

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ  
И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра прикладной математики

Направление подготовки: 01.03.04 – Прикладная математика

### **ОТЧЁТ**

По дисциплине «Численные методы»  
на тему:

«Вычисление интеграла с помощью квадратурных формул»

**Выполнил:**

Романов И.И. 09-222 группа.

**Руководитель:**

Глазырина О.В.

## Содержание

1	Постановка задачи	3
2	Ход работы	4
3	Выводы	6
4	Листинг программы	6

# 1 Постановка задачи

Необходимо изучить и сравнить различные способы приближённого вычисления функции ошибок

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (1)$$

1. Протабулировать  $\operatorname{erf}(x)$  на отрезке  $[a, b]$  с шагом  $h$  и точностью  $\varepsilon$ , основываясь на ряде Тейлора, предварительно вычислив его

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{n!(2n+1)} \quad (2)$$

где  $a = 0$ ,  $b = 2$ ,  $h = 0.2$ ,  $\varepsilon = 10^{-6}$ . Получив таким образом таблицу из 11 точек

$x_0 \ x_1 \ x_2 \ \dots$   
 $f_0 \ f_1 \ f_2 \ \dots$

$$f_i = \operatorname{erf}(x_i), \quad x_i = a + i \cdot h, \quad i = 0, \dots, n.$$

2. Вычислить  $\operatorname{erf}(x)$  при помощи пяти составных квадратурных формул:

2.1. Формула Левых прямоугольников:

$$J_N(x) = \sum_{i=1}^n h \cdot g(x_i), \quad h = (x_{i+1} - x_i) \quad (3)$$

2.2. Формула Центральных прямоугольников:

$$J_N(x) = \sum_{i=1}^n h \cdot g\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right) \quad (4)$$

2.3. Формула трапеции:

$$J_N(x) = \sum_{i=1}^n h \cdot \frac{g(x_i) + g(x_{i+1})}{2} \quad (5)$$

2.4. Формула Симпсона:

$$J_N(x) = \sum_{i=1}^n \frac{h}{6} \cdot \left[ g(x_i) + 4g\left(\frac{x_i + x_{i+1}}{2}\right) + g(x_{i+1}) \right] \quad (6)$$

2.5. Формула Гаусса:

$$J_N(x) = \sum_{i=1}^n \frac{h}{2} \cdot \left[ g\left(x_i + \frac{h}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right) + g\left(x_i + \frac{h}{2} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right) \right] \quad (7)$$

Вычисления проводятся от начала интегрирования до каждой из 11 точек, увеличивая количество разбиений между точками в 2 раза до тех пор, пока погрешность больше  $\varepsilon$ .

## 2 Ход работы

Выберем точки на отрезке  $[a, b]$  с шагом  $h$ .

$$x_i = a + i \cdot h.$$

Для каждой точки  $x_i$  найдём значение  $f(x_i)$  и составим таблицу результатов (Таблица 1).

$x_i$	$f(x_i)$
0,0	0,0000000000
0,2	0,2227025926
0,4	0,4283923805
0,6	0,6038561463
0,8	0,7421009541
1,0	0,8427006602
1,2	0,9103140831
1,4	0,9522852302
1,6	0,9763484001
1,8	0,9890906215
2,0	0,9953226447

Таблица 1 - точки  $x_i$  и значения разложения в ряд Тейлора  $f(x_i)$

После нахождения значений разложения в ряд Тейлора в точках вычислим значение  $\text{erf}(x)$  при помощи 5 составных квадратурных формул. Для каждой формулы составим свою таблицу. В таблицах будут находиться значения точки, для которой производились расчёты, значение разбиения в ряд Тейлора, значение найденного с помощью формулы интеграла в точке, модуль разницы между значениями найденного интеграла и разбиения, количества разбиений, которые пришлось совершить для нахождения значения интеграла с нужной точностью.

### 1. Правые прямоугольники:

$x_i$	$J_0(x_i)$	$J(x_i)$	$ J_0(x_i) - J_N(x_i) $	$N$
0,0	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2
0,2	0,2227025926	0,2226983160	0,0000042766	1024
0,4	0,4283923805	0,4283596873	0,0000326931	1024
0,6	0,6038561463	0,6037563682	0,0000997782	1024
0,8	0,7421009541	0,7418920994	0,0002088547	1024
1,0	0,8427006602	0,8423525691	0,0003480911	1024
1,2	0,9103140831	0,9098084569	0,0005056262	1024
1,4	0,9522852302	0,9516219497	0,0006632805	1024
1,6	0,9763484001	0,9764841199	0,0001357198	1024
1,8	0,9890906215	0,9891686440	0,0000780225	1024
2,0	0,9953226447	0,9953628182	0,0000401735	1024

Таблица 2 - таблица значений для формулы Правых прямоугольников

2. Центральные прямоугольники:

$x_i$	$J_0(x_i)$	$J(x_i)$	$ J_0(x_i) - J_N(x_i) $	$N$
0,0	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2
0,2	0,2227025926	0,2227027565	0,0000001639	64
0,4	0,4283923805	0,4283923209	0,0000000596	256
0,6	0,6038561463	0,6038563848	0,0000002384	256
0,8	0,7421009541	0,7421010733	0,0000001192	512
1,0	0,8427006602	0,8427013755	0,0000007153	512
1,2	0,9103140831	0,9103139043	0,0000001788	512
1,4	0,9522852302	0,9522854686	0,0000002384	512
1,6	0,9763484001	0,9763489366	0,0000005364	256
1,8	0,9890906215	0,9890908003	0,0000001788	512
2,0	0,9953226447	0,9953227639	0,0000001192	256

Таблица 3 - таблица значений для формулы Центральных прямоугольников

3. Формула Трапеций:

$x_i$	$J_0(x_i)$	$J(x_i)$	$ J_0(x_i) - J_N(x_i) $	$N$
0,0	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2
0,2	0,2227025926	0,2229140997	0,0002115071	128
0,4	0,4283923805	0,4287676811	0,0003753006	512
0,6	0,6038561463	0,6043169498	0,0004608035	512
0,8	0,7421009541	0,7425656319	0,0004646778	512
1,0	0,8427006602	0,8431062102	0,0004055500	512
1,2	0,9103140831	0,9106265903	0,0003125072	512
1,4	0,9522852302	0,9525024891	0,0002172589	512
1,6	0,9763484001	0,9764841199	0,0001357198	512
1,8	0,9890906215	0,9891686440	0,0000780225	512
2,0	0,9953226447	0,9953628182	0,0000401735	512

Таблица 4 - таблица значений для формулы Трапеций

4. 4.1. Вывод формулы Симпсона через интегральный полином Лагранжа:

Формула для полинома Лагранжа:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \prod_{i \neq j, j=0}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (8)$$

По трём узлам ( $x_1 = a, x_2 = \frac{a+b}{2}, x_3 = b$ ):  $L_2 = f(a) \left( \frac{x - \frac{a+b}{2}}{a - \frac{a+b}{2}} \right) \left( \frac{x-b}{a-b} \right) +$

$$f\left(\frac{a+b}{2}\right) \left( \frac{x-a}{\frac{a+b}{2} - a} \right) \left( \frac{x-b}{\frac{a+b}{2} - b} \right) + f(b) \left( \frac{x - \frac{a+b}{2}}{b - \frac{a+b}{2}} \right) \left( \frac{x-a}{b-a} \right).$$

Проинтегрируем выражение по интервалу [a,b]:

$$\int_a^b L_2(x) dx = f(a)c_1 + f\left(\frac{a+b}{2}\right)c_2 + f(b)c_3 \quad (9)$$

где  $c_1 = \frac{b-a}{6}, c_2 = \frac{2}{3}(b-a), c_3 = \frac{b-a}{6}.$

Тогда:

$$\int_a^b L_2(x) dx = \frac{b-a}{6} \left( f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right) \quad (10)$$

#### 4.2. Формула Симпсона:

$x_i$	$J_0(x_i)$	$J(x_i)$	$ J_0(x_i) - J_N(x_i) $	$N$
0,0	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2
0,2	0,2227025926	0,2227026075	0,0000000149	2
0,4	0,4283923805	0,4283923805	0,0000000000	4
0,6	0,6038561463	0,6038562059	0,0000000596	8
0,8	0,7421009541	0,7421009541	0,0000000000	8
1,0	0,8427006602	0,8427007794	0,0000001192	16
1,2	0,9103140831	0,9103139639	0,0000001192	16
1,4	0,9522852302	0,9522852302	0,0000000000	8
1,6	0,9763484001	0,9763483405	0,0000000596	16
1,8	0,9890906215	0,9890906215	0,0000000000	32
2,0	0,9953226447	0,9953221679	0,0000004768	32

Таблица 5 - таблица значений для формулы Симпсона

#### 5. Формула Гаусса:

$x_i$	$J_0(x_i)$	$J(x_i)$	$ J_0(x_i) - J_N(x_i) $	$N$
0,0	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2
0,2	0,2227025926	0,2227025777	0,0000000149	2
0,4	0,4283923805	0,4283923209	0,0000000596	4
0,6	0,6038561463	0,6038560867	0,0000000596	8
0,8	0,7421009541	0,7421008945	0,0000000596	8
1,0	0,8427006602	0,8427007794	0,0000001192	16
1,2	0,9103140831	0,9103140235	0,0000000596	16
1,4	0,9522852302	0,9522851706	0,0000000596	8
1,6	0,9763484001	0,9763484001	0,0000000000	16
1,8	0,9890906215	0,9890905023	0,0000001192	32
2,0	0,9953226447	0,9953223467	0,0000002980	32

Таблица 6 - таблица значений для формулы Гаусса

## 3 Выводы

Прodelав все вычисления, можно сделать выводы, что более комплексные методы вычисления интеграла, как формула Гаусса и Симпсона, показывают наилучшие результаты за меньшее количество разбиений. В это же время худшие результаты вычисления показывают методы Правых прямоугольников и метод Трапеций, приводя к довольно большому значению ошибки.

## 4 Листинг программы

```
1 #include <algorithm>
2 #include <cmath>
3 #include <iostream>
4 #include <vector>
5
6 using namespace std;
7
8 namespace constans {
9     const int STEPS = 1024;
10    const float LEFT_BORDER = 0;
11    const float EPSILON = 1e-6;
12    const float E = 2.71828182846;
13 } // namespace constans
14
15 float Tfunc(float x) {
```

```

16  int n = 0;
17  float node_0 = x;
18  float ans = x;
19  while (fabs(node_0) > 1e-6) {
20      float q = (-1)*(((2*n + 1)*x*x)/(2*n*n + 5*n + 3));
21      node_0 *= q;
22      ans += node_0;
23      n++;
24  }
25  return (2/sqrt(M_PI))*ans;
26 }
27
28 float func(float t) { return (2 / sqrt(M_PI)) * pow(constans::E, -(t * t)); }
29
30 float leftRectangles(float (*func)(float), const float &a, float b,
31                      int steps) {
32     float result = 0.0;
33     float h = (b - a) / steps;
34     float x_i = 0.0;
35     for (int i = 0; i < steps; i++) {
36         x_i = a + h * i;
37         result += h * func(x_i);
38     }
39     return result;
40 }
41
42 float rightRectangles(float (*func)(float), const float &a, float b,
43                      int steps) {
44     float result = 0.0;
45     float h = (b - a) / steps;
46     float x_i_1 = 0.0;
47     for (int i = 1; i <= steps; i++) {
48         x_i_1 = a + h * i;
49         result += h * func(x_i_1);
50     }
51     return result;
52 }
53
54 float middleRectangles(float (*func)(float), const float &a, float b,
55                       int steps) {
56     float result = 0.0;
57     float h = (b - a) / steps;
58     float x_i = 0.0;
59     float x_i_1 = 0.0;
60     for (int i = 1; i <= steps; i++) {
61         x_i = a + h * (i - 1);
62         x_i_1 = a + h * i;
63         result += h * func((x_i + x_i_1) / 2);
64     }
65     return result;
66 }
67
68 float trapezeFormula(float (*func)(float), const float &a, float b,
69                     int steps) {
70     float result = func(a) + func(b);
71     float h = (b - a) / steps;
72     float x_i_1 = 0.0;
73     for (int i = 1; i <= steps; i++) {
74         x_i_1 = a + h * i;
75         result += 2 * func(x_i_1);
76     }
77     result *= h / 2;
78     return result;
79 }
80
81 float SympsonsFormula(float (*func)(float), const float &a, float b,

```

```

82         int steps) {
83     float h = (b - a) / steps;
84     float result = 0;
85     float x = 0;
86     for (int i = 0; i < steps; i++)
87     {
88         result += (func(x) + 4 * func(x + h / 2) + func(x + h)) * h / 6;
89         x += h;
90     }
91     return result;
92 }
93
94 float GaussFormula(float (*func)(float), const float &a, float b, int steps) {
95     float h = (b - a) / steps;
96     float ad1 = (1 - 1.0 / sqrt(3)) * h / 2;
97     float ad2 = (1 + 1.0 / sqrt(3)) * h / 2;
98     float result = 0;
99     float x = 0;
100    for (int i = 0; i < steps; i++)
101    {
102        result += (func(x + ad1) + func(x + ad2)) * h / 2;
103        x += h;
104    }
105    return result;
106 }
107
108 void CalculateFunc(vector<float> points,
109                  float (*function)(float), const float &,
110                  float, int)) {
111     for (auto point : points) {
112         int i = 1;
113         float last_j = 0.0;
114         float j = 0.0;
115         do {
116             i *= 2;
117             last_j = j;
118             j = function(func, constans::LEFT_BORDER, point, i);
119         } while (abs(last_j - j) > constans::EPSILON && i < constans::STEPS);
120
121         float difference = abs(Tfunc(point) - j);
122
123         printf(
124             "x_i = %.11f | J_o = %.101f | J_n = %.101f | |J_o - J_n| = %.101f | N "
125             "= %d\n",
126             point, Tfunc(point), j, difference, i);
127     }
128 }
129
130
131 int main() {
132     vector<float> points = {0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0,
133                          1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0};
134     cout << "Правые прямоугольники\n";
135     CalculateFunc(points, rightRectangles);
136     cout << "Левые прямоугольники\n";
137     CalculateFunc(points, leftRectangles);
138     cout << "Центральные прямоугольники\n";
139     CalculateFunc(points, middleRectangles);
140     cout << "Трапеции\n";
141     CalculateFunc(points, trapezeFormula);
142     cout << "Симпсон\n";
143     CalculateFunc(points, SypmsonsFormula);
144     cout << "Гайс\n";
145     CalculateFunc(points, GaussFormula);
146     return 0;
147 }

```