

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ,
ПОЛОЖЕННЫХ В ОСНОВУ ТЕХНОЛОГИИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ
ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ**

В статье рассматриваются результаты экспериментальной проверки предложенного метода распознавания и восстановления интерференционного сигнала отраженного от функциональной поверхности подложки, выполненной моделированием на ПЭВМ.

Для этого метрологической лабораторией были изготовлены тестовые подложки из сапфира. Далее последовательность действий была следующей.

С помощью ПЗС-датчика были получены:

- 1) матрица амплитуд яркости и интерференционные полосы, полученные с поверхности подложки с тестовой царапиной;
- 2) матрица амплитуд яркости и интерференционные полосы, с поверхности удовлетворительно обработанной подложки;
- 3) матричное представление амплитуд яркости эталонной поверхности подложки (рис. 1).

$$F_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 55 & 56 & 57 & 55 & 55 & 53 & 55 & 57 & 57 & 56 & 55 \\ 57 & 58 & 60 & 67 & 58 & 54 & 56 & 59 & 61 & 59 & 58 \\ 59 & 62 & 63 & 61 & 62 & 58 & 58 & 61 & 63 & 62 & 60 \\ 62 & 63 & 62 & 63 & 63 & 60 & 61 & 63 & 62 & 63 & 62 \\ 63 & 62 & 61 & 62 & 63 & 60 & 63 & 63 & 61 & 63 & 63 \\ 61 & 59 & 61 & 60 & 63 & 63 & 63 & 61 & 59 & 61 & 60 \\ 58 & 59 & 58 & 59 & 62 & 63 & 62 & 58 & 57 & 58 & 58 \\ 61 & 60 & 60 & 59 & 61 & 62 & 60 & 59 & 58 & 59 & 58 \\ 62 & 62 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 \\ 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 \end{pmatrix} F_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 60 & 57 & 58 & 57 & 58 & 59 & 58 & 60 & 60 & 59 & 59 \\ 62 & 59 & 60 & 58 & 59 & 59 & 60 & 62 & 62 & 61 & 61 \\ 63 & 62 & 61 & 61 & 62 & 62 & 61 & 61 & 62 & 61 & 62 \\ 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 \\ 62 & 61 & 62 & 61 & 61 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 62 \\ 60 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 60 & 61 & 60 \\ 59 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 59 \\ 62 & 61 & 61 & 61 & 62 & 62 & 61 & 62 & 61 & 61 & 62 \\ 60 & 60 & 59 & 60 & 60 & 59 & 60 & 60 & 61 & 60 & 61 \\ 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 \end{pmatrix} A = \begin{pmatrix} 57 & 57 & 58 & 57 & 58 & 59 & 57 & 58 & 57 & 58 & 58 \\ 59 & 58 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 58 & 60 & 59 \\ 61 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 61 \\ 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 \\ 62 & 61 & 62 & 61 & 62 & 62 & 61 & 61 & 61 & 62 & 61 \\ 60 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 \\ 59 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 60 & 59 & 58 \\ 60 & 60 & 61 & 61 & 61 & 60 & 61 & 60 & 61 & 60 & 61 \\ 62 & 61 & 61 & 62 & 61 & 62 & 62 & 61 & 62 & 62 & 62 \\ 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 & 63 \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Матричное представление амплитуд яркости поверхности подложки:

a – матрица амплитуд яркости поверхности подложки с тестовой царапиной и интерференционными полосами; b – матрица амплитуд яркости удовлетворительно обработанной поверхности подложки с интерференционными полосами; v – матричное представление амплитуд яркости эталонной поверхности подложки с интерференционными полосами

Далее производилось вычитание:

$$G_1^{(1)} = F_1^{(1)} - A, \quad (1)$$

где $G_1^{(1)}$ – результирующая матрица; $F_1^{(1)}$ – матрица амплитуд яркости поверхности подложки с тестовой царапиной и интерференционными полосами; A – матричное представление амплитуд яркости эталонной поверхности подложки с интерференционными полосами:

$$G_2^{(2)} = F_2^{(2)} - A, \quad (2)$$

где $G_2^{(2)}$ – результирующая матрица; $F_2^{(2)}$ – матрица амплитуд яркости удовлетворительно обработанной поверхности подложки с интерференционными полосами; A – матричное представление амплитуд яркости эталонной поверхности подложки с интерференционными полосами.

После этих действий были получены результирующие матрицы $G_1^{(1)}$, $G_2^{(2)}$, представленные на рис. 2.

$\begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 2 & 3 & 6 & 2 & 1 & 0 & 2 & 3 \\ 2 & 0 & 2 & 3 & 1 & 6 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 1 & 4 & 3 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 0 & 4 & 3 & 4 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 1 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 2 & 3 & 6 & 2 & 1 & 0 & 2 & 3 \\ 2 & 0 & 2 & 3 & 1 & 6 & 3 & 1 & 3 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 2 & 1 & 4 & 3 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 3 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 & 0 & 4 & 3 & 4 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 1 & 3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
a	b

Рис. 2. Результирующие матрицы: a – разница между тестовой царапиной и эталонной, b – разница между удовлетворительной и тестовой

Далее была произведена фильтрация, т.е. подбирались специальные матрицы. В результате чего были получены матрицы $D_1^{(1)}$ и $D_2^{(2)}$, представленные на рис. 3.

$D_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$D_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
a	b

Рис. 3. Тестируемые матрицы: a – с тестовой царапиной, b – удовлетворительно обработанная

Далее с помощью метода порогового разделения проводилась идентификация интерференционной полосы матрицы $D_1^{(1)}$:

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}{N-1}} \quad (3)$$

Далее восстанавливался идентифицированный сигнал с помощью сплайн-функций.

В ходе эксперимента исследовалась идентификация интерференционной полосы.

С помощью системы автоматизированного контроля была получена оцифрованная амплитуда яркостей контролируемой поверхности подложки. На рис. 4 приведено изображение подложки, полученное с помощью ПЗС-датчика.

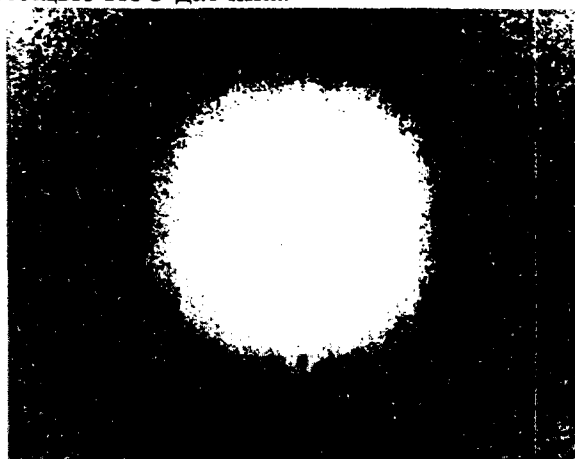


Рис. 4. Изображение подложки, полученное с помощью ПЗС-матрицы

В табл. 1 приведен фрагмент амплитуд яркости оцифрованного изображения, представленного на рис. 4. На рис. 5 приведен график идентифицированного диаметра поверхности. Идентификация проводилась на основе метода порогового разделения.

Таблица 1

X	A	X	A	X	A	X	A	X	A
X1	109	X12	88	X23	213	X34	217	X45	93
X2	117	X13	127	X24	209	X35	212	X46	101
X3	109	X14	145	X25	191	X36	206	X47	90
X4	109	X15	169	X26	156	X37	190	X48	96
X5	98	X16	187	X27	171	X38	181	X49	98
X6	109	X17	198	X28	200	X39	145	X50	85
X7	106	X18	196	X29	208	X40	95		
X8	101	X19	201	X30	216	X41	113		
X9	83	X20	210	X31	216	X42	93		
X10	85	X21	216	X32	221	X43	94		
X11	98	X22	216	X33	218	X44	85		

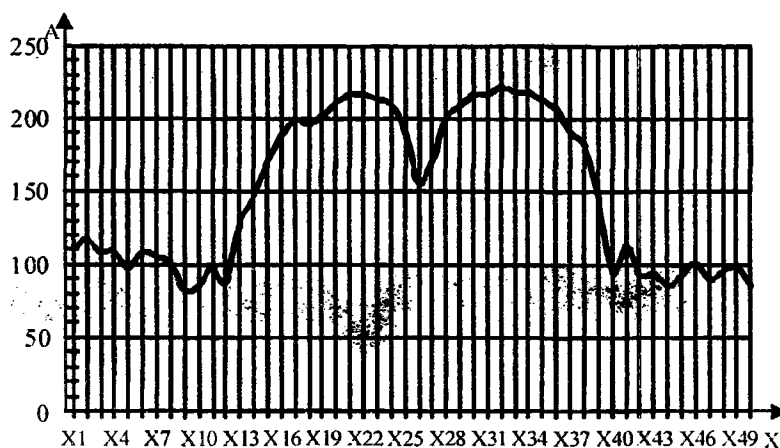


Рис. 5. График идентифицированного диаметра поверхности, представленной на рис. 4

Ниже приводится текст функции на языке C#, реализующей алгоритм метода порогового разделения:

```
static void Halton(byte n, int i)
{
    Console.WriteLine("Введите максимальную размерность точек [10]: ");
    int nmax = Convert.ToInt32(Console.ReadLine());
    double[] fi = new double[nmax];
    byte[] R = new byte [] {2,3,5,7,11,13,17,19,23,29};
    double x, y;
    if (i == 1)
    {
        for (int k = 1; k < n; k++)
        {
            fi[k] = 0;
        }
    }
    else
    {
        for (int k = 1; k < n; k++)
```

```

{
  x = 1 - fi[k];
  y = 1 / R[k];
  while (x <= y)
  {
    y = y / R[k];
  }
  fi[k] = fi[k] + (R[k] + 1) * y - 1;
}
}
}

```

Далее с помощью системы автоматизированного контроля была получена оцифрованная амплитуда яркостей поверхности подложки с тестовой царапиной. Изображение тестовой царапины с интерференционными полосами представлено на рис. 6.



Рис. 6. Изображение тестовой царапины с интерференционными полосами

В табл. 2 приведен фрагмент амплитуд яркости оцифрованного изображения, представленного на рис. 6. На рис. 7 приведен график идентифицированного изображения интерференционной полосы. Идентификация проводилась на основе метода порогового разделения.

Таблица 2

X	A	X	A	X	A	X	A	X	A
X1	109	X12	88	X23	213	X34	217	X45	93
X2	117	X13	127	X24	209	X35	212	X46	101
X3	109	X14	145	X25	191	X36	206	X47	90
X4	109	X15	169	X26	156	X37	190	X48	96
X5	98	X16	187	X27	171	X38	181	X49	98
X6	109	X17	198	X28	200	X39	145	X50	85
X7	106	X18	196	X29	208	X40	95		
X8	101	X19	201	X30	216	X41	113		
X9	83	X20	210	X31	216	X42	93		
X10	85	X21	216	X32	221	X43	94		
X11	98	X22	216	X33	218	X44	85		

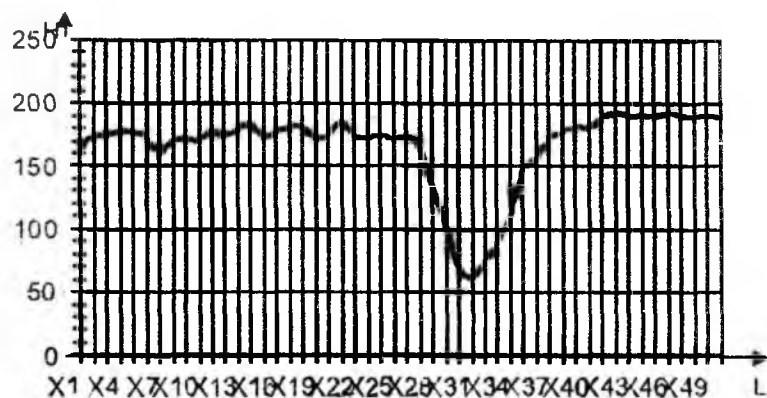


Рис. 7. График идентифицированного изображения интерференционной полосы, представленной на рис. 6

Затем с помощью системы автоматизированного контроля была получена оцифрованная амплитуда яркостей качественно обработанной поверхности подложки. Изображение качественно обработанной поверхности подложки с интерференционными полосами представлено на рис. 8.

В табл. 3 приведен фрагмент амплитуд яркости оцифрованного изображения, представленного на рис. 8. На рис. 9 приведен график идентифицированного изображения интерференционной полосы. Идентификация проводилась на основе метода порогового разделения.



Рис. 8. Изображение качественно обработанной поверхности подложки с интерференционными полосами

Таблица 3

X1	A	X12	A	X23	A	X34	A	X45	A
X2	109	X13	88	X24	213	X35	217	X46	93
X3	117	X14	127	X25	209	X36	212	X47	101
X4	109	X15	145	X26	191	X37	206	X48	90
X5	109	X16	169	X27	156	X38	190	X49	96
X6	98	X17	187	X28	171	X39	181	X50	98
X7	109	X18	198	X29	200	X40	145		85
X8	106	X19	196	X30	208	X41	95		
X9	101	X20	201	X31	216	X42	113		
X10	83	X21	210	X32	216	X43	93		
X11	85	X22	216	X33	221	X44	94		
	98		216		218		85		

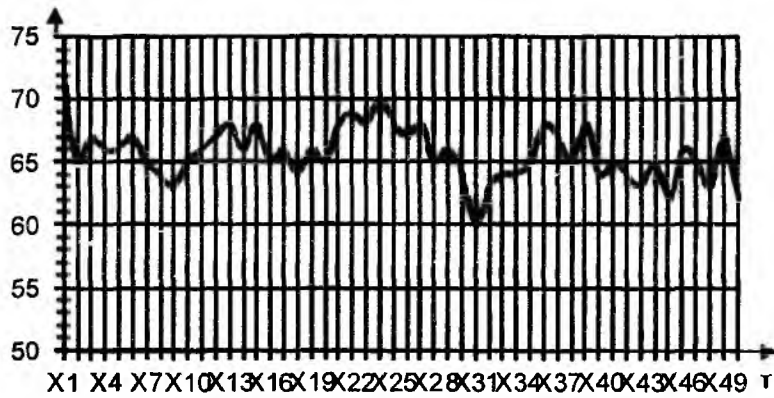


Рис. 9. График изображения интерференционной полосы, представленной на рис. 8

Как показали исследования, метод порогового разделения для идентификации интерференционной полосы полностью себя оправдал.

После проверки метода порогового разделения, который показал очень высокие результаты, производилась проверка предложенной методики на основе сплайн функций. Наиболее употребительными в технике являются сплайны – многочлены третьей степени, поскольку они обладают важным свойством, которое обуславливает высокую эффективность сплайн-интерполяции, а именно кусочно-кубическая функция $u(x)$ является функцией класса $W_2^2[a, b]$, которая принимает в узлах сетки заданное значение и минимизирует функционал [1]:

$$\Phi(u) = \int_a^b [u''(x)]^2 dx. \quad (4)$$

Сглаживание интерференционной полосы проводилось с одномерным массивом. Значения амплитуд представлены в табл. 4.

Таблица 4

X	A	X	A	X	A	X	A	X	A
X1	109	X12	88	X23	213	X34	217	X45	93
X2	117	X13	127	X24	209	X35	212	X46	101
X3	109	X14	145	X25	191	X36	206	X47	90
X4	109	X15	169	X26	156	X37	190	X48	96
X5	98	X16	187	X27	171	X38	181	X49	98
X6	109	X17	198	X28	200	X39	145	X50	85
X7	106	X18	196	X29	208	X40	95		
X8	101	X19	201	X30	216	X41	113		
X9	83	X20	210	X31	216	X42	93		
X10	85	X21	216	X32	221	X43	94		
X11	98	X22	216	X33	218	X44	85		

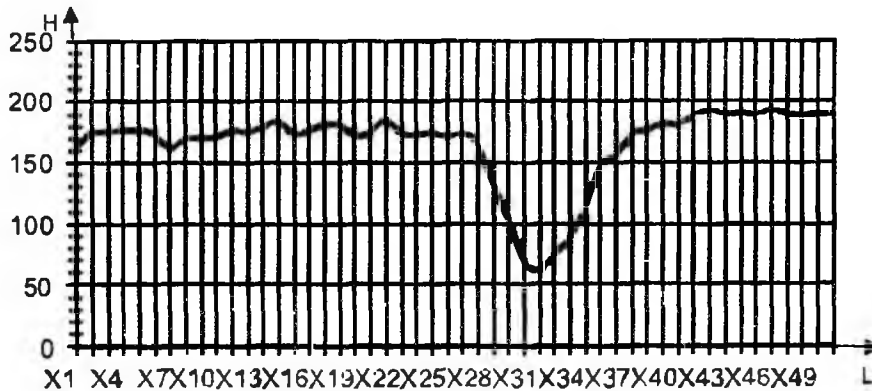


Рис. 10. График восстановленного изображения интерференционной полосы

Текст функции на языке C#, реализующей алгоритм восстановления интерференционной полосы:

```
static void LPTau (byte n, int i)
{
    Console.WriteLine("Введите максимальную размерность точек [10]: ");
    int nmax = Convert.ToInt32(Console.ReadLine());
    double[] fi = new double[nmax];
    int [,] NR = new int[,] { {1,1,1,1,1,1,1,1,1},
        {1,3,5,15,17,51,85,255,257,771},
        {1,1,7,11,13,61,67,79,465,721},
        {1,3,7,5,7,43,49,147,439,1013},
        {1,1,5,3,15,51,125,141,177,759}};

    int J, K, L, M, NS;
    double S;
    if (i == 0)
    {
        for (J = 1; J < n; J++)
        {
            fi[J] = 0;
        }
    }
    else
    {
        M = 1 + (int)(Math.Log10(i) / 0.693147181);
        for (J = 1; J < n; J++)
        {
            S = 0;
            for (K = 1; K < M; K++) ;
            NS = 0;
            for (L = K; L < M; L++)
            {
                double a = (i / Math.Pow(2,L));
                double b = NR[J, L] / Math.Pow(2, L + 1 - K);
                NS = NS + (int)(2*(a - Math.Floor(a)) * (int)(b - Math.Floor(b)));
                S = S + ((0.5*NS) - Math.Floor(0.5*NS)) / Math.Pow(2, K-1);
            }
            //T[J] = S;
        }
    }
}
```

Были проверены методы распознавания и фильтрации изображения на основе предложенных методов, а именно:

- порогового разделения;
- сплайн функций.

Метод сплайн-функций характеризуется высокой точностью вычислений, поскольку он работает с матрицами чисел, что в максимальной степени обеспечит решение поставленной задачи вместе с выбранным методом бесконтактного контроля. По результатам исследований оба метода показали высокую точность и полностью себя оправдали.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о высокой точности, достигнутой при использовании разработанной методики автоматизированного контроля.

Список литературы: 1. *ГОСТ 18353-79* “Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов”. 2. *Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н.* Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с. 3. *Корташев В.Г.* Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1982. – 109 с. 4. *Пискунов Н.С.* Дифференциальное и интегральное исчисления для ВТУЗов. – 4е изд. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 255 с. 5. *Хофер Э., Лундерштендт Р.* Численные методы оптимизации. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 273с. 6. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И.* Вычислительные методы высшей математики. Том 1 // Под ред. Мысовских И.П. – Мн.: Вышэйш. шк., 1972. – 584 с. 7. *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики: Учеб. пособие. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 698 с. 8. *Хемминг Р.В.* Численные методы: Пер. с англ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 278с. 9. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельников Г.М.* Численные методы. – М.: Наука, 2000. – 456с. 10. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И.* Вычислительные методы. – М.: Наука, 1999. – 367с. 11. *Тычинский В.П., Мазалов И.Н., Панков В.Л., Убменский Д.В.* Оперативный неразрушающий контроль элементов ИС на лазерном измерительном комплексе // Электронная промышленность. – 1989. – №5. – С.18. 12. *Быстров Ю.А., Колгин Е.А. и др.* Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. – М.: Радио и связь, 1988. – 167с. 13. *Гельман М.М.* Аналогово-цифровые преобразователи для информационно-измерительных систем. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 320с. 14. *Тычинский В.П., Захаров В.П., Снежко Ю.А.* Измерение дробной доли интерференционной полосы методом временных интервалов // Измерительная техника. – 1977. – №12. – С.39-42. 15. *Тычинский В.П., Мазалов И.Н.* Измерительный комплекс для объективного контроля микрорельефа полупроводниковых структур // Электронная промышленность. – 1987. – №5. – С.54-55. 16. *Тычинский В.П., Мазалов И.Н.* Измерительный комплекс для прецизионного контроля микрогеометрии поверхности. – Эрнст-Аббе-Конференц, ГДР, Йена, тезисы. 1987. – С.44. 17. *Bhusham B., Wyant J.C.* Measurement of surface topography of magnetic tapes by microinterferometry // Applied Optics. – 1985. – Vol.24, №10. –P.1489-1492. 18. *Sasaki O, Okazaki H.* Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurements // Applied Optics. – 1986. – Vol 25, №18. –P.3137-3142. 19. *Laeri F., Straund N.S.* Angstrom resolution optical profilometry for microscopic object// Applied Optics. – 1987. – Vol.26, №11. – P.2247-2249. 20. *Carlsson K., Aslund N.* Confocal imaging for 3-D digital microscopy // Applied Optics. – 1987. – Vol.26, №16. – P.3232-3236.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 25.01.2011