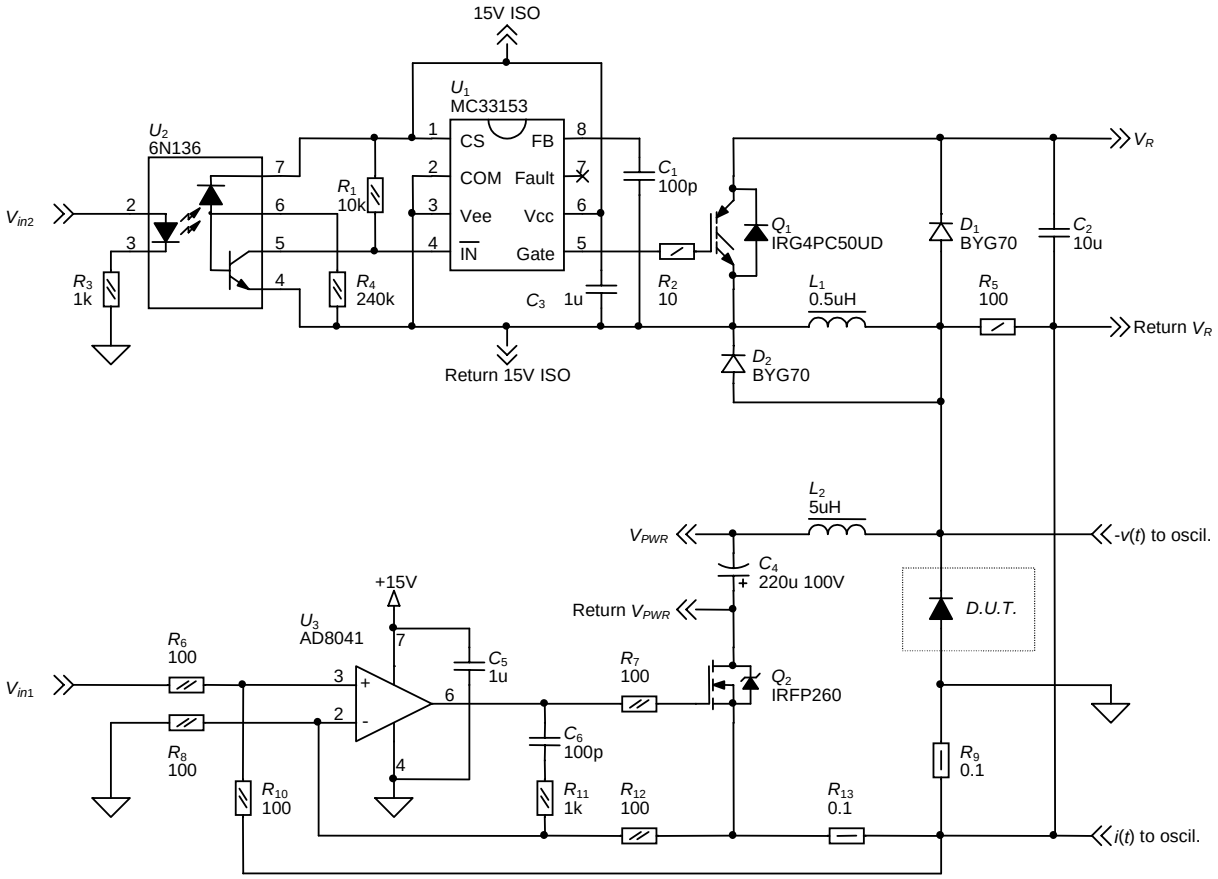


Рис. 3 Схема регистрации переходных характеристик

Проследим последовательность работы схемы. В момент времени t_0 на неинвертирующий вход управляющего усилителя U_3 подается прямоугольный импульс опорного напряжения V_{in1}, амплитуда которого определяет амплитуду прямого тока I_F через диод,

$$I_F = V_{in1}/R_{13}\,. \tag{1}$$

Вплоть до момента времени t_1 транзистор Q_2 находится в насыщении, поэтому форма импульса прямого тока через диод на этом интервале определяется внешней цепью. Происходит линейный рост прямого тока со скоростью

$$\frac{di_f^-}{dt} = \frac{V_{PWR} - V_{Q2} - V_{D.U.T.} - V_{R13} - V_{R9}}{L_2} \approx \frac{V_{PWR}}{L_2}\,. \tag{2}$$

Здесь – V_{Q2}, $V_{D.U.T.}$, V_{R13}, V_{R9} – напряжения на Q_2, *D.U.T.*, R_{13} и R_9 соответственно. На этом временном интервале регистрируется величина V_{FM}, характеризующая эффективность процесса модуляции проводимости базы.

В момент времени t_1 транзистор Q_2 переходит в режим стабилизации тока, поддерживая ток через диод равным V_{in1}/R_{13} вплоть до момента времени t_2. В конце этого интервала может быть проведено измерение установившегося прямого напряжения на диоде, соответствующего указанному току. В момент времени t_2 на вход U_2 подается прямоугольный импульс напряжения, приводящий к включению Q_1. Происходит линейный рост тока через индуктивность L_1 и соответствующий спад тока через испытуемый диод:

$$i_D = \frac{V_{in1}}{R_{13}} - \frac{V_R}{L_1} \cdot t \,. \tag{3}$$

В момент t_3 изменяется направление тока через диод и начинается процесс рассасывания заряда неосновных носителей в базе. К моменту t_4 концентрация неосновных носителей у перехода испытуемого диода снижается до нуля, после чего начинается процесс формирования области пространственного заряда. Из-за наличия индуктивности L_1 этот процесс осуществляется в режиме источника тока, поэтому рост напряжения на диоде сопровождается ростом обратного тока. В момент времени t_5 напряжение на испытуемом диоде достигает величины V_R. При этом демпфирующий диод D_1 смещается в прямом направлении, поддерживая на катоде испытуемого диода обратное напряжение V_R. Одновременно обратный ток через диод быстро падает. На этом этапе регистрируется величина времени восстановления диода t_{rr}.

После снятия импульса опорного напряжения V_{in1} транзистор Q_2 переходит в режим отсечки. Энергия магнитного поля, накопленная в индуктивности L_2, рассеивается в обратном лавинном диоде Q_2. Напряжение пробоя этого диода должно быть больше максимального значения суммы $V_R + V_{PWR}$, так как только при этом условии ток через L_2 спадет до нуля. В дальнейшем снимается импульс входного напряжения V_{in2}, и схема возвращается в исходное состояние.

Выбор элементов схемы производится из следующих соображений. По заданным значениям V_R и di_f^-/dt находится величина индуктивности L_1

$$L_1 = \frac{V_R}{di_f^-/dt} \,. \tag{4}$$

Если необходимо варьировать одним из параметров при постоянстве другого, то соответствующим образом корректируется величина L_1. Для надежной развязки формирователей прямого и обратного токов величина L_2 выбирается на порядок больше L_1. По известной величине L_2 определяется необходимое значение напряжения V_{PWR} на конденсаторе C_4, которое обеспечивает заданное значение di_f^+/dt :

$$V_{PWR} = L_2 \cdot \frac{di_f^+}{dt} \,. \tag{5}$$

Согласно выражению (1), заданная величина прямого тока через диод I_F определяется амплитудой импульса опорного напряжения V_{in1} и может изменяться в широких пределах. При этом сопротивление шунта R_{13} выбирается из условия удобства измерений.

Транзистор Q_2 выбирается на максимальную величину прямого тока через диод I_{FM}, а Q_1 – на максимальное значение суммы прямого и обратного токов $I_{FM} + I_{RRM}$. Оба транзистора должны обладать высоким быстродействием. Q_1 для возможности формирования испытательных импульсов с большими значениями di_f^-/dt , а Q_2 – для предотвращения избыточного роста тока через диод в момент перехода транзистора в режим

стабилизации тока (момент t_1). С этой же целью регулирующий усилитель U_3 выбирается из условия максимального быстродействия. Чтобы избежать заметных искажений переходной характеристики, демпфирующий диод D_1 выбирается с минимальной барьерной емкостью, а цепь подключения D_1 к катоду испытуемого диода и конденсатору C_2 должна быть выполнена с минимальной индуктивностью.

Как отмечалось выше, транзистор Q_2 и управляющий усилитель U_2 должны обладать высоким быстродействием, чтобы предотвратить выброс прямого тока через диод при переходе Q_2 из режима насыщения в режим ограничения тока (момент t_1). За счет правильного выбора Q_2 и U_2 можно уменьшить отмеченный выброс тока, но полностью устранить его не удается. Для этого необходимо исключить режим насыщения транзистора Q_2. С этой целью параллельно цепи L_2–*D.U.T.*–R_9 (рис. 4) подключают последовательно соединенные трансил D_4 и диод D_3. Напряжение пробоя трансила D_4 должно быть меньше V_{PWR}, а прямое напряжение диода D_3 – близким к прямому напряжению на испытуемом диоде.

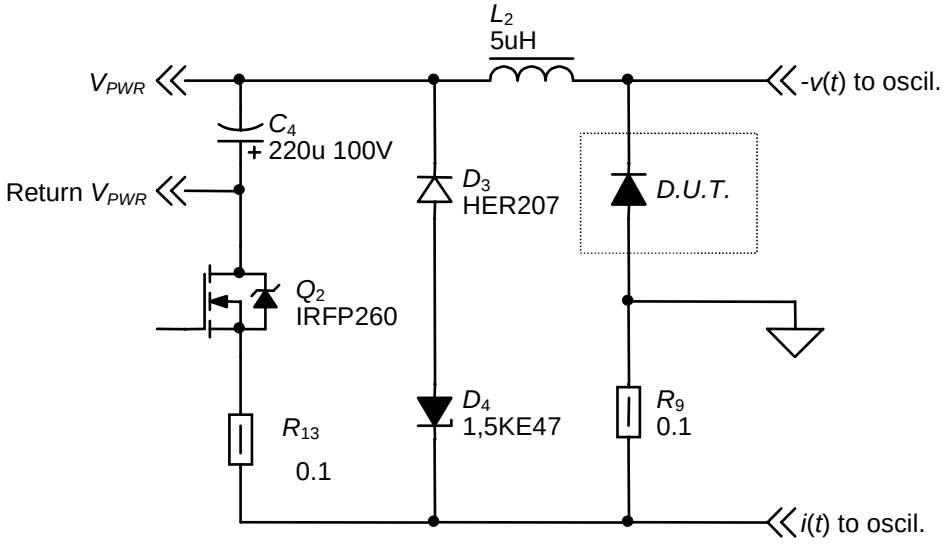


Рис. 4 Дополнение к схеме регистрации

В данной схеме с момента подачи на вход управляющего усилителя U_3 импульса опорного напряжения V_{in1} (рис. 3) транзистор Q_2 работает в режиме источника стабильного тока, задавая величину тока равной V_{in}/R_{13}. Первоначально ток стока Q_2 целиком замыкается по цепи трансила D_4. В дальнейшем ток переходит из цепи трансила D_4 в цепь испытуемого диода *D.U.T.* со скоростью

$$\frac{di_f^+}{dt} = \frac{V_{D_3} + V_{D_4} - V_{D.U.T.} - V_{R_9}}{L_2} \approx \frac{V_{D_4}}{L_2}, . \qquad (6)$$

где V_{D4} – напряжение пробоя трансила D_4, а V_{D3}, $V_{D.U.T.}$ и V_{R9} – напряжения на D_3, $V_{D.U.T.}$ и R_9, соответственно. В момент времени t_1 (рис. 1) ток через диод $V_{D.U.T.}$ достигает величины V_{in1}/R_{13} и остается неизменным вплоть до момента времени t_2. При этом режим работы транзистора Q_2, начиная с момента включения, также остается неизменным. Поэтому увеличения тока сверх установленной величины V_{in1}/R_{13} в данной схеме удается избежать.

Рассмотренное изменение схемы является принципиальным при измерении импульсного прямого напряжения на диоде. На результат измерения времени восстановления диода наличие цепи с трансилом D_4 влияния не оказывает.

Для фирмы Clifton Electronics (Таллинн) на основе предложенной схемы разработан и изготовлен измерительно-вычислительный комплекс, осуществляющий снятие

переходных характеристик и измерение параметров ультрабыстрых диодных структур в следующих исполнениях:

- непосредственно на полупроводниковой пластине диаметром до 50 мм;
- на отдельных чипах размером от 2×2 мм^2;
- после установки чипов в корпус;
- на серийных диодах.

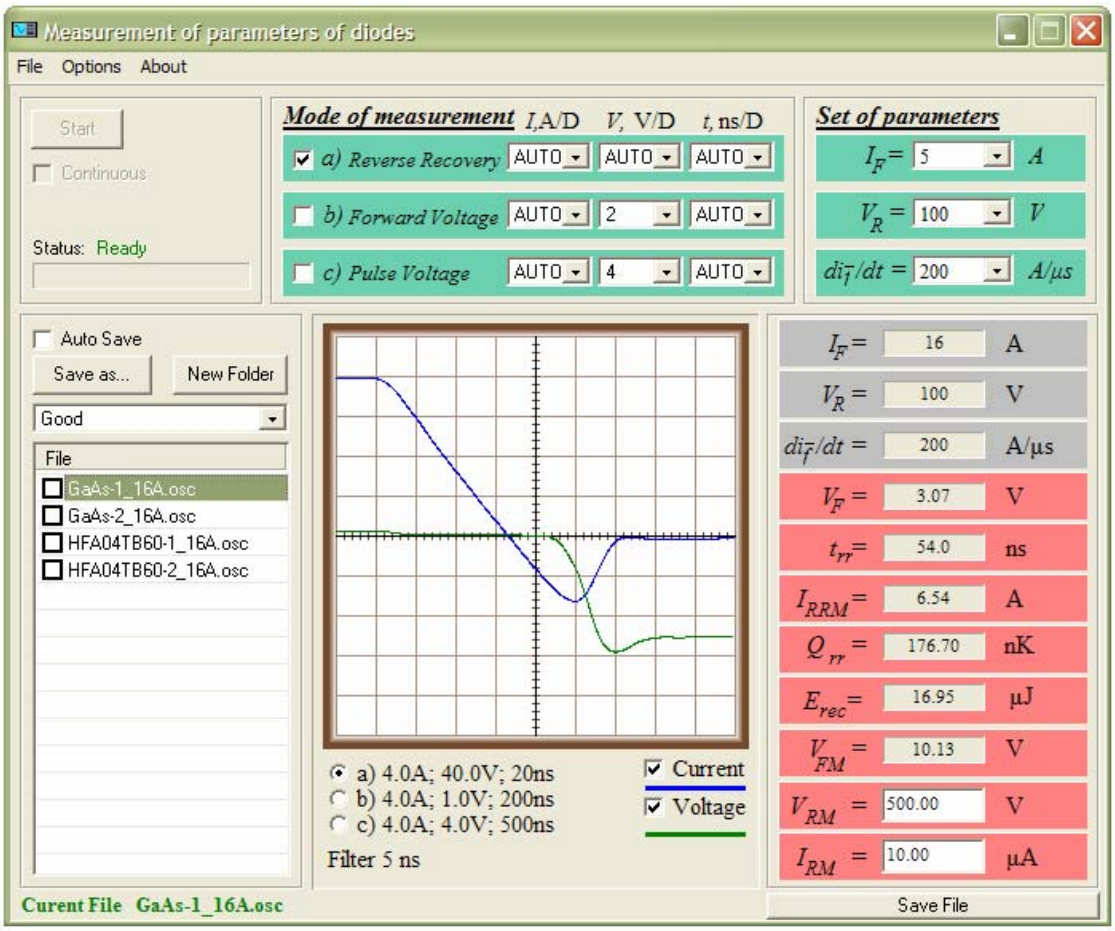


Рис. 5 Интерфейс программы для регистрации переходных характеристик

Измеряемые параметры и снимаемые характеристики:

- установившееся прямое напряжение ..... V_F
- максимальное импульсное прямое напряжение ..... V_{FM}
- время восстановления ..... t_{rr}
- максимальный обратный ток ..... I_{RRM}
- заряд переключения ..... Q_{rr}
- энергия потерь при выключении ..... E_{rec}
- переходная характеристика тока через диод ..... $i(t)$
- переходная характеристика напряжения на диоде ..... $v(t)$
- прямая вольт-амперная характеристика ..... $I_F(V_F)$
- зависимость времени восстановления от прямого тока ..... $t_{rr}(I_F)$
- зависимость времени восстановления от величины di/dt ..... $t_{rr}(di/dt)$

Технические характеристики:

- прямой ток I_F ..... 1 – 40 А
- шаг изменения прямого тока ..... 1 А

- скорость нарастания прямого тока di_f^+/dt ..... 10 A/μs
- обратное напряжение V_R ..... 100, 200, 400 V
- скорость спада тока di_f^-/dt

  при V_R = 100 В 50, 100, 200 A/μs
  при V_R = 200 В 100, 200, 400 A/μs
  при V_R = 400 В 200, 400, 800 A/μs
- максимальный обратный ток I_{RRM} ..... 120 A
- время восстановления t_{rr} ..... до 500 ns
- максимальная скорость выборки ..... 5 GS/s
- время измерения всех параметров при 1GS/s ..... 3 s

Все переходные характеристики, измеренные при одном значении прямого тока I_F, хранятся в одном файле. Эти же характеристики можно сохранить в виде текстовых таблиц, а также в виде графического файла с набором измеренных параметров. По результатам измерений партии диодов программа создает сводную таблицу измеренных параметров для всех указанных файлов. Программа автоматически классифицирует измеренные диоды по четырем группам V_F и четырем группам t_{rr} при заданном значении прямого тока I_F. На рис. 5 приведен интерфейс программы измерительно-вычислительного комплекса.

Литература

1. International Rectifier Corporation. HEXFET Designer’s Manual. V. 1. Power MOSFETs Applications and Reliability Data. 1993.

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ВЫХОДОМ ДО 2000 В ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

В.В. Тогатов, П.А. Гнатюк

Предложена схема операционного усилителя с высоковольтным выходом, позволяющая формировать импульсы напряжения различной полярности. За счет последовательного включения транзисторов в выходном каскаде усилителя величина выходного напряжения не имеет принципиальных ограничений. Разработанная схема используется для классификации высоковольтных диодных структур.

Особенностью классификации бескорпусных диодных структур (чипов) является неопределенность положения анода и катода в зажимном устройстве. Введение в измерительный цикл дополнительной операции по определению и маркировке электродов диодов нежелательно, так как затрудняет процесс автоматизации измерений.

Нами разработана измерительная схема (рис. 1), которая позволяет производить классификацию структур при любом положении структуры в зажимном устройстве.

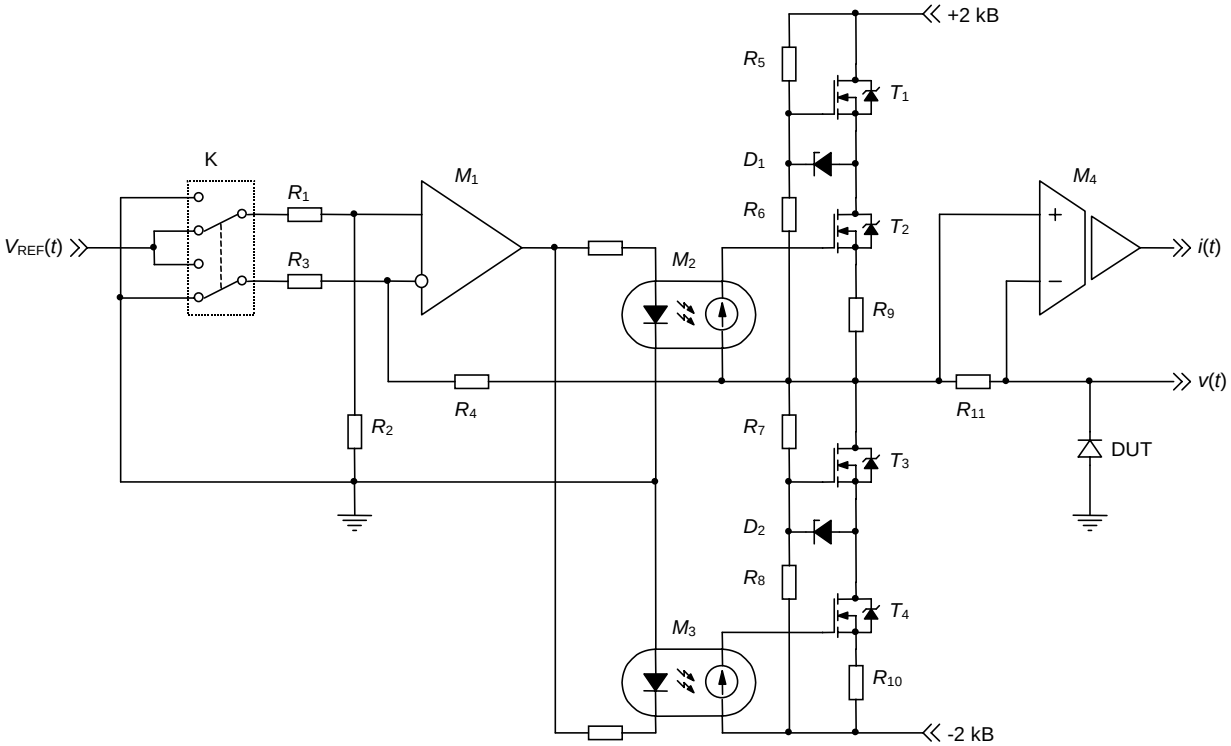


Рис. 1. Измерительная схема

Схема представляет собой управляемый источник напряжения с ограничением тока, формирующий измерительные импульсы положительной и отрицательной полярности. Выходной каскад собран по схеме полумостового усилителя, работающего в режиме АВ. Верхнее плечо полумоста построено на последовательно включенных транзисторах T_1 и T_2 с резистором обратной связи R_9 в истоке T_2; нижнее плечо – на транзисторах T_3 и T_4 с резистором R_{10} в истоке T_4. Количество последовательно включенных транзисторов определяется максимальной величиной измеряемого напряжения и принципиально не ограничено. Питание выходного каскада осуществляется от двухполярного высоковольтного источника ± 2 кВ. Резисторы R_5, R_6 и R_7, R_8 служат для равномерного деления напряжений между последовательно включенными транзисторами. Управление выходным каскадом осуществляется через оптопары M_2 и M_3 с помощью

операционного усилителя M_1, включенного по схеме инструментального усилителя. Ток через испытуемый диод снимается с шунта R_{11} и контролируется на выходе операционного усилителя M_4 с потенциальной развязкой входной и выходной цепей. Изменение полярности формируемого на диоде импульса напряжения в зависимости от положения выводов диода в зажимном устройстве производится с помощью полупроводникового коммутатора K.

Проследим последовательность работы схемы, считая, что коммутатор K находится в положении, показанном на рис. 1. В момент времени t_0 на управляющий вход подается трапецеидальный импульс опорного напряжения $V_{\mathrm{REF}}(t)$ положительной полярности с длительностью фронта порядка 100 мс. Амплитуда импульса соответствует максимальной величине обратного напряжения на диоде, обеспечиваемого схемой. Операционный усилитель M_1 при указанном положении коммутатора K включен по неинвертирующей схеме, поэтому на выходе M_1 формируется положительный импульс напряжения. Светодиод в оптопаре M_2 смещается в прямом направлении и инициирует работу верхнего плеча выходного каскада, формирующего испытательные импульсы положительной полярности. По цепи обратной связи операционный усилитель M_1 устанавливает на диоде текущее значение обратного напряжения

$$V_{\mathrm{DUT}} = V_{\mathrm{REF}}(t) \times (R_4 / R_3) .$$

Как только ток, снимаемый с шунта R_{11}, достигнет установленной величины, по сигналу с выхода M_4 импульс опорного напряжения $V_{\mathrm{REF}}(t)$ обнуляется и дальнейший рост напряжения на диоде прекращается. В процессе измерения снимаются текущие значения обратного тока через диод и напряжение на диоде. По результатам измерений строится обратная вольтамперная характеристика диода.

Если испытуемый диод по отношению к формирующему импульсу напряжения оказывается включенным в прямом направлении (напряжение на диоде не превышает 2 В), происходит переключение полупроводникового коммутатора. При этом операционный усилитель M_1 оказывается включенным по инвертирующей схеме и формирует выходное напряжение отрицательной полярности. Соответственно смещается в прямом направлении светодиод в оптопаре M_3, и инициируется работа нижнего плеча выходного каскада, формирующего испытательные импульсы отрицательной полярности. В остальном работа схемы полностью идентична предшествующему случаю.

Особенностью предложенной схемы является низкое быстродействие, обусловленное инерционностью операционного усилителя M_4 и разрядом паразитных емкостей в цепях затворов транзисторов $T_1 \div T_4$. Интервал времени с момента достижения тока уставки до момента выключения соответствующего плеча имеет порядок десятков микросекунд. Однако при длительности фронта испытательного импульса напряжения порядка 100 мс за время указанной задержки обратное напряжение на испытуемом диоде возрастет не более чем на 1 В. При этом ток через диод никогда не превысит установленной величины, так как в схеме выходного каскада предусмотрено ограничение тока.

ПРИМЕНЕНИЕ JAVA АППЛЕТОВ В ДИСТАНЦИОННЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ

Ю.В. Китаев

Для дистанционного обучения разработан комплекс программного обеспечения, выполненный с применением платформо-независимой JAVA технологии [1]. Основу комплекса составляют виртуальные лабораторные работы (ВЛР) для курса «Электроника и микропроцессорная техника». Схема взаимодействия студента и отдельной ВЛР включает локальное рабочее место – компьютер, интернет-обозреватель и удаленные серверы [2], на которых располагаются виртуальные лабораторные работы, выполненные в виде JAVA апплетов, а также база данных. Все работы выполнены в едином стиле, который предполагает исследование отдельного цифрового устройства (ЦУ) путем подачи тестовых наборов сигналов на его входы и записи сигналов, полученных на выходах, в таблицу состояний. Каждая работа разбивается на ряд этапов (кадров), в которых предлагается то или иное задание или задача. На основании полученных таким образом данных студент должен сформулировать определение, которое соответствует предложенному ЦУ. Этот этап ВЛР оформлен в виде вопроса, на который предлагается несколько ответов, в том числе один правильный. На следующих этапах предлагаются разновидности исследуемого устройства, а в конце – одна или несколько задач на базе изученного в работе материала.

Фрагмент кадра одной из виртуальных лабораторных работ по исследованию RS и D триггеров приведен на рис. 1. На этом и других фрагментах ВЛР не показаны текстовые поля, в которых приводятся краткие пояснения, инструкции и другой необходимый материал.

Рис.1. Исследования асинхронных RS триггеров с инверсными и прямыми входами

На рис. 1 изображен этап исследования асинхронных RS триггеров с инверсными и прямыми входами. Студент вводит произвольные значения входных логических сигналов в два активных текстовых окошка ~S и ~R. Здесь и далее в тексте инверсные сигналы будут обозначаться знаком «~». Инверсные значения этих сигналов автоматически вписываются в два текстовых окна S и R нижнего триггера. Если вводится ошибочное значение, отличающееся от 0 или 1, то появляется предупреждающая об ошибке

надпись. После ввода допустимого набора входных значений студент нажимает на кнопку «вычислить», и на выходах триггеров генерируются соответствующие входным наборам сигналы. При этом автоматически активизируются те клетки таблицы состояний, в которые студент должен записать выходные значения сигналов. Активизирующиеся клетки окрашиваются в красный цвет. Так, например, на рис. 2 студент набрал два значения ~S=1 и ~R=0 и нажал на кнопку «вычислить». На выходах триггеров появляются соответствующие сигналы, и одновременно клетки таблицы состояний обоих триггеров, в которые нужно занести выходные значения, окрашиваются в красный цвет. Кнопка «вычислить» становится на время недоступной. В этот момент у студента только одна возможность – заполнить выделенные клетки таблицы. На рис. 2 студент заполнил одну из четырех клеток таблицы правильным значением – «0», а другую по ошибке неправильным – «2».

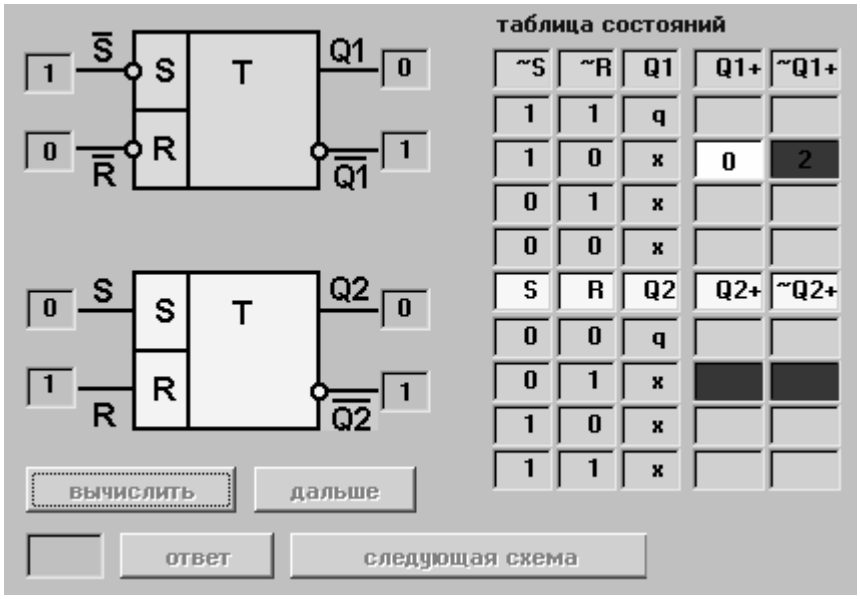


Рис.2 Этап работы со схемой рис. 1

Здесь стоит отметить, что для предотвращения неправильных действий с «органами управления» виртуальной лабораторной установки студенту в каждый момент времени доступна либо одна из кнопок, либо необходимые клетки таблицы состояний. Текстовые поля входных значений после нажатия на кнопку «вычислить» также недоступны (на рис. 2 поля ~S и ~R приобрели фоновый серый цвет). Красный цвет выделенной клетки таблицы исчезает только после введения правильного (или исправления неправильного) значения выходного сигнала. Например, после исправления ~Q1+=2 на ~Q1+=1 цвет клетки изменится на белый. Всё это вместе обеспечивает правильную «траекторию» прохождения виртуальной лабораторной работы. После заполнения очередных клеток таблицы состояний активизируется кнопка «дальше». При нажатии на неё снова разблокируются поля для ввода входных значений, активизируется кнопка «вычислить» и становятся недоступными только что записанные поля таблицы. Студент вводит другую комбинацию входных сигналов, и вся процедура повторяется. Так продолжается до конца экспериментального исследования одного типа триггеров, после чего студенту в виде задачи предъявляются несколько формулировок исследованного устройства, среди которых только одна правильная. Анализируя только что заполненную таблицу, студент дает ответ. Из-за ограниченного объема статьи фрагмент этого кадра не приводится (ниже в статье приводится ссылка на Интернет-ресурс,

где можно ознакомиться со всеми виртуальными лабораторными работами и выполнить их).

Следующим этапом является исследование статического D-триггера (рис.3).

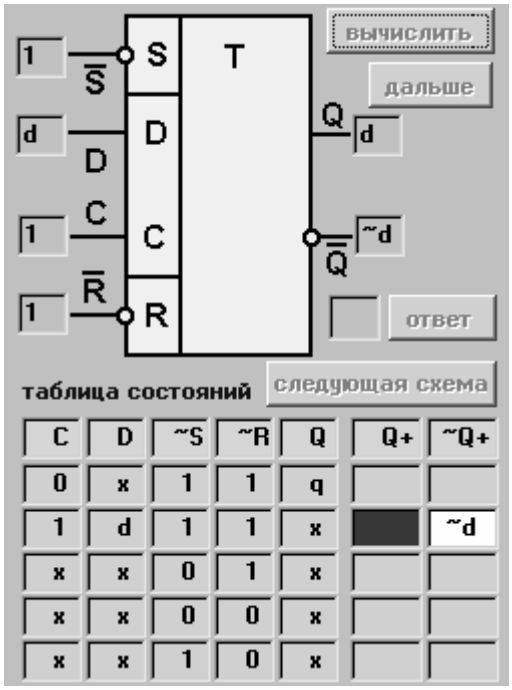


Рис.3. Исследование статического D-триггера

Методика его исследования не отличается от описанной. На рис. 3 уже введено одно полученное на выходе значение ~Q+ = ~d. Для завершения этого этапа, как и ранее, требуется дать формулировку исследованному триггеру. В следующем кадре приводится задача на закрепление изученного материала (см. рис. 4). Условия задачи задаются случайным образом. Ответ вводится в специальное окно, которое, как и кнопка «ответ», активизируется только при переходе к задаче.

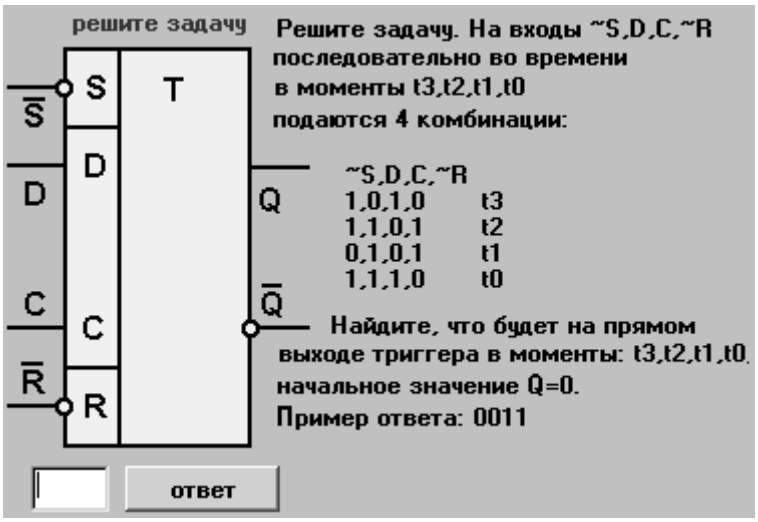


Рис.4. Окно задачи на закрепление изученного материала

Оценка за выполнение ВЛР определяется по числу правильно данных ответов, которые образуют профиль выполнения ВЛР. Результаты пересылаются на сервер и далее

помещаются в базу данных [3]. Весь учебный комплекс включает также дистанционный учебник с интерактивными задачами, завершающими соответствующий раздел и написанными на языке VBScript, и практическими работами, написанными с помощью сценарного языка ActionScript для популярного формата SWF.

Приведем перечень всех работ, реализованных подобным или другим образом. 1. Дешифраторы. 2. Мультиплексоры. 3. Триггеры. 4. Счетчики. 5. Регистры. 6. ЦАП. 7. Память. 8. Системы счисления. 9.Флаги микропроцессора. 10.Основные логические элементы. 11.Вычисление значений логической функции. 12. Составление логических уравнений. 13. Таблица Карно. 14. Программируемый интервальный таймер.15. Программируемый периферийный интерфейс. 16. Программируемый связной интерфейс. 17. Вывод данных на 8-сегментный дисплей. 18. Программирование на ассемблере.

Разработанный пакет дистанционных виртуальных лабораторных работ используется в системе ЦДО института для выполнения в рамках программы обучения по курсу «Электроника и МП» в двух режимах – обучения и аттестации. Кроме того, все виртуальные лабораторные работы могут быть выполнены с сайта каферы электроники, или их можно установить на любой локальный компъютер. С работами можно ознакомиться и выполнить их по адресу www.ifmo.ru/electron/ogl.htm, при этом на ЭВМ пользователя должны быть установлены свободно распространяемые виртуальная машина Java и Flash-проигрыватель (точнее, ActiveX библиотека, которая устанавливается автоматически). Пользоваться лучше обозревателем «Интернет Експлорер», так как часть практических работ написана на ActionScript, который, увы, не во всех своих проявлениях поддерживается обозревателем NetScape.

Литература

1. JAVA. Сборник рецептов для профессионалов. / Ян Ф. Дарвин. СПб: Питер, 2002.
2. Создание распределенных приложений на Java2. / Ильдар Хабибуллин. СПб: BHV, 2002.
3. Технологии программирования на Java2. / Х.М. Дейтел и др. М.: Бином, 2003.

14 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВСТУПИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ ПРИЕМА В ВУЗЫ

Ю.А. Каракулев, В.Г. Карпов

В статье описываются различные формы вступительных испытаний, используемых университетом при наборе на первый курс. Приводятся результаты этих испытаний, дан их подробный анализ по различным характеристикам. Полученные результаты могут найти применение в работе приемных комиссий высших учебных заведений

В настоящее время в государственном университете ИТМО, как и в других вузах России, используются различные вступительные испытания – вступительные экзамены, собеседование, олимпиады, единый государственный экзамен, всероссийское тестирование [1]. Указанные испытания отличаются не только по названиям, но и по форме, времени проведения, оценке результата. Такое многообразие видов и форм затрудняет работу приемных комиссий. Поэтому оптимизации вступительных испытаний является актуальной задачей.

Для анализа вступительных испытаний была проведена их систематизация и классификация (табл. 1). Университет использует четыре вида вступительных испытаний

- традиционные экзамены, которые проводятся в летнее время;
- региональные олимпиады, которые проводятся с января по март;
- всероссийское тестирование (ВРТ) в апреле;
- единый государственный экзамен (ЕГЭ) в июне.

Формы испытаний могут быть различными. Это может быть письменный или устный экзамен, тест, собеседование. Сами формы отличаются конфигурацией заданий, способами их выполнения. Тест является заданием стандартной формы, а письменный экзамен и собеседование могут быть вариантны. Письменный экзамен и тест предполагают самостоятельную работу абитуриента над заданием, а собеседование проводится в виде прямого диалога абитуриента и экзаменатора. При этом вступительные испытания на данную специальность, направление подготовки могут быть одной формы (например, только письменные экзамены) или комбинированные (например, профильный экзамен по одному предмету и тестирование по другим предметам).

Форма	Вид			
	Летние вступительные испытания	ЕГЭ	Олимпиады	ВРТ
Письменный экзамен	**X**	—	**X**	—
Устный экзамен	**X**	—	**X**	—
Собеседование	**X**	—	—	—
Тестирование	**X**	**X**	**X**	**X**

Таблица 1. Вступительные испытания

Из табл. 1 видно, что летние вступительные испытания являются наиболее универсальным видом, так как могут проводиться в любой форме. По универсальности форм региональные олимпиады стоят на втором месте.

Среди рассмотренных форм вступительных испытаний наиболее универсальной является тестирование, потому что оно может быть применено при любом виде вступительных испытаний. Такая форма вступительного испытания, как письменный экзамен, хотя и менее универсальна, удобна, поскольку позволяет адаптировать задания для различных условий приема и категорий абитуриентов. Форма вступительного испытания – собеседование имеет ограниченное применение, так как обычно не содержит вопросов профильной направленности.

Рассмотрим, какие виды и формы вступительных испытаний оказались наиболее популярны среди абитуриентов, а какие наиболее эффективны для решения задачи поступления в вуз.

Необходимо учитывать, что подготовка специалистов в университете проводится по десяткам направлений и специальностей. Структура зачисления на конкретную специальность зависит от множества случайных факторов (модная, престижная, разрекламированная, невостребованная и т.п.) Для объективности оценки результатов зачисления отдельные направления подготовки и специальности целесообразно объединить в группы по отраслям знаний. Таких групп в университете оказалось четыре: оптотехника, точное приборостроение, информатика и вычислительная техника, естественнонаучные и гуманитарные специальности (табл. 2). В каждой группе определялась доля зачисленных по каждому виду и форме вступительных испытаний.

Группы специальностей и направлений подготовки	По результатам:				
	Региональных олимпиад	ЕГЭ	летних вступительных испытаний:		
			экзаменов	профильного	комби-
Оптотехника	40.6	10.6	16.7	26.7	5.4
Точн. приборостроение	38.0	-	20.7	20.7	20.6
Информ. и выч. техника	59.0	-	9.1	23.3	8.6
Ест. и гуманитарн. спец.	51.2		8.9	21.2	18.7
Всего	48.2	3.5	13.3	23.6	14.9

Таблица 2. Результаты зачисления по видам и формам вступительных испытаний (%%)

Если разделить зачисленных на первый курс по времени участия в проведенных вступительных испытаниях, оказывается, что по результатам региональных олимпиад и летних вступительных испытаний их число примерно одинаково. При этом необходимо обратить внимание на то, что летние вступительные испытания включают в себя несколько видов испытаний. Четвертую часть всех зачисленных составили медалисты школ и отличники ССУЗ, которые сдавали одно профильное испытание. По результатам летних экзаменов зачислено всего 13 %. Число зачисленных по результатам ЕГЭ по вузу составило всего 3.5 %. Сертификаты ЕГЭ принимались в качестве результатов вступительных испытаний только на группу специальностей «Оптотехника». Если рассматривать зачисленных в этой группе, то по результатам ЕГЭ принято около 11% – практически столько же, сколько и по результатам летних экзаменов в вуз. Комбинированные вступительные испытания, которые проводились среди профориентированных абитуриентов, дали 15% зачисленных.

Рассмотрим итоги зачисления по группам специальностей. Оказалось, что больше всего - около 60% – зачислено по результатам региональных олимпиад в группу специальностей, объединенных названием «Информатика и вычислительная техника». В группы специальностей «Точное приборостроение» и «Оптотехника» таких зачисленных оказалось в полтора раза меньше (38% и 41% соответственно).

По результатам летних вступительных испытаний наблюдается обратная картина. В группы специальностей «Информатика и вычислительная техника» и «Естественнонаучные и гуманитарные» зачислено только 9%, а в группы специальностей «Точное приборостроение» и «Оптотехника» – 21% и 17% соответственно. В то же время по результатам профильного вступительного испытания для медалистов школ и отличников ССУЗ число зачисленных примерно одинаково для всех групп специальностей. По результатам комбинированных вступительных испытаний в различные группы специальностей зачислено от 5% до 20%.

Информатика и вычислительная техника в настоящее время являются наиболее популярными специальностями. Обучаться по этим специальностям стремится подавляющее большинство абитуриентов, конкурс сюда наивысший, отбор наиболее строгий. Именно поэтому здесь из числа зачисленных большинство (59%) – победители региональных олимпиад.

Процент зачисленных в группе естественнонаучных и гуманитарных специальностей почти такой же большой (51%). Это объясняется популярностью данных специальностей среди молодежи, хотя, по нашему мнению, «пик» популярности этих специальностей прошел.

В летних вступительных экзаменах участвовали абитуриенты из Санкт-Петербурга, Ленобласти и других регионов России. При этом доля принятых из каждого региона в группах специальностей отличается (см. табл. 3.).

Группы специальностей и направлений подготовки	Процент зачисленных	Из них проживающих в:		
		Санкт-Петербурге	Ленобласти	регионах России
Оптотехника	16.7	60.0	20.0	20.0
Точное приборостроение	20.7	67.7	22.6	9.7
Информатика и вычислительная техника	9.1	48.3	10.3	41.4
Естественнонаучные и гуманитарные	8.9	66.7	5.6	27.7
Всего	13.3	60.2	16.5	23.3

Таблица 3 Результаты зачисления по летним вступительным экзаменам (в %%)

Примерно одинаков среди зачисленных в разные группы специальностей процент жителей Санкт-Петербурга. При этом он несколько ниже в группе специальностей «Информатика и вычислительная техника» (48 %) и наиболее высок в группе «Точное приборостроение» (68%).

Отношение процентов зачисленных в эти группы из регионов России обратно – 41% и 10 % соответственно.

Процент жителей Ленобласти среди зачисленных по летним экзаменам примерно одинаков в группах «Оптотехника» (20%) и «Точное приборостроение» (23 %) и значи-

тельно ниже в группах «Информатика и вычислительная техника» (10 %) и «Естественнонаучные и гуманитарные специальности» (6 %).

Наибольший процент зачисленных в вуз (60%) являются жителями Санкт-Петербурга. Такая же картина наблюдается и по каждой группе специальностей.

Доминирование информатики и вычислительной техники в современном мире ориентирует молодежь на получение знаний только в этой области. Поэтому наблюдается приток на соответствующие специальности абитуриентов со всей страны. Лучшие из них и «выдавливают» при зачислении абитуриентов Санкт-Петербурга. В то же время менее популярные в последние годы среди абитуриентов страны приборостроительные специальности для жителей Санкт-Петербурга продолжают оставаться актуальными.

Профильное вступительное испытание проводилось в нашем университете для медалистов школ и отличников ССУЗ в форме тестирования по математике. Результаты зачисления представлены в табл. 4.

Медалисты из Санкт-Петербурга составили только треть из числа зачисленных медалистов и отличников. Почти четверть зачисленных из других регионов России составили жители Ленобласти.

Выровнялся процентный состав зачисленных по группам специальностей, как в целом, так и по отдельным регионам.

Группы специальностей и направлений подготовки	Процент зачисленных	Из них проживающих в:		
		Санкт- Петербурге	Ленобласти	регионах России
Оптотехника	26.7	31.8	14.8	53.4.
Точное приборостроение	20.7	29.0	19.4	51.6
Информатика и вычислительная техника	23.3	43.2	13.6	43.2
Естественнонаучные и гуманитарные	21.2	44.2	9.3	46.5
Всего	23.6	37.3	14.0	48.7

Таблица 4. Результаты зачисления медалистов школ и отличников ССУЗ (в %%)

Уровень подготовки рассматриваемой категории абитуриентов, в основном, не зависит от места их проживания и, соответственно, обучения. В этом случае количество зачисленных из данного региона будет пропорционально количеству заявлений, поданных абитуриентами этого региона. Этот вывод подтверждается структурой зачисления медалистов. При этом процент медалистов школ и отличников ССУЗ примерно одинаков по всем группам специальностей, потому что различный уровень сложности профильного испытания для разных групп специальностей нивелировал число поступивших. Это наблюдается не только в целом по вузу, но и по отдельным регионам.

Что касается приема по результатам ЕГЭ, то, к сожалению, выборка по данному виду вступительных испытаний в нашем университете невелика. В этом году результаты ЕГЭ принимались только на группу специальностей «Оптотехника». Было подано 69 заявлений, что составило около 7% от числа заявлений на эту группу специальностей В итоге по сертификатам ЕГЭ было зачислено 35 человек. Из них 27 человек имели сертификаты по трем предметам, четыре абитуриента – по двум предметам, а один

сдавали в общем потоке, еще четыре предъявили сертификат только по одному предмету и сдавали в общем потоке два других.

По такому массиву данных можно сделать лишь предварительные выводы. Из числа заявивших сертификаты зачислено 50% абитуриентов. Это объясняется тем, что на конкурс представлялись сертификаты только с относительно высокими баллами, причем большинство из них имели результат по всем трем предметам.

Если говорить о географии структуры зачисления, то она оказалась весьма пестрой. Среди зачисленных присутствуют жители 12 регионов России, хотя, в основном, это регионы, относительно близкие к Санкт-Петербургу (Псковская, Мурманская, Костромская и другие области).

Заключение

1. Вступительные испытания: региональные олимпиады, единые государственные экзамены, летние вступительные испытания следует сохранить, так как они помогают вузам решить широкий спектр задач, стоящих пред ними при наборе на первый курс (выполнить план приема, отобрать лучших, оказать содействие при поступлении определенным социальным группам абитуриентов, сделать высшее образование доступным для абитуриентов из всех регионов России и др.).

2. Из рассмотренных форм вступительных испытаний целесообразно оставить две – письменные экзамены и тестирование, как взаимно дополняющие друг друга и позволяющие объективно оценить знания различных групп абитуриентов.

Литература

1. Разработка альтернативной схемы приема в высшие учебные заведения. Итоговый отчет по договору № 5.01.(124). 13.16 . М.: НИИ ВО, 2002

ТИПОВАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ

А.В. Лямин, М.С. Чежин

Цель использования системы дистанционного обучения (ДО) заключается в повышении качества обучения за счет активизации самостоятельной работы студентов, унификации аттестационных требований, прозрачности и управляемости учебного процесса. Использование системы ДО, материалы которой строятся на основе учебно-методических комплексов (УМК), позволяет получить единую структуру всех электронных учебно-методических элементов, привести их к единому стандарту и в результате обеспечить достижение указанной цели.

Электронный УМК должен основываться на рабочей программе соответствующей дисциплины. При этом описание учебного плана и рабочей программы дисциплины входит в электронный УМК, и при обращении к системе ДО именно их видит пользователь в первую очередь. Количество элементов электронных учебно-методических материалов и их объем должны соответствовать видам учебной работы и их трудоемкости, предусмотренным рабочей программой дисциплины, и должны быть разработаны на основе Государственных образовательных стандартов (ГОС). Учащийся, использующий УМК, видит все элементы во взаимосвязи (см. рис.1), что существенно облегчает его работу.

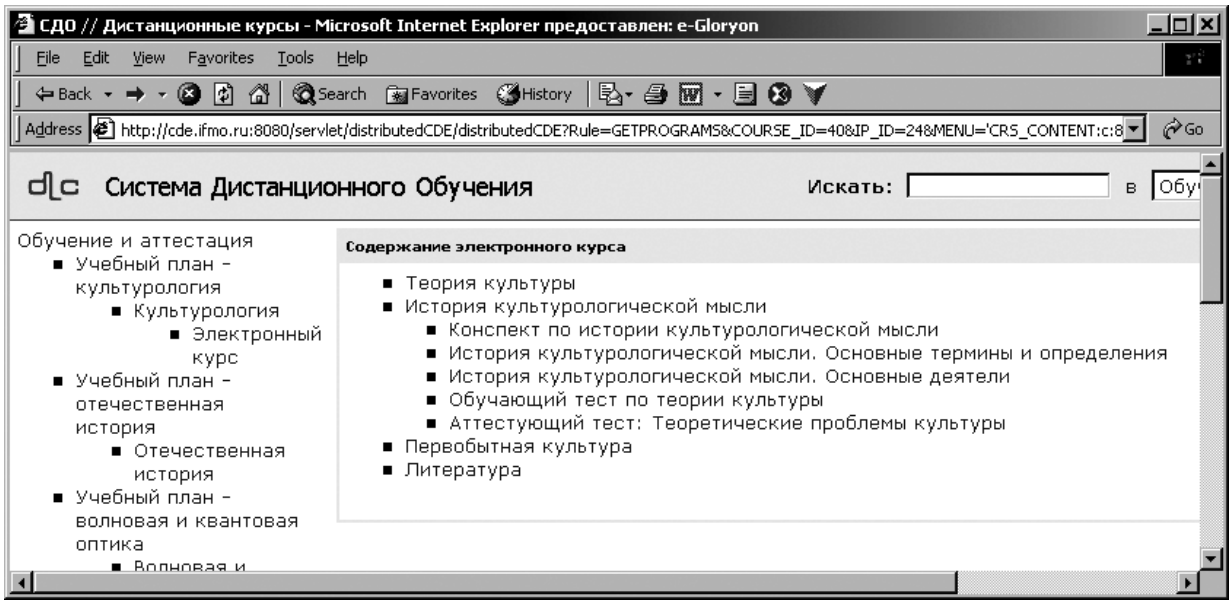


Рис. 1. Пример окна «Содержание электронного курса»

Система ДО СПбГУ ИТМО позволяет реализовывать такие виды электронных учебно-методических материалов, как электронные конспекты, аттестующие и обучающие тесты, виртуальные лаборатории и практикумы, информационные ресурсы. Кроме этого, электронный УМК содержит правила прохождения учащимися электронных учебно-методических материалов и проведения контроля знаний.

Рассмотрим подробнее элементы электронного УМК.

Электронный конспект. Обучение с использованием качественного электронного учебника или электронного конспекта становится нелинейным, адаптивным и, воз-

можно, более эффективным. Электронный УМК должен содержать набор конспектов, соответствующих количеству изучаемых тем, и, кроме этого, отдельные конспекты могут быть посвящены некоторым вспомогательным, справочным материалам. Набор электронных конспектов, безусловно, не может заменить традиционные формы изложения и изучения материала, но специфика организации материала в электронном конспекте, его структурированность и многослойность позволяют обучаемому самому выбирать траекторию обучения. Кроме того, современный персональный сетевой компьютер предоставляет дополнительные возможности (гипертекстовое изложение материала, качественные графические иллюстрации, анимация), которые позволяют вывести процесс обучения, в частности, работу с учебником, на совершенно новый уровень.

При создании электронных конспектов для системы ДО СПбГУ ИТМО следует придерживаться принципов высокой степени структурированности и многоуровневости изложения учебного материала, продуманности системы гипертекстовых ссылок.

Интерактивное взаимодействие студента с системой осуществляется посредством информационных страниц, которые представляют собой содержание, отображаемое на экране в текстовом (а точнее, гипертекстовом) и графическом виде (схемы, рисунки, графики, сложные формулы, фотографии) (рис.2). Современная версия системы ДО СПбГУ ИТМО позволяет внедрять на страницы электронного конспекта элементы мультимедиа (анимация, видео, аудио) (рис. 3). Таким образом, совокупность предъявляемых обучаемому информационных страниц (т.е. структурированной и разделенной на уровни информации) представляет собой электронный конспект.

Рис. 2. Пример окна электронного конспекта

Электронный конспект должен представлять собой дополнительное информационное обеспечение к лекциям по учебному курсу. В нем могут быть размещены схемы, графики, справочные материалы, необходимые при изучении материала дисциплины. Наличие этих материалов в электронном конспекте позволяет экономить лекционное время, которое студенты тратили на перерисовку данных материалов в свои конспекты, и больше внимания уделять изучаемым процессам. Таким образом, электронный конспект предназначен для организации самостоятельной работы студентов при изучении ими теоретических положений изучаемой дисциплины.

Электронный конспект в системе ДО СПбГУ ИТМО дополнительно может содержать информационные кадры. Кадр содержит небольшой объем информации, которая носит вспомогательный характер по отношению к материалу страниц электронного конспекта. В качестве такой информации могут выступать определения, иллюстрации, Flash-анимации и т.д. Примеры использования информационных кадров в электронных конспектах приведены на рис. 4, 5. Доступ к информации, размещенной в кадре, учащийся получает по ссылке с информационной страницы конспекта, при этом кадр не

входит в основную структуру электронного конспекта. Обращение к информации, размещенной в информационных кадрах, возможно и с помощью процедуры поиска, и путем выбора нужного кадра из списка.

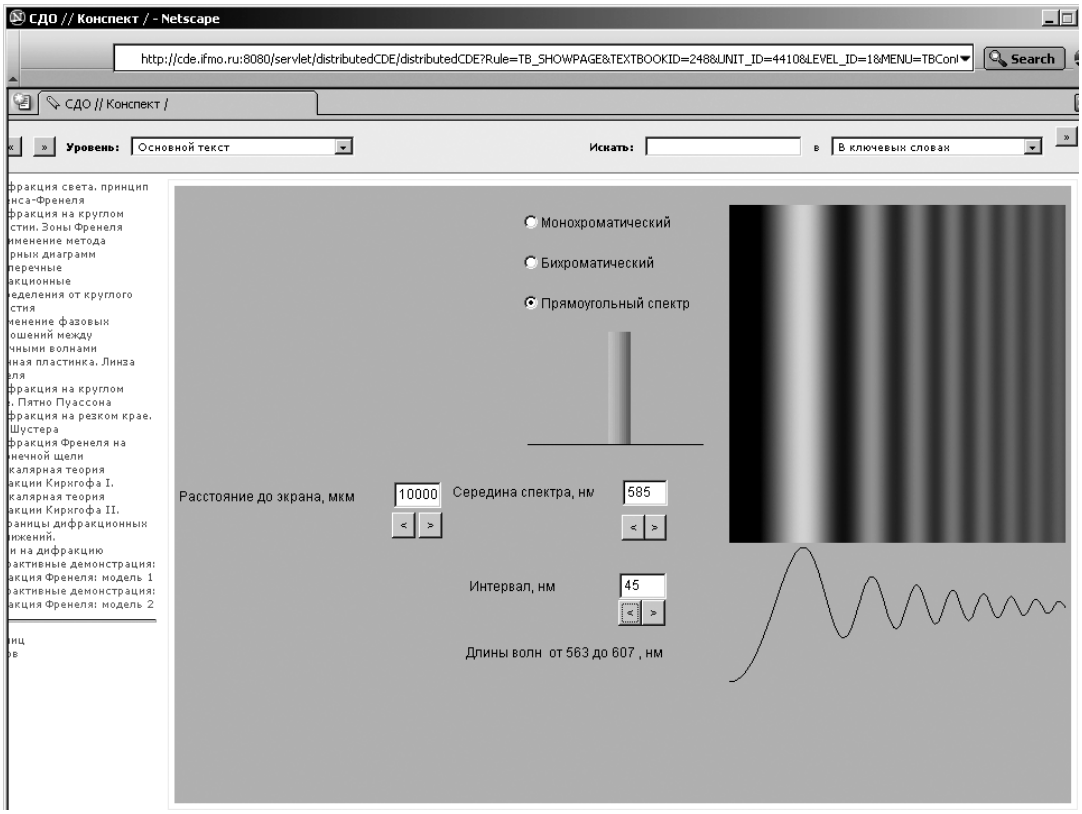


Рис. 3. Страница конспекта с интерактивной демонстрацией

Информационные ресурсы. Наряду с электронным конспектом, при изучении теоретических положений учебного курса и при выполнении практических работ студенту могут потребоваться некоторые дополнительные материалы.

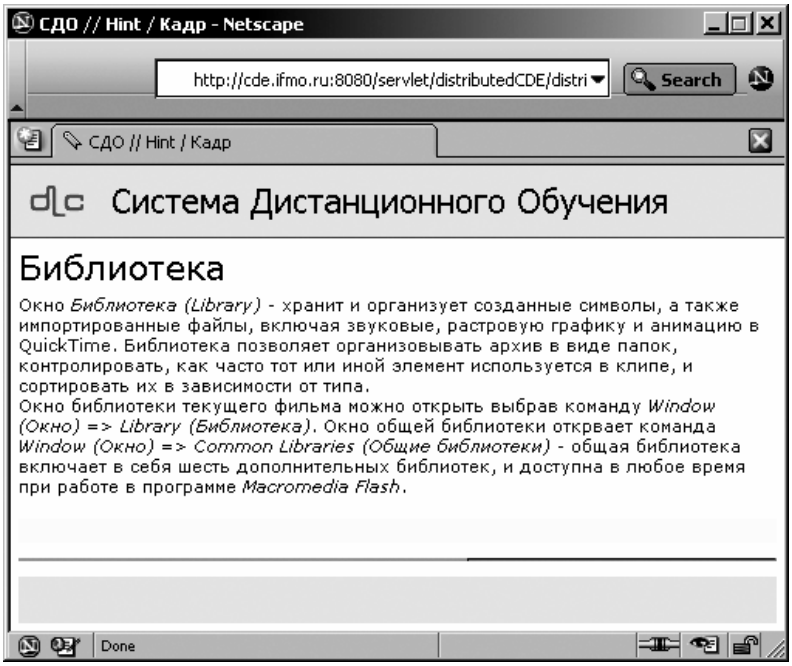


Рис. 4. Информационный кадр с текстовой информацией

Такими материалами могут быть чертежи, рисунки, тексты программ, базы данных, т.е. любая информация, которая может быть организована в виде файла или группы файлов. При этом, с одной стороны, данная информация не может быть отнесена к электронному конспекту, так как она не является структурированным и многослойным изложением теоретического материала, а, с другой стороны, никаких ограничений на тип файла не накладывается. Таким образом, информационные ресурсы являются вспомогательными материалами, предназначенными для выполнения самых различных заданий и работ по данному учебному курсу

Рис. 5. Информационный кадр с Flash-анимацией

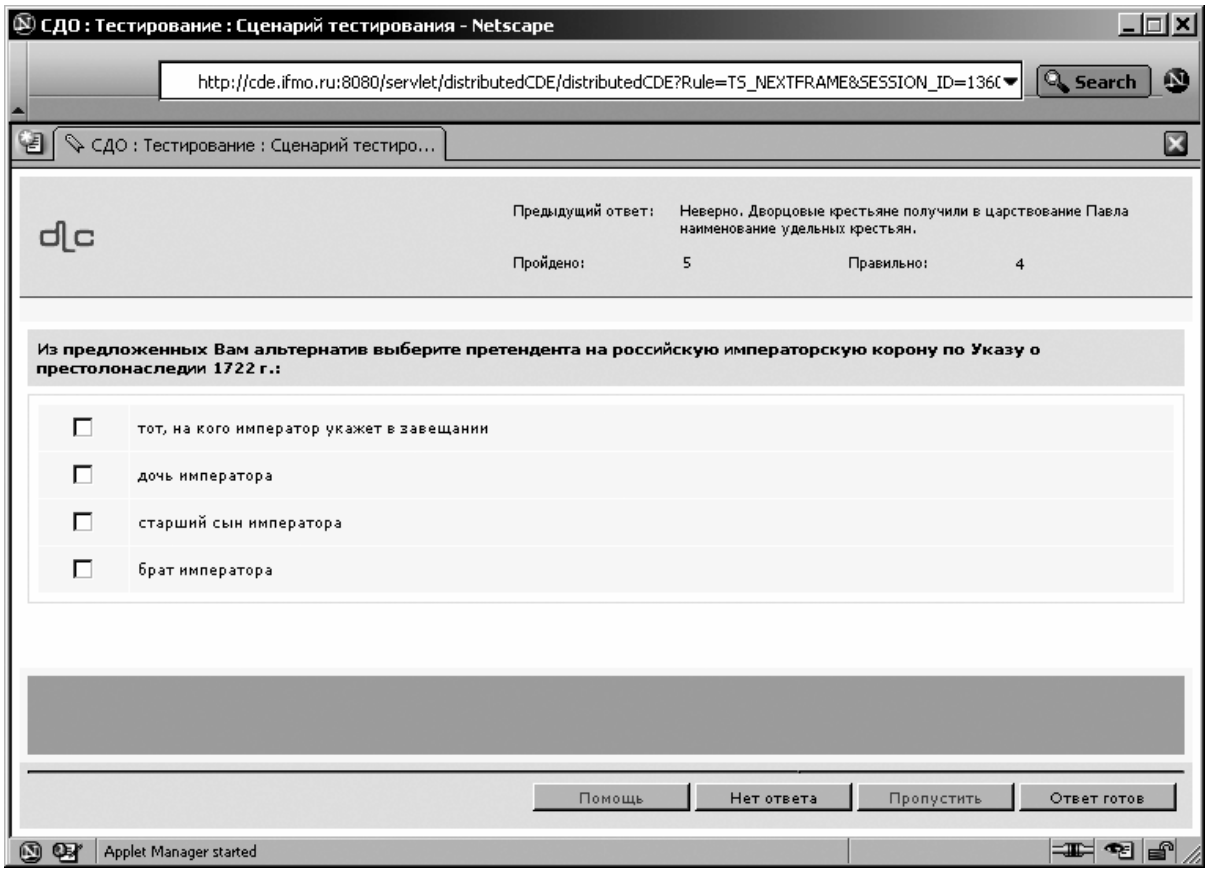


Рис. 6. Пример окна тест-кадра

Аттестующие и обучающие тесты. Система аттестующего и обучающего тестирования является одной из основных и наиболее методически отработанных подсистем в системе ДО. Ее внедрение позволило: унифицировать уровень знания, сделать объективным контроль знаний, уменьшить затраты времени на проверку знаний и, следовательно, сократить период контроля знаний. Отработка вопросов массового тестирования студентов, особенно на младших курсах, позволяет сконцентрировать усилия преподавательского коллектива на разработке новых педагогических технологий обучения.

Аттестующее тестирование знаний студентов, когда по результатам тестирования в базу данных системы ДО заносится оценка, позволяет автоматизировать процесс проставления зачетов, допусков к лабораторным работам и экзаменам.

Обучающее тестирование знаний служит, прежде всего, для подготовки студента к аттестующему тестированию, позволяет студенту лучше оценить уровень своих знаний и определить, какие вопросы нуждаются в дополнительной проработке. Таким образом, обучающее тестирование предназначено исключительно для организации самостоятельной работы студента.

Идеология построения тестовых заданий, их организация в УМК не претерпели существенных, принципиальных изменений по сравнению с прежней версией системы ДО, но обновился дизайн окна тест-кадра (рис.6).

Виртуальные лабораторные работы. Виртуальная лаборатория является модулем системы дистанционного обучения. В общем случае виртуальная лаборатория представляет собой некую информационную среду, позволяющую проводить эксперименты, не имея непосредственного доступа к объекту исследования. При этом эксперименты могут проводиться как с использованием математических моделей, так и с использованием удаленного доступа к изучаемому объекту. Лабораторная работа должна рассматриваться как часть электронного курса, в который входят также информационные страницы электронного учебника, тесты, практикум.

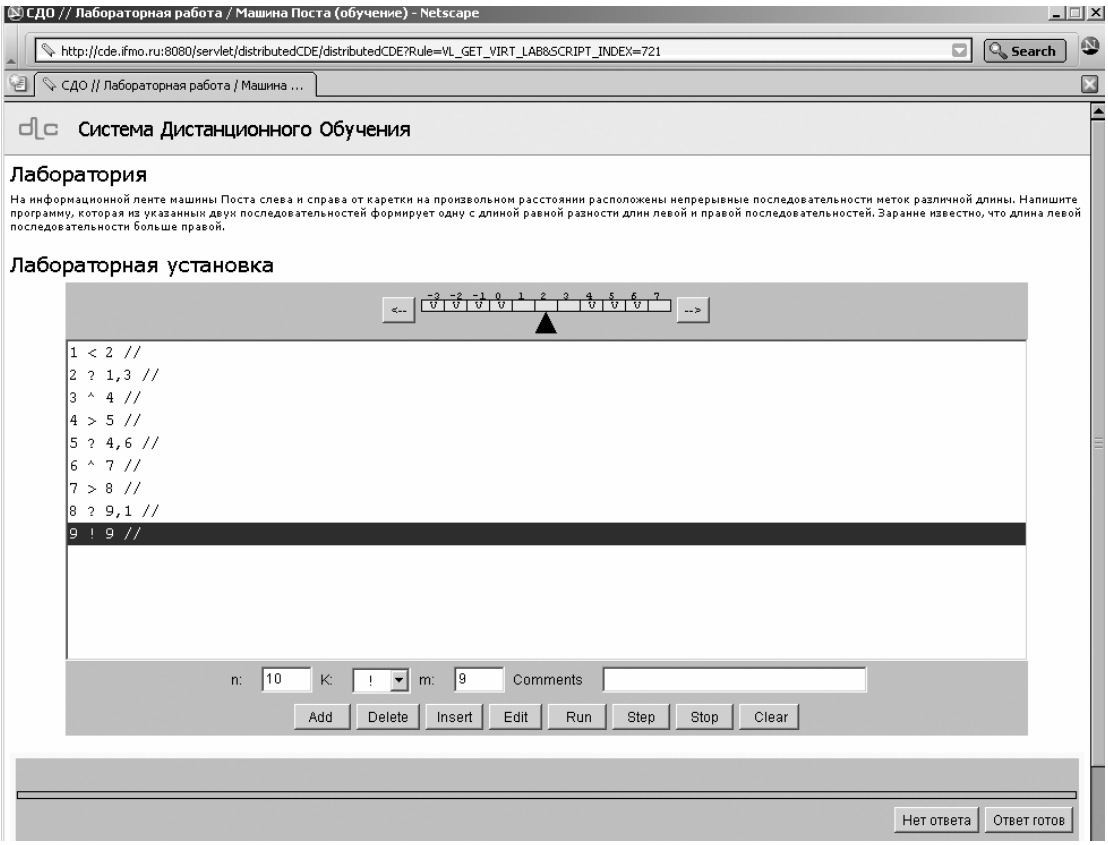


Рис. 7. Пример интерфейса виртуальной лаборатории

Каждая виртуальная лабораторная работа представляет собой обучающий комплекс, содержащий несколько компонентов:

- краткое описание и анализ теоретических аспектов изучаемого объекта, явления или процесса;
- описание приборов и оборудования, используемых для проведения исследований, их характеристики и порядок применения;
- исследование изучаемого объекта, явления или процесса по индивидуальной программе, обработка результатов и представление отчета.

Все компоненты виртуальной лаборатории размещаются в рамках одной страницы (см. рис. 7). Выполнение лабораторной работы заканчивается представлением отчета, который может быть проверен автоматически. В частном случае, результатом выполнения лабораторной работы может быть формальное описание какой-либо системы, которая оценивается по реакциям на эталонные воздействия. По результатам выполнения лабораторной работы в базу данных системы ДО заносится оценка, характеризующая выполнение студентом лабораторной работы.

К разработке виртуальной лаборатории следует приступать только в случае, когда невозможно реализовать авторский замысел средствами других видов электронных элементов системы – например, когда существует достаточно большое количество правильных ответов или задача проверки результата не является алгоритмической.

Электронный практикум. Практикум, являющийся модулем системы дистанционного обучения, содержит набор заданий, которые необходимо выполнить студенту. Предъявляемое задание выбирается из базы данных и закрепляется за конкретным студентом. В отличие от виртуальной лаборатории, задание, которое предъявляется студенту в рамках практикума, не требует мгновенного выполнения. Системой определяется срок, в течение которого задание должно быть сдано. Результатом выполнения задания должен быть файл, отсылаемый студентом в базу данных. Проверка правильности выполнения задания осуществляется преподавателем, который и проставляет оценки за выполненные задания. Данный модуль системы ДО может использоваться при организации таких видов учебной работы, как курсовой проект (работа), расчетно-графические работы, реферат.

Как видно из приведенного перечня, набор электронных элементов, которые могут входить в состав УМК, позволяет реализовать все виды учебных занятий и обеспечить выполнение 100% учебного плана. Таким образом, грамотно построенный УМК решает все задачи и организации самостоятельной работы студентов и текущего контроля успеваемости, что в результате должно привести к повышению качества обучения.

ОРГАНИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В СРЕДЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ УНИВЕРСИТЕТА

Е.Г. Гой, А.В. Лямин

В современных условиях развития российского общества наблюдается возрастание роли дистанционных технологий при подготовке специалистов различных профилей. К числу факторов, которые оказывают решающее влияние на образовательный процесс, относятся возросшая интенсификация обучения, непрерывное усложнение его содержания под влиянием постоянного развития науки и общественной практики. Поэтому дистанционное обучение (ДО) становится неотъемлемой формой учебного процесса в высшей школе. На вооружение в дистанционном обучении взяты не только единые программы обучения, апробированные формы и методы организации учебного процесса, но и многое другое, в том числе: постоянный контроль знаний, широкое внедрение в учебный процесс новейших технических средств и технологий, повышение квалификации профессорско-преподавательского состава, организация исследований в интересах совершенствования учебного процесса. Все это объясняет активное использование системы дистанционного обучения (http://cde.ifmo.ru) в учебном процессе нашего университета. Благодаря особенностям построения (принципы открытости, универсальности и использования стандартных сетевых технологий), ресурсы системы доступны и преподавателям вуза, и студентам всех форм обучения.

Наиболее эффективно ресурсы системы ДО используются при обучении студентов дневной формы. К ним относятся: электронные учебники, обучающие и тестирующие системы, виртуальная лаборатория, учебно-методические комплексы. Благодаря особенностям построения, электронные учебники позволяют студентам самостоятельно проработать теоретический материал, полученный на лекциях, и углубить свои знания. Для подготовки к аттестациям в системе ДО по ряду дисциплин разработаны обучающие тесты и типовые варианты аттестующих тестов. Возможность работы с обучающими элементами системы предоставляется студентам в центре дистанционного обучения, в компьютерных классах факультетов и выпускающих кафедр, с домашних компьютеров, имеющих выход в Интернет. Учебные ресурсы системы дистанционного обучения используются в качестве дополнения к традиционным формам и средствам обучения. Они позволяют активизировать самостоятельную работу студентов при изучении различных дисциплин, повысить качество их знаний.

На сегодняшний день база данных системы содержит информацию по 53-м учебным дисциплинам. Среди них дисциплин цикла ГСЭ – 8, естественнонаучных дисциплин – 10, общепрофессиональных – 20, специальных – 15. Информация по количеству элементов в системе ДО по циклам дисциплин представлена в табл. 1.

Цикл дисциплин	**Кол-во дисциплин**	**Аттестация (кол-во сценариев)**	**Обучение (кол-во сценариев)**	**Тест-кадры**	**Учебники**	**УМК**
ГСЭ	8	353	75	6074	7	2
ЕН	10	89	17	11550	25	9
ОПД	20	60	23	5400	18	4
СД	15	39	9	3069	19	2
Итого:	53	541	124	26093	69	17

Таблица 1. Ресурсы системы дистанционного обучения

Начиная с 2003 / 2004 учебного года, по некоторым дисциплинам текущий контроль и промежуточная аттестация студентов проводится в системе дистанционного обучения.

На основании этого делаются выводы об успешности обучения студентов в течение семестра: оценивается ритмичность учебной работы и качество усвоения содержания образовательных программ. Текущий контроль успеваемости студентов обеспечивается аттестующими элементами системы дистанционного обучения, которые являются неотъемлемой частью электронного учебно-методического комплекса. Компьютерная аттестация студентов проводится в центре дистанционного обучения и в специализированных компьютерных классах СПбГУ ИТМО. В центре дистанционного обучения оборудовано 60 посадочных мест, а в общей сложности, включая специализированные компьютерные классы, одновременно могут аттестоваться около двухсот человек. За осенний семестр текущего учебного года 82 % аттестаций проведено в центре ДО, 8% – в компьютерных классах инженерно-физического факультета, факультета оптико-информационных систем и технологий (пер. Гривцова), 4% – в компьютерном классе гуманитарного факультета (пер. Вяземский). На остальные классы приходится всего 6%.

Текущий контроль успеваемости студентов и промежуточная аттестация проводятся по графику в соответствии с положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации студентов, учебными планами и рабочими программами дисциплин. Каждый студент может ознакомиться с этой информацией в начале семестра на сайте центра дистанционного обучения и, используя обучающие элементы соответствующего учебного курса, самостоятельно подготовиться к аттестациям.

Результаты аттестации студентов заносятся и сохраняются в базе данных системы ДО в течении семестра. Они предоставляются через базу данных системы ДО деканам факультетов, заведующим кафедрами и преподавателям для отслеживания текущей успеваемости и управления учебным процессом. Результаты текущего контроля успеваемости учитываются при формировании зачетных и экзаменационных ведомостей.

В осеннем семестре 2003 / 2004 учебного года проведено около 55000 сеансов аттестаций. Протестировано 3848 студентов, что составляет 54,4% из всех, обучающихся в университете. Аттестации проводились по 26-ти дисциплинам. Суммарное время работы студентов в системе тестирования составило 28397 часов. Однако, несмотря на общие внушительные цифры, среднее время работы одного студента в системе тестирования не превышает двенадцати астрономических часов по первому курсу, а для остальных намного меньше (табл. 2). Причем в это время включена и работа с обучающими сценариями, и тестирование, и просмотр результатов. Это показывает низкое содержание в системе обучающих ресурсов (соотношение количества аттестующих и обучающих ресурсов системы показано в табл. 1). Также с увеличением курса наблюдается уменьшение количества студентов, работавших в системе. Это объясняется низкой наполненностью системы по общепрофессиональным и специальным дисциплинам.

Курс	**Кол-во студентов (%)**	**Суммарное время работы в системе тестирования (акад. часов)**	**Среднее время работы в системе тестирования одного студента (акад. часов)**
Первый	85,5	19880	12.01
Второй	83,5	6120	4.73
Третий	38,0	1348	2.50
Четвертый	19,5	668	2.80
Пятый	12,9	381	3.15

Таблица 2. Статистика использования системы тестирования

Динамика изменения обращений к образовательным ресурсам системы за 2003 год представлена на рис. 1. В левой части диаграммы представлена динамика обращений (Hits) к ресурсам системы ДО. Из рисунка видно, что по сравнению с весенним семест-

ром 2002 / 2003 учебного года, когда пик обращений пришелся на конец семестра (июнь), в осеннем семестре всплеск активности наблюдался с самого начала. В течение семестра наблюдается равномерное распределение обращений. Уменьшение количества обращений в январе объясняется занятостью студентов во время зимней сессии. Однако этот результат сопоставим с самыми активными месяцами весеннего семестра прошлого учебного года. Таким образом, можно говорить об увеличении интереса к ресурсам системы со стороны студенчества.

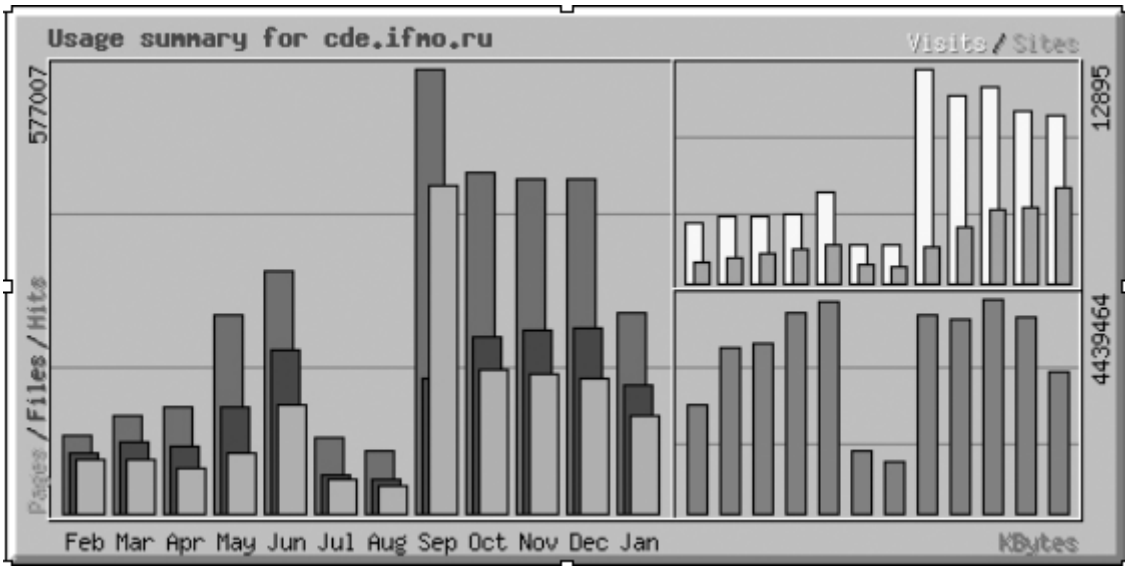


Рис. 1. Статистика обращений к серверу системы ДО

Можно также говорить и о расширении географии обращений. На правой верхней части диаграммы отображены изменения количеств обращений (Visits) и IP-адресов (Sites), с которых происходили эти обращения. Их увеличение не может не радовать, однако только 5% обращений было сделано не из компьютерных классов университета. На правой нижней части диаграммы показана динамика изменения количества скачанной информации в килобайтах. Минимум приходится на летние месяцы – июль и август. Небольшое снижение количества скачанной информации приходится на январь. В течение остальных месяцев наблюдается примерно одинаковый уровень интереса к информации, размещенной на сервере системы дистанционного обучения.

Опыт использования системы дистанционного обучения в учебном процессе университета показывает, что дистанционные технологии являются мощным средством информационной поддержки при обучении студентов дневной формы обучения. Их использование способствует активизации самостоятельной работы студентов. Использование ресурсов системы ДО помогает поддерживать установленный образовательный уровень студентов, предоставляет преподавателю возможность уделять больше внимания индивидуальной работе со студентами. Благодаря открытости и доступности результатов работы студентов в системе можно судить об уровне усвоения ими учебного материала, эффективности работы кафедр, сравнивать результаты обучения конкретным дисциплинам в разных группах. Однако, несмотря на очевидные преимущества, многие учебные кафедры не проявляют активности по наполнению и использованию системы ДО. К сожалению, приходится сталкиваться с несогласованностью по использованию ресурсов системы в учебном процессе и учету результатов аттестаций студентов между преподавателями некоторых кафедр, несвоевременным информированием студентов о сроках и порядке прохождения аттестаций.

Для повышения эффективности использования ресурсов системы ДО и рабочих мест компьютерного класса в центре разработана и вступает в действие с весеннего се-

местра текущего учебного года новая система формирования расписания аттестаций. С ее помощью студенты могут зарезервировать себе рабочее место в компьютерном классе ЦДО (101 ауд.) и пройти аттестации в удобное время. Запись осуществляется через сайт ЦДО. Для этого необходимо ввести свои логин и пароль, выбрать день и время, указать дисциплины, по которым студент планирует пройти аттестацию. Аттестации могут быть пройдены заранее, но не позже сроков, указанных в графике аттестаций. Также планируется выделять время для самостоятельной подготовки студентов к аттестациям с использованием учебных ресурсов системы. Это позволит студентам самостоятельно определять собственный темп и траекторию обучения, будет способствовать повышению качества их подготовки.

ГОМОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Аржаник, С.В. Воллосович, А.В. Лямин

Введение

Большинство современных информационно-управляющих систем основываются на реляционной модели данных. Эта модель является самой проработанной и позволяет эффективно хранить и получать доступ к данным. В то же время занимает все более серьезные позиции формат eXtensible Markup Language (XML). Происходит это по нескольким причинам:

1 гибкость, понятность и доступность формата позволяют хранить практически любые иерархические структуры без изучения языка программирования;
2 стандартизация структур данных при помощи файлов описания DTD (Document Type Definition), XSD (XML Schema Definition) позволяет устанавливать единые форматы обмена данными как внутри одной организации, так и региональные, национальные, международные;
3 стандарт данных позволяет осуществлять проверку структуры вводимых, передаваемых или получаемых данных.

При использовании обоих форматов (реляционного – для функционирования системы, XML – для обмена данными) естественным образом встает вопрос о преобразовании структур. Важная особенность здесь – цель совместного использования той и другой технологии с сохранением преимуществ каждой из них: доступность, понятность и содержательная ориентированность XML и производительность, надежность, целостность реляционной структуры. Наиболее вероятно, что в этом случае XML-документ не всегда будет непосредственным отражением одной таблицы базы данных.

Для стандартизации структуры XML-документа используются DTD и XSD-описания. При помощи DTD–определений возможно задание основных объектов предметной области (ELEMENT, естественное сопоставление с таблицей), их атрибутов (ATTLIST, естественное сопоставление с полями таблицы), а также вложенных объектов (естественное сопоставление со связанной таблицей с внешним ключом). Схема XSD, приближенная к самому языку XML, дает возможность более детально указывать типы данных атрибутов. Обе концепции позволяют задавать возможные количества вложенных объектов (один; нет, один или больше; нет или один). Таким образом, с точки зрения модели, данные XML представляют из себя дерево, и, следовательно, естественно поддерживаемыми типами отношений между объектами являются отношения «один-к-одному» и «один-ко-многим». Реализация отношения «многие-ко-многим» требует явного использования ссылочных атрибутов или задания определенных правил.

В системе дистанционного обучения СПбГУ ИТМО все элементы компьютерного обучения по дисциплине объединены в учебно-методических комплекс (УМК). Входным форматом описания электронных УМК служит язык XML. При загрузке УМК в базу данных (БД) системы происходит трансформация XML-документов на основе оригинальной системы правил, которая обеспечивает возможность гибкого изменения как структуры базы данных, так и XML-документов.

В статье приведен обзор стандартных средств преобразования XML-документов, описание оригинальной системы правил сопоставления структуры XML-документов и базы данных и пример построения XML-документов, удовлетворяющих структуре базы данных.

Обзор стандартных средств преобразования

Многие современные версии локальных и клиент-серверных систем управления базами данных (СУБД) поддерживают разные встроенные виды XML-преобразований. Как правило, они подразумевают соответствия: одна таблица – один тег XML, одно поле – один тег, вложенный в тег таблицы. Данные записываются в качестве содержимого элементов.

Microsoft Access, начиная с версии Access XP, поддерживает импорт и экспорт индивидуальных таблиц в формате XML. При экспорте у пользователя есть следующие возможности (или любые их комбинации): экспорт данных (XML), экспорт схемы XML (XSD), экспорт представления (XSL, HTML). В случае экспорта формируемая схема основывается на указанных принципах соответствия и поддерживает типы данных для возможности последующего импорта в Access и SQL Server, а также содержит информацию об индексах и первичных ключах. Запрет одновременного экспорта нескольких таблиц исключает возможность записи в XML-формате реляционных связей между таблицами (внешних ключей).

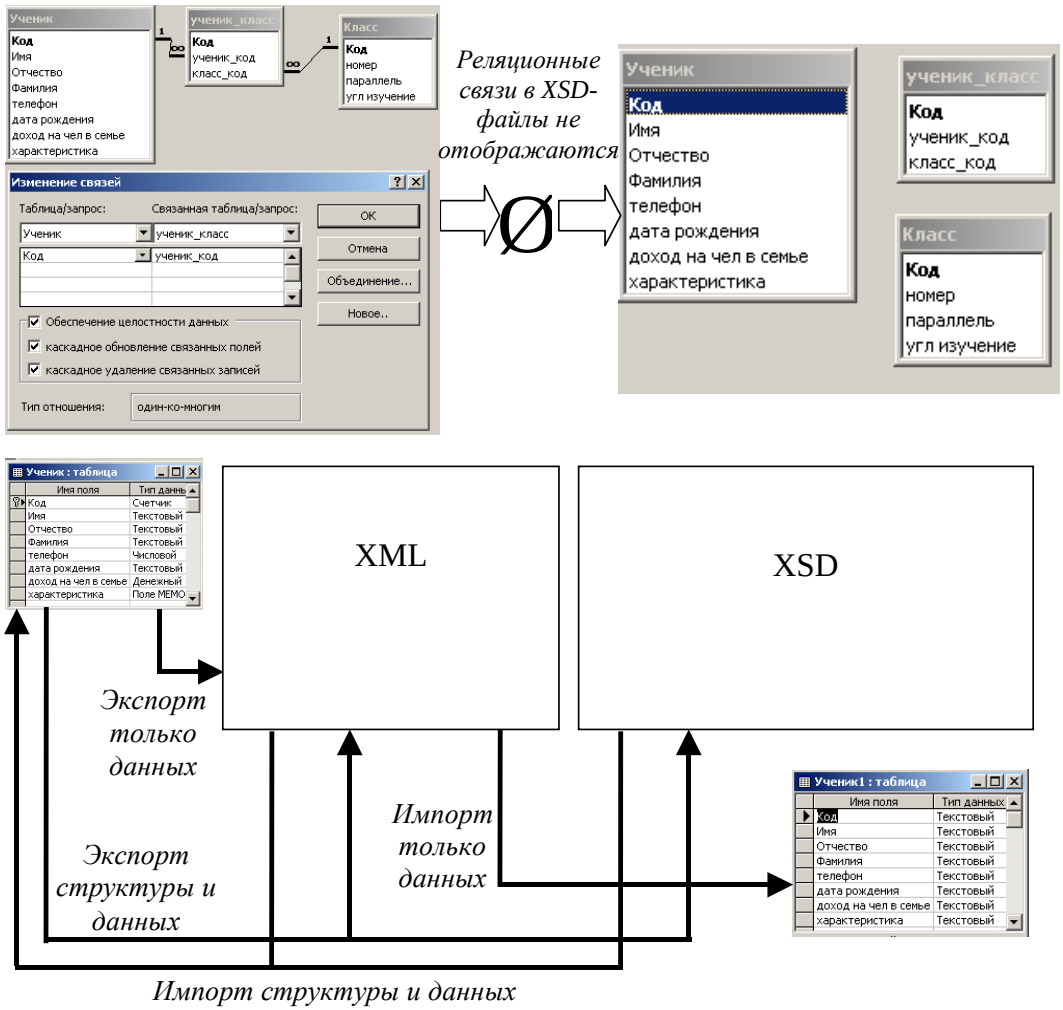


Рис.1. Различные варианты XML-реляционного импорта-экспорта в MS Access XP+

Импорт в индивидуальную таблицу в MS Access XP+ может осуществляться из любого правильно построенного, но не обязательно основанного на схеме XML-документа. В случае наличия схемы, основанной на стандартных обозначениях, принятых при экспорте, происходит создание новой таблицы (при наличии одноименной к названию прибавляется

номер) с учетом индексов и типов данных. В случае отсутствия – новая таблица будет иметь все поля с текстовым типом данных. Допускается также импорт только схемы данных с созданием новой таблицы (рис. 1). Ниже приведен текст экспортируемого XML-документа:


```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<dataroot xmlns:od="urn:schemas-microsoft-com:officedata"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2000/10/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="Ученик.xsd">
<Ученик>
<Код>1</Код>
<Имя>Иван</Имя>
<Отчество>Иванович</Отчество>
<Фамилия>Иванов</Фамилия>
<телефон>1234567</телефон>
<дата_рождения>31.01.1990</дата_рождения>
<доход_на_чел_в_семье>2500</доход_на_чел_в_семье>
<характеристика>Старательный ученик, получает 5-рки, поведение
отлично</характеристика>
</Ученик>
<Ученик>
<Код>2</Код>
<Имя>Екатерина</Имя>
<Отчество>Ивановна</Отчество>
<Фамилия>Сидорова</Фамилия>
<телефон>4236812</телефон>
<дата_рождения>27.03.1990</дата_рождения>
<доход_на_чел_в_семье>7500</доход_на_чел_в_семье>
<характеристика>Хулиганка страшная, перечит педагогам, хамит и
мешает</характеристика></Ученик>
    </dataroot>
```


Текст XSD-схемы будет иметь вид:


```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xsd:schema xmlns:xsd="http://www.w3.org/2000/10/XMLSchema" xmlns:od="urn:schemas-
microsoft-com:officedata">
<xsd:element name="dataroot">
<xsd:complexType>
<xsd:choice maxOccurs="unbounded">
<xsd:element ref="Ученик"/>
</xsd:choice>
</xsd:complexType>
</xsd:element>
<xsd:element name="Ученик">
<xsd:annotation>
<xsd:appinfo>
<od:index index-name="PrimaryKey" index-key="Код " primary="yes" unique="yes"
clustered="no"/>
</xsd:appinfo>
</xsd:annotation>
<xsd:complexType>
```

```
<xsd:sequence>
<xsd:element name="Код" od:jetType="autonumber" od:sqlSType="int" od:autoUnique="yes"
od:nonNullable="yes">
<xsd:simpleType><xsd:restriction base="xsd:integer"/></xsd:simpleType>
</xsd:element>
<xsd:element name="Имя" minOccurs="0" od:jetType="text" od:sqlSType="nvarchar">
<xsd:simpleType>
<xsd:restriction base="xsd:string"><xsd:maxLength value="50"/></xsd:restriction>
</xsd:simpleType>
</xsd:element>
<xsd:element name="Отчество" minOccurs="0" od:jetType="text" od:sqlSType="nvarchar">
<xsd:simpleType>
<xsd:restriction base="xsd:string"><xsd:maxLength value="50"/></xsd:restriction>
</xsd:simpleType>
</xsd:element>
<xsd:element name="Фамилия" minOccurs="0" od:jetType="text" od:sqlSType="nvarchar">
<xsd:simpleType><xsd:restriction base="xsd:string"><xsd:maxLength value="50"/>
</xsd:restriction>
</xsd:simpleType>
</xsd:element>
<xsd:element name="телефон" minOccurs="0" od:jetType="longinteger" od:sqlSType="int">
<xsd:simpleType><xsd:restriction base="xsd:integer"/></xsd:simpleType>
</xsd:element>
<xsd:element name="дата_x0020_рождения" minOccurs="0" od:jetType="text"
od:sqlSType="nvarchar">
<xsd:simpleType>
<xsd:restriction base="xsd:string"><xsd:maxLength value="50"/></xsd:restriction>
</xsd:simpleType>
</xsd:element>
<xsd:element name="доход_x0020_на_x0020_чел_x0020_в_x0020_семье" minOccurs="0"
od:jetType="currency" od:sqlSType="money" type="xsd:double"/>
<xsd:element name="характеристика" minOccurs="0" od:jetType="memo" od:sqlSType="ntext">
<xsd:simpleType><xsd:restriction base="xsd:string"><xsd:maxLength
value="536870910"/></xsd:restriction></xsd:simpleType>
</xsd:element>
</xsd:sequence>
</xsd:complexType>
</xsd:element>
</xsd:schema>
```


Клиент-серверная СУБД Oracle имеет несколько возможностей для работы с XML-содержимым. Эти возможности делятся на два типа: поддержка непосредственного хранения XML в базе данных (в той или иной форме) и программное манипулирование данными – запросы на выборку, генерирующие XML, обновление и вставку XML-содержимого, разбор XML-документов.

Как и любые другие данные, XML в Oracle можно хранить в полях CLOB. Этот способ предполагает основной вид доступа к XML-документу как к единому целому (выборка целиком и вставка целиком). В 9-й версии Oracle появился новый тип данных поля – XMLType, специально ориентированный на XML. Есть возможность создания XMLType-

таблиц и отдельных полей. При создании поля есть две возможности: хранение в структурированном виде (для каждого элемента и атрибута по определенному алгоритму создаются скрытые поля, обязательно задавать XSD-схему XML) и хранение в неструктурированном виде (создается скрытое поле CLOB, для которого поле XMLType является ярлыком, здесь использование схемы XSD необязательно). Структурированный вид предполагает более быстрый, похожий на реляционный (но нетождественный), физический доступ к содержимому, облегченное обновление и поиск данных. При структурированном хранении используются те же типы индексирования, что и при доступе к реляционным данным. Логически возможности доступа расширяются – использование в SQL операторов existNode, extract и т.д. Однако этому способу свойственен ряд ограничений, связанных с преобразованием XSD-сложных типов (complexTypes) и простейших типов данных. При неструктурированном хранении возможно использование индексирования Oracle Text. Однако производительность обоих способов меньше, чем производительность при непосредственном реляционном доступе. Кроме того, технология не является до конца проработанной: версия 9.2.0.1 XML Repository подвергалась значительной переработке с точки зрения ошибок до версии 9.2.0.2.

XML-ориентированные программные возможности включают XDK (XML Developer's Kit) для языков PL/SQL, Java, C++. В состав инструментария входят процессоры XML-схемы, языка XSLT (eXtensible Stylesheet Language Transformation), XML-парсер, а также утилита XSU (XML SQL Utility), позволяющая генерировать XML на основе реляционных запросов с возможностью одновременного формирования DTD-определе-ния или XSD-схемы. Появившаяся в 8-й версии XDK развивается по ходу выпуска новых. Использование XSU позволяет получать результаты запросов, а также производить вставку XML в виде, подобном приведенному на рис. 2.

Рис. 2. XML-реляционный импорт в Oracle 9i

Встроенные в известные СУБД возможности делятся на два типа: программные возможности SQL-выборки в виде XML, а также вставки XML в реляционные (объектно-реляционные) структуры и возможности непосредственного хранения XML-содержимого в БД. Первые, как правило, устанавливают непосредственные соответствия тегов и полей одной таблицы. Вторые обладают пониженной производительностью и пока не оптимизированы и недостаточно отлажены. Кроме того, в случае неструктурированного хранения данных XML-содержимое будет значительно увеличивать объемы БД, использование же технологий сжатия XML (например, Oracle XML Compression) еще более замедлит работу системы.

Оригинальная система правил отображения XML-документов на структуру базы данных

Альтернативой использованию встроенных средств XML-преобразований является написание специализированных программных утилит преобразования. Такие утилиты являются более гибкими и могут реализовывать практически любые алгоритмы (правила) преобразования.

№	Описание правила
1	Обход дерева XML-документа ведется сверху вниз, текущей таблицей становится первый встреченный элемент, совпавший по названию с именем таблицы.
2	Элемент, название которого совпадает с таблицей, содержащий данные в формате PCDATA, интерпретируется как поле DATA в таблице, название которой совпадает с названием элемента.
3	Элемент, название которого не совпадает с таблицей, содержащий данные в формате PCDATA, интерпретируется как поле в текущей таблице (имя поля есть имя элемента).
4	Элемент, имя которого совпадает с названием таблицы, имеющий атрибут IsKey, равный "Yes", заносится только в том случае, если в этой таблице не существует такой записи. Если такая запись имеется, транслятор генерирует сообщение об ошибке. Сообщение об ошибке генерируется и в том случае, когда атрибут IsKey установлен в "No" и записи, соответствующей данному элементу, в таблице нет.
5	Элемент, имя которого совпадает с названием таблицы и для которого не задан атрибут IsKey, заносится в таблицу. Если запись уже существует, происходит обновление связей. Иначе в таблицу заносится новая запись.
6	Все атрибуты - это поля в текущей таблице.
7	Если атрибут какого-либо элемента совпадает с названием таблицы, то из таблицы TABLE_INDEX с полями TABLE_NAME, RETURN_COLUMN, INDEX_COLUMN выбирается запись, поле TABLE_NAME которой совпадает со значением атрибута. Затем из таблицы с названием атрибута выбирается значение поля, название которого хранится в поле RETURN_COLUMN записи, которая удовлетворяет условию INDEX_COLUMN=*значение_атрибута*.
8	Атрибут с названием SRC заносится в поле SRC текущей таблицы, а файл, на который указывает атрибут, погружается в виде бинарных данных в поле CNT текущей таблицы.
9	Элементу с названием ATTACH автоматически добавляется атрибут CRC32 со значением подсчитанной контрольной суммы по алгоритму CRC32. Этот атрибут заносится в таблицу ATTACH. Подсчет контрольной суммы внедрен для соблюдения уникальности и устранения дублирования данных.
10	Если поле с названием атрибута отсутствует в текущей таблице, то необходимо перейти вверх по иерархии XML-документа и осуществить поиск таблицы с нужным полем. Поиск начинается с таблицы, название которой образовано из имен дочернего и родительского элементов, разделенных символом "_".
11	Если существует таблица с названием, образованным из имен дочернего и родительского элементов, разделенных символом "_", то осуществляется связь "многие-ко-многим".
12	Если таблицы связи нет, происходит попытка использовать связь "многие-к-одному", т.е. заносится значение поля ID из таблицы с названием родительского элемента в таблицу с названием дочернего элемента. В таблице с названием дочернего элемента должно быть поле с названием родительского элемента.
13	Если не удалось установить связь "многие-к-одному", заносится значение поля ID из таблицы с названием дочернего элемента в таблицу с названием родительского

	элемента. В таблице с названием родительского элемента должно быть поле с названием дочернего элемента.
14	Для элемента, у которого не указано никаких атрибутов, но название совпадает с названием таблицы, в БД будет занесено только значение поля ID. Для таких элементов всегда должны существовать вложенные элемент DATA или текстовые данные PCDATA, вложенные в текущий элемент.

Таблица 1. Правила XML-relational преобразования

При разработке новой системы дистанционного обучения СПбГУ ИТМО в качестве хранилища материалов учебно-методического комплекса использовалась СУБД Oracle 8i, а в качестве инструмента обмена информацией с авторами УМК по различным дисциплинам был использован XML. В качестве стандарта содержимого УМК, предназначенного для погрузки в БД, было принято несколько типов XML-файлов, предназначенных для различных составляющих (электронные конспекты, практикумы, тестовые задания, виртуальные лаборатории). Для каждого типа было написано DTD-определение. Каждый файл является логически законченным объектом, удобным для заполнения. С другой стороны, структура БД отражает технические особенности системы (нормализация, оптимизация при помощи индексов и т.д.) и ориентирована на динамичную обработку и гибкую выдачу содержимого клиентским процессам. Для поддержки преобразования в БД разработана служебная таблица, содержащая информацию о подстановке внешних ключей из таблиц-справочников. Для погрузки материалов разработана система правил, представленная в табл. 1. Следование данным правилам приводит к отображению тегов в сущности базы данных, а вложенностей тегов – в реляционные связи.

Пример описания элемента УМК

Рассмотрим пример из используемой системы дистанционного обучения, в котором структура базы данных остается неизменной, формат XML-документа меняется в связи с потребностями ввода, при этом используется один и тот же код погрузчика. Структура электронного конспекта реализуется в XML посредством элементов TextBookUnit (модуль), каждый модуль содержит страницы (элементарная порция непосредственного содержания, элемент TextBookPage). В то же время в системе заложен принцип схемы. Схема – пространство для учебного содержания, находящееся с авторами материалов и электронными конспектами в отношении "многие-ко-многим". Это позволяет гибко создавать универсальные ссылки на различные элементы и накапливать содержание, не привязываясь к авторам и курсам, облегчая работу одного автора над несколькими дисциплинами или нескольких авторов над одной. Для рассматриваемого примера важно, что звеном, связывающим TextBookUnit и TextBookPage, является элемент PageIndex, необходимый, в первую очередь, для отнесения страницы к определенной схеме (атрибут Scheme).

```
create table TEXTBOOKPAGE
(
 ID NUMBER(8) not null,
 PAGEINDEX NUMBER(8) not null,
 NAME VARCHAR2(255) not null,
 TEXTBOOKUNIT NUMBER(8) not null,
 LEVEL_ NUMBER(8) not null,
 SRC VARCHAR2(255) not null,
 CNT CLOB not null,
 COMMENT_ VARCHAR2(4000),
 ENCODING NUMBER(8) not null,
 LANGUAGE NUMBER(8) not null
);
```

```
create table TEXTBOOKUNIT
(
 ID NUMBER(8) not null,
 TEXTBOOK NUMBER(8) not null,
 PART NUMBER(3) not null,
 NAME VARCHAR2(255) not null,
 TEXTBOOKUNIT NUMBER(8)
);
create table PAGEINDEX
(
 ID NUMBER(8) not null,
 PAGEID NUMBER(10) not null,
 PAGETYPE NUMBER(2) not null,
 SCHEME NUMBER(8) not null
);
```

Рис. 3. DDL SQL-составляющая XML-модели

В процессе практической работы возникают две ситуации.

1 Автор предоставил полный конспект по одному курсу. Логичным представляется ввод данных, когда тегом верхнего уровня является TextBookUnit, т.е. сначала составляется содержание конспекта, а затем его реализация. В процессе погрузки связывание сущностей происходит на этапе обработки элемента TextBookPage (двукратное применение правила 13).

2 В распоряжении имеется некоторое количество страниц из различных курсов. Здесь ввод данных естественно начать со схемы, продолжить описанием страницы, а затем уже отнести ее к определенному конспекту. В процессе погрузки связывание сущностей происходит на этапе обработки элементов TextBookPage и TextBookUnit (применение соответственно правил 14 и 13).

В табл. 2 приведена DTD-составляющая реляционной модели для первого и второго случаев соответственно. На рис. 3 приведена неизменная DDL (Data Definition Language) SQL (Structured Query Language)-составляющая XML-модели.

Первый случай	Второй случай
<!ELEMENT PageIndex (TextBookPage)> <!ATTLIST PageIndex Scheme CDATA #REQUIRED PageType CDATA #FIXED "TextBook" PageID CDATA #REQUIRED IsKey CDATA #FIXED "Yes" > <!ELEMENT TextBookUnit (PageIndex+)> <!ATTLIST TextBookUnit Name CDATA #REQUIRED Part CDATA #REQUIRED > <!ELEMENT TextBookPage (KeyWord*, Attach*, Comment?)> <!ATTLIST TextBookPage Name CDATA #REQUIRED Level CDATA #REQUIRED Src CDATA #REQUIRED Language CDATA "ru" Encoding CDATA "Cp1251" >	<!ELEMENT PageIndex (TextBookPage)> <!ATTLIST PageIndex Scheme CDATA #REQUIRED PageType CDATA #FIXED "TextBook" PageID CDATA #REQUIRED IsKey CDATA #FIXED "Yes" > <!ELEMENT TextBookPage (TextBookUnit, KeyWord*, Attach*, Comment?)> <!ATTLIST TextBookPage Name CDATA #REQUIRED Level CDATA #REQUIRED Src CDATA #REQUIRED Language CDATA "ru" Encoding CDATA "Cp1251" > <!ELEMENT TextBookUnit (EMPTY)> <!ATTLIST TextBookUnit Name CDATA #REQUIRED Part CDATA #REQUIRED >

Таблица 2. DTD-составляющая реляционной модели

Заключение

Приведенная в статье система правил позволяет произвольно менять структуру XML-документа в соответствии с потребностями обмена информацией, удобством использования, чтения и заполнения соответствующих XML-документов, организационными особенностями на текущем этапе – с одной стороны, и менять структуру базы данных в соответствии с потребностями оптимизации быстродействия, структурированности программного кода и другими техническими аспектами – с другой. Оба типа изменений, если они согласуются с правилами преобразования, не требуют изменения программного кода погрузки. Таким образом, разработанная система обмена и хранения учебно-методических материалов поддерживает гибкое изменение как структуры базы данных, так и XML-документов.

НАШИ АВТОРЫ

Алексеев Сергей Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Андреев Лев Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики

Аржаник Алена Викторовна – аспирантка кафедры компьютерных образовательных технологий

Багдасарова Ольга Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Бахолдин Алексей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Беднова Мария Валериевна, аспирантка кафедры оптико-электронных приборов и систем

Беликов Андрей Вячеславович – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Белобородов Андрей Витальевич – аспирант кафедры экологического приборостроения и мониторинга

Беспалов Виктор Георгиевич – доктор физ.-мат. наук, зам. декана факультета фотоники и оптоинформатики

Бобцова Светлана Владимировна – аспирантка кафедры технологии приборостроения

Борисов Павел Александрович - аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Борисова Оксана Владимировна – аспирант

Бородина Елена Владимировна – студент кафедры материаловедения

Бурбаев Амир Маруанович – доцент кафедры компъютеризации и проектирования оптических приборов

Валетов Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения

Веселовский Андрей Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Воллосович Сергей Александрович – аспирант кафедры компьютерных образовательных технологий

Вяргизов Александр Викторович – инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Ган Михаил Абрамович – доктор технических наук, начальник отдела ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Ган Яков Михайлович – младший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Георгиади Валерий Вазгенович – кандидат военных наук, зам. директора по НР АНО ЦНИ ОКИ ЦПИ

Гнатюк Пётр Анастасьевич – научный сотрудник кафедры электроники

Гнездилова Светлана Александровна – аспирантка кафедры технологии приборостроения

Гой Елена Геннадьевна – начальник отдела по обеспечению учебного процесса ЦДО

Голубок Александр Олегович – доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой материаловедения

Грамматин Александр Пантелеймонович – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики

Гримм Вячеслав Антонович – старший научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Губанова Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры оптических технологий

Двоеглазов Сергей Владимирович – студент кафедры материаловедения

Демидова Елена Александровна – аспирантка кафедры прикладной и компьютерной оптики

Демин Роман Евгеньевич – аспирант кафедры оптико-электронных приборов и систем

Дмитренко Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры оптических технологий

Дмитриев Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники

Дюбарев Алексей Анатольевич – студент кафедры материаловедения

Евстрапов Анатолий Алексеевич. – зав. лабораторией ИАнП РАН

Еськова Лариса Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Ефимов Юрий Николаевич – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Захарова Ольга Петровна – аспирант кафедры экологического приборостроения и мониторинга

Зверев Виктор Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной и компьютерной оптики

Иванов Сергей Евгеньевич – кандидат физ.-мат. наук, ассистент кафедры теоретической физики и механики

Ильенков Роман Валерьевич – аспирант кафедры технологии приборостроения

Ишанин Геннадий Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры оптико-электронных приборов и систем

Казакевич (Ерофеева) Мария Сергеевна – аспирант кафедры твердотельной оптоэлектроники

Калиниченко Юрий Николаевич – инженер ФГУП «Российский институт радионавигации и времени»

Каракулев Юрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютеризации и проектирования оптических приборов

Карасев Вячеслав Борисович – кандидат технических наук, профессор, проректор по научной работе СПбГУ ИТМО

Карасёв Никита Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры оптических технологий

Карасева Ирина Аркадьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УНЦ «Техническая оптика»

Карпов Вячеслав Григорьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Карпова Галина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Керпелева Светлана Юрьевна – аспирант кафедры материаловедения

Керро Наталия Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения

Кирьянова Вера Васильевна – доктор медицинских наук, профессор кафедры физиотерапии МАПО

Китаев Юрий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники

Кишкурно Виктор Станиславович – аспирант кафедры технологии приборостроения

Козлов Вячеслав Владимирович – начальник отдела ГУП НКТБ «Кристалл», преподаватель кафедры экологического приборостроения и мониторинга

Козлов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Конопелько Леонид Алексеевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой экологического приборостроения и мониторинга

Копилевич Юрий Исаакович – доцент кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения

Коробейникова Людмила Петровна – старший научный сотрудник СПбГУ

Коротаев Валерий Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры оптико-электронных приборов и систем

Котов Виктор Васильевич – начальник отдела ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Котов Игорь Ростиславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник СПбГМУ акад. И.П. Павлова

Краснящих Андрей Владимирович – аспирант кафедры оптико-электронных приборов и систем

Кротенко Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Куликов Дмитрий Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения

Кустиков Юрий Анатольевич – доцент кафедры экологического приборостроения и мониторинга, заместитель руководителя НИО госэталонов в области физико-химических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» тел. 315-11-45

Лаптева Надежда Александровна – аспирантка СПб ГУ ИТМО

Ларионов Сергей Анатольевич – научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Лизоркина Екатерина Александровна – студент кафедры материаловедения

Лосев Константин Дмитриевич – ведущий инженер кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Лукашвили Вахтанг Арчилович – генеральный директор – главный конструктор АНО ЦНИ ОКИ ЦПИ

Лукина Вера Александровна – студент кафедры материаловедения

Лукичёв Дмитрий Вячеславович – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Лукьянов Геннадий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерной теплофизики и экологического мониторинга

Лямин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных образовательных технологий, директор центра дистанционного обучения

Майоров Евгений Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Майорова Ольга Валериевна – аспирант кафедры твердотельной оптоэлектроники

Макаров Сергей Леонидович – заведующий лабораторией кафедры компьютерной теплофизики и экологического мониторинга

Максакова Ирина Борисовна – руководитель сектора аналитического контроля объектов окружающей среды ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», ассистент кафедры экологического приборостроения и мониторинга

Мельников Виталий Геннадиевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой теоретической физики и механики

Мельников Геннадий Иванович – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической физики и механики

Милоглядов Эдуард Викторович – кандидат физ.-мат. наук, научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Митрофанов Андрей Сергеевич – кандидат технических наук, профессор кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Москалева Анна Юрьевна – аспирант кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Мусяков Владимир Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры оптико-электронных приборов и систем

Нагибин Юрий Тихонович – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной оптоэлектроники

Найденов Анатолий Сергеевич. – начальник сектора госэталонов и научных исследований в области оптических и цветовых измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Нечипоренко Василий Владимирович – генеральный директор – главный конструктор АНО ЦНИ ОКИ ЦПИ

Никитина Мария Владимировна – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Николаева Ольга Юрьевна – инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Никольская Елена Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры экологического приборостроения и мониторинга

Никольская Татьяна Сергеевна – доцент кафедры материаловедения

Новиков Александр Александрович – бакалавр кафедры твердотельной оптоэлектроники

Осипов Дмитрий Владимирович – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Панков Эрнст Дмитриевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой оптико-электронных приборов и систем

Пасяда Александр Васильевич – аспирант кафедры твердотельной оптоэлектроники

Погумирский Максим Викторович – ассистент кафедры оптических технологий

Попов Глеб Борисович – аспирант ГУАП.

Попов Игорь Юрьевич – доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой высшей математики

Приходько Константин Владимирович – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Прокопенко Виктор Трофимович – доктор технических наук, заведующий кафедрой твердотельной оптоэлектроники

Прокофьев Александр Валерьевич – аспирант кафедры оптико-электронных приборов и систем

Путилин Эдуард Степанович – доктор технических наук, заведующий кафедрой оптических технологий

Романова Галина Эдуардовна – аспирант кафедры прикладной и компьютерной оптики

Свердлина Ирина Ильинична – кафедры технологии приборостроения

Скалецкий Евгений Кириллович – заведующий лабораторией МВК ИФФ

Скрипник Алексей Владимирович – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Смирнов Александр Павлович – доцент кафедры компъютеризации и проектирования оптических приборов

Смирнов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Степанова Юлия Александровна – студентка кафедры прикладной и компьютерной оптики

Стороженко Алексей Иванович – студент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Сурков Алексей Георгиевич – аспирант кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения

Суров Александр Анатольевич – студент 6 курса кафедры твердотельной оптоэлектроники.

Тарлыков Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Терещенко Александр Валерьевич – студент кафедры технологии приборостроения

Тимофеев Александр Николаевич – кандидат технических наук, заведующий НПЛ кафедры оптико-электронных приборов и систем

Тогатов Вячеслав Вячеславович – доктор технических наук, заведующий кафедрой электроники

Толмачев Валерий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Толстоба Надежда Дмитриевна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Томасов Валентин Сергеевич - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и прецизионных электромеханических систем

Трофимов Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры твердотельной олптоэлектроники

Туренко Артем Анатольевич – инженер кафедры экологического приборостроения и монитроинга

Усольцев Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем

Фейгельс Виктор Иосифович – консультант фирмы EG&G Technical Service Inc., NASA Wallops Flight Facility, Wallops Island, VA 23337

Фефилов Георгий Дмитриевич – научный сотрудник кафедры квантовой электроники и биомедицинской оптики

Фролов Сергей Валентинович – ассистент кафедры высшей математики

Хопов Владимир Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Храмцовский Игорь Анатольевич. – кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры твердотельной оптоэлектроники

Хрулёв Константин Сергеевич – ассистент кафедры высшей математики

Цуканова Галина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной и компьютерной оптики

Чежин Михаил Сергеевич – кандидат технических наук, начальник отдела организационно-методического обеспечения ЦДО

Челибанов Владимир Петрович – кандидат химических наук, доцент кафедры экологического приборостроения и монитроинга

Черкасова Дина Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Чернова Анжела Анатольевна – студентка кафедры прикладной и компьютерной оптики

Чертков Александр Сергеевич – младший научный сотрудник ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Чиванов Алексей Николаевич – начальник отдела ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова».

Чуркина Анастасия Константиновна - студентка кафедры материаловедения

Юсупов Петр Дмитриевич – аспирант кафедры технологии приборостроения

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. МАТЕМАТИКА 5

Попов И.Ю., Фролов С.В., Хрулёв К.С. Численный анализ распространения волн в системе связанных волноводов 5

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И МЕХАНИКА 11

Мельников Г.И., Иванов С.Е. Исследование нелинейных колебаний голономных систем с тремя степенями свободы на вибрирующем основании 11

Мельников В.Г. Применение метода экономизации К. Ланцоша при исследовании нелинейных колебаний механических систем 16

3. КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И БИОМЕДИЦИНСКАЯ ОПТИКА 19

Беликов А.В. Динамика твердых макрочастиц, ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера 19

Беликов А.В., Скрипник А.В. Термостимулированная диффузия пищевых кислот в гидроксилапатите 23

Беликов А.В. Разрушение композитных материалов под действием частиц, ускоренных в поле субмиллисекундного импульса Er:YAG лазера 27

Москалева А.Ю., Тарлыков В.А. Модель фотоиндуцированного термогемолиза эритроцитов 30

Беликов А.В., Приходько К.В., Лукьянов Г.Н., Макаров С.Л. Перестраиваемая галогеновая установка высокой спектральной яркости для косметологии 36

Беспалов В.Г., Ефимов Ю.Н., Милоглядов Э.В. Генерация субпикосекундного терагерцового излучения в скрещенных электрическом и магнитных полях 41

Веселовский А.Б., Кирьянова В.В., Митрофанов А.С., Фефилов Г.Д. Метод измерения энергетических параметров излучателей, применяемых в фотохромотерапии 45

Карасев В.Б., Гримм В.А., Котов В.В., Лосев К.Д., Смирнов С.А. Интерферометрический комплекс для контроля аберраций оптических систем в ИК-диапазоне 49

4. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ 60

Майорова О.В., Скалецкий Е.К. Анализ методологических подходов к описанию поляризационно-оптических параметров полупроводниковых и диэлектрических материалов 60

Трофимов В.А. Математическое моделирование оптической анизотропии роговицы глаза 68

Котов И.Р., Майоров Е.Е., Хопов В.В. Интерферометрические исследования биологических объектов 70

Новиков А.А., Прокопенко В. Т., Храмцовский И.А. Оптические свойства шероховатой поверхности элементов оптоэлектроники 73

Нагибин Ю.Т., Суров А.А. Атомно-флуоресцентный анализатор тяжелых металлов в природных водах 81

Казакевич М. С, Дмитриев А.Л. Эффект Фарадея в волоконном световоде в ближней ИК-области спектра 84

Алексеев С.А., Пасяда А.В. Распознавание ориентации поверхности по отраженной интенсивности и поляризации излучения 88

5. ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ 96

Смирнов А.П. Компьютерное моделирование и анализ погрешностей позиционирования оптических элементов 96

Бурбаев А.М. Решение задач юстировки подвижных зеркально-призменных систем с помощью математического моделирования 105

Ган М.А., Ларионов С.А., Ган Я.М., Чертков А.С. Использование протокола обмена данными по оптическим системам STEP-NODIF при проектировании и информационном сопровождении жизненного цикла изделий.....110

6. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ 116

Мусяков В.Л., Панков Э.Д., Тимофеев А.Н. Теоретическая оценка воздействия воздушного тракта на измерительную базу в виде полихроматической оптической равносигнальной зоны при геодезических измерениях 116

Калиниченко Ю.Н., Прокофьев А.В., Тимофеев А.Н. О построении системы контроля смещений на основе полихроматической оптической равносигнальной зоны 122

Коротаев В.В., Чиванов А.Н. Современное состояние тепловизионной техники ..127

Чиванов А.Н. Методы повышения технических характеристик тепловизоров 132

Демин Р.Е., Лукин С.Б. Статистический анализ результатов экспериментов по обнаружению общей инфицированности мяса с помощью фотолюминесцентного метода 137

Коротаев В.В., Краснящих А.В., Тимофеев А.Н. Исследование оптико-электронной системы контроля состояния средств освоения ресурсов мирового океана с целью оптимизации объемов информационных потоков и структуры системы 141

7. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ..... 145

Губанова Л.А. Критерий выбора и синтез условий осаждения градиентных систем 145

Дмитренко В.А., Карасёв Н.Н., Путилин Э.С. Исследование влияния параметров процесса осаждения на формирование градиентных покрытий.....150

8. ПРИКЛАДНАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА 158

Зверев В. А., Романова Г.Э. Несферические поверхности и проблемы их аппроксимации 158

Грамматин А.П., Демидова Е.А. Свойства зеркально-линзовых объективов автоколлимационного типа 175

Георгиади В.В., Карасева И.А., Лукашвили В.А., Нечипоренко В.В., Черкасова Д. Н. Комплекс приборов для релаксации, тренировок и контроля зрительного анализатора оператора 179

Грамматин А.П. Расчет компенсатора Шмидта 183

Андреев Л. Н., Лаптева Н.А. Зависимость аберраций третьего порядка апланатических оптических систем от положения входного зрачка 187

Лаптева Н.А. Объективы для оптической записи и считывания информации..... 190

Толстоба Н.Д., Иванилов О.И. Создание параметрических чертежей оправ для крепления круглой оптики 194

Степанова Ю.А., Толстоба Н.Д. Параметрический чертеж зеркала 198

Еськова Л.М., Стороженко А.И. Метод Гартмана с регистрацией гартманограммы и диафрагмы в одном масштабе.....203

Бахолдин А. В., Погумирский М. В. Некоторые особенности измерения на диоптриметре 208

Цуканова Г.И., Багдасарова О.В., Карпова Г.И., Карпов В.Г., Бахолдин А.В. Опыт работы с тестами по дисциплине «Прикладная оптика» в системе дистанционного обучения 214

Толстоба Н.Д., Чернова А.А. Разработка справочной среды по элементам оптического прибора для конструктора оптико-механических приборов 219

9. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И МОНИТОРИНГ 224

Белобородов А.В. Компьютерные технологии в экологическом мониторинге.....224

Белобородов А.В. Программное обеспечение для спектрального анализа газовых компонентов в УФ области спектра 227

Кустиков Ю.А., Попов Г.Б. Контроль респирабельной фракции атмосферного аэрозоля при экологическом мониторинге 231

Никольская Е.Ю. Портативные электрохимические сенсоры для газового анализа современное состояние вопроса в Европе и Америке.....237

Захарова О.П., Конопелько Л. А. Применение метода пламенной фотометрии для анализа аэродисперсных сред на основе аэрозоля хлорида натрия 242

Козлов В.В. Возможности люминесцентно-кинетического метода для определения кислорода в газовых средах 244

Беднова М.В., Ишанин Г.Г. Аттестация эталонных газовых смесей при помощи лазерного интерференционного рефрактометра.....246

Беднова М.В., Вяргизов А.В. Разработка алгоритма автоматизированного процесса аттестации эталонных газовых смесей с применением газоанализатора «ЛАЗИР 2МК» 248

Козлов Д.Н., Борисова О.В. Разработка и исследование стандартных образцов гранулометрического состава микропорошков.....251

Максакова И.Б. Разработка и аттестация стандартных образцов почв на основе техногенно-загрязненных почв и грунтов 255

Найденов А.С., Николаева О.Ю. Сравнение точности измерений показателя преломления гониометрическим и интерференционным методом.....258

Туренко А.А., Челибанов В.П.. Спектральные исследования процесса окисления галловой кислоты 262

Копилевич Ю.И., Сурков А.Г., Фейгельс В.И. Дистанционное измерение экологически значимых характеристик прибрежных вод с помощью авиационных лидарных систем.....267

Керро Н.И. Методологические особенности разработки и использования электронного обучающего комплекса по дисциплине «Экология» для системы дистанционного обучения Университета 273

10. ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ..... 277

Голубок А.О., Керпелева С.Ю. Нанотестер для диагностики и модификации микро– и наноструктур: создание и исследование методики, изготовление и испытание макетного образца.....277

Двоеглазов С.В., Коробейникова Л.П. Рентгеноспектральное исследование углеродистых конструкционных сталей с помощью спектрометра MagiX и электронного микроскопа XL30TMP.....280

Лукина В.А., Коробейникова Л.П. Исследование алюминиевых сплавов рентгеноспектральным флуоресцентным методом 283

Никольская Т.С. Акустико-эмиссионный контроль 286

Дюбарев А.А., Чуркина А.К., Голубок А.О. Исследование локальной экзоэлектронной эмиссии – автоматизация управления экспериментом, сбора и обработки данных, а также сбор и генерация экзоэлектронов.....290

Бородина Е.В., Евстрапов А.А., Лизоркина Е.А. Исследование оптических свойств и структуры материалов микрофлюидных чипов.....297

11. ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ 302

Валетов В.А., Терещенко А.В. Использование среды MATLAB для анализа микрогеометрии поверхностей деталей приборов.....302

Валетов В.А., Бобцова С.В. Изготовление пресс–форм с помощью RP – технологий 306

Кишкурно В.С. Интеграция CAD CAPP систем и отработка на технологичность 309

Гнездилова С.А. К вопросу применения экспертных систем в технологическом проектировании 314

Свердлина И.И. Метод управления качеством изделия 318

Юсупов П.Д., Куликов Д.Д. Создание баз данных технологического назначения.....323

12. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ 330

Толмачев В.А., Кротенко В.В., Никитина М.В. Синтез цифровой системы управления источником тока с многофазным импульсным усилительно-преобразовательным устройством.....330

Томасов В.С., Борисов П.А. Методика выбора наиболее эффективного способа использования энергии рекуперации в системах электропривода на базе ШИП-ДПТ в зависимости от режима работы 335

Усольцев А.А., Лукичев Д.В. Статические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при питании от источника тока и источника напряжения 340

Толмачев В.А., Осипов Д.В. К анализу особых режимов работы системы управления многомодульного импульсного источника тока с индуктивным фильтром.....345

13. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА 353

Тогатов В.В., Гнатюк П.А. Метод измерения времени жизни носителей заряда в базовых областях быстродействующих диодных структур 353

Тогатов В.В., Гнатюк П.А. Прибор для регистрации переходных характеристик диодных структур 358

Тогатов В.В., Гнатюк П.А. Операционный усилитель с высоковольтным выходом до 2000 В для классификации диодных структур 365

Китаев Ю.В. Применение JAVA апплетов в дистанционных лабораторных работах 367

14. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ 371

Каракулев Ю.А., Карпов В.Г. Анализ результатов вступительных испытаний при различных формах приема в вузы 371

15. НОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 376

Лямин А.В., Чежин М.С. Типовая структура системы дистанционного обучения 376

Гой Е.Г., Лямин А.В. Организация учебного процесса в среде системы дистанционного обучения университета 382

Аржаник А.В., Воллосович С.В., Лямин А.В. Гомологические модели электронных учебно-методических материалов 386

НАШИ АВТОРЫ 394

Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 15. Теория и практика современных технологий / Главный редактор д.т.н., проф. В.Н. Васильев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 404 с.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО
Выпуск 15

Теория и практика современных технологий

Главный редактор
доктор технических наук, профессор
В.Н. Васильев
Дизайн обложки Я.А Иванов
Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.
Подписано в печать 20.12.04.
Заказ 804. Тираж 100 экз.