

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| 1 Метод Гаусса решения систем линейных уравнений | 4 |
| 1.1 Прямой ход метода Гаусса | 5 |
| 1.2 Обратный ход метода Гаусса | 7 |
| 1.3 Метод Гаусса с выбором главного элемента | 8 |
| 1.4 Численное решение системы линейных алгебраических уравнений ме- тодом Гаусса | 8 |
| 2 Интерполирование функций | 11 |
| 2.1 Интерполяция функций полиномами Лагранжа | 11 |
| 2.2 Пример интерполирование функции полином Лагранжа $L_3(x)$ | 13 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 16 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 17 |

ВВЕДЕНИЕ

Особенно острая потребность в развитии численных методов появилась в связи с необходимостью решения новых сложных задач, возникающих в ходе развития современной физики и новейших областей техники и технологий. Кроме того, использование численных методов допускает применения простых и вполне осуществимых вычислений.

— Обыкновенными дифференциальными уравнениями можно описать задачи движения системы взаимодействующих материальных точек, химической кинетики, электрических цепей, сопротивления материалов (например, статический прогиб упругого стержня) и многие другие.

Ряд важных задач для уравнений в частных производных также сводится к задачам для обыкновенных дифференциальных уравнений. Например, если многомерная задача допускает разделение пространственных переменных (например, задачи на нахождение собственных колебаний упругих балок и мембран простейшей формы, или определение спектра собственных значений энергии частицы в сферически-симметричном поле), или если ее решение зависит только от некоторой комбинации переменных (автомодельные решения), то задача нахождения решения уравнений в частных производных сводится к задачам на собственные значения для обыкновенных дифференциальных уравнений.

Таким образом, решение обыкновенных дифференциальных уравнений занимает важное место среди прикладных задач физики, химии и техники.

Цель данной работы состоит в приобретении практических навыков применения численных методов решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

1 Метод Гаусса решения систем линейных уравнений

К решению систем линейных алгебраических уравнений сводится подавляющее большинство задач вычислительной математики и многие численные методы основаны на решении систем линейных уравнений вида:

$$\mathbf{A} \cdot \vec{x} = \vec{b},$$

где \mathbf{A} – квадратная матрица $m \times m$, \vec{x} и \vec{b} – искомый вектор неизвестных и заданный вектор размерности $1 \times m$:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix}, \quad \vec{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}.$$

Предполагается, что определитель матрицы \mathbf{A} отличен от нуля $\det(\mathbf{A}) \neq 0$, так что решение \vec{x} существует и единственно. Систему линейных уравнений можно решить по крайней мере двумя способами: либо воспользовавшись *формулами Крамера*, либо методом последовательного исключения неизвестных (*методом Гаусса*). При больших порядка матрицы m способ Крамера, основанный на вычислении определителей, требует порядка $m!$ арифметических действий, в то время как метод Гаусса – $O(m^3)$ действий.

Для большинства вычислительных задач характерным является большой порядок матрицы \mathbf{A} ($m \approx 10^2 \dots 10^5$), поэтому метод Гаусса в различных вариантах широко используется при решении задач линейной алгебры на ЭВМ.

Систему линейных алгебраических уравнений можно записать в развернутом виде:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \cdots a_{1m} \cdot x_m = b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \cdots a_{2m} \cdot x_m = b_2 \\ a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2 + \cdots a_{3m} \cdot x_m = b_3 \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \ddots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \cdots a_{mm} \cdot x_m = b_m \end{cases}$$

где $a_{ij}^{(1)}$ и $b_i^{(1)}$ – модифицированные коэффициенты при неизвестных и правой части, соответственно.

$$a_{ij}^{(1)} = (a_{ij} - c_{1j} \cdot a_{i1}), \quad b_i^{(1)} = (b_i - y_1 \cdot a_{i1}), \quad (i, j = 2, 3, \dots, m)$$

Если $a_{22}^{(1)} \neq 0$, то из модифицированной системы аналогично можно исключить неизвестное x_2 . Для этого разделим второе уравнение системы на $a_{22}^{(1)}$, и в результате получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + c_{12} \cdot x_2 + \dots + c_{1m} \cdot x_m = y_1 \\ \quad x_2 + \dots + c_{2m} \cdot x_m = y_2 \\ \quad a_{32}^{(1)} \cdot x_2 + \dots + a_{3m}^{(1)} \cdot x_m = b_3^{(1)}, \\ \quad \vdots \quad \quad \quad \ddots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \quad a_{m2}^{(1)} \cdot x_2 + \dots + a_{mm}^{(1)} \cdot x_m = b_m^{(1)} \end{array} \right.$$

где c_{2j} и y_2 – нормированные коэффициенты 2-ой строки и правой части 2-го уравнения, соответственно.

$$c_{2j} = \frac{a_{2j}^{(1)}}{a_{22}^{(1)}} \quad (j = 3, 4, \dots, m), \quad y_2 = \frac{b_2^{(1)}}{a_{22}^{(1)}}.$$

Последовательно умножим второе уравнение системы на $a_{i2}^{(1)}$ и вычтем полученное уравнение из каждого i -го уравнения системы $i = 3, 4, \dots, m$. В результате получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + c_{12} \cdot x_2 + \dots + c_{1m} \cdot x_m = y_1 \\ \quad x_2 + \dots + c_{2m} \cdot x_m = y_2 \\ \quad \dots \quad \left(a_{3m}^{(1)} - c_{2m} \cdot a_{32}^{(1)} \right) \cdot x_m = b_3^{(1)} - y_2 \cdot a_{32}^{(1)}, \\ \quad \quad \quad \ddots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \quad \dots \quad \left(a_{mm}^{(1)} - c_{2m} \cdot a_{m2}^{(1)} \right) \cdot x_m = b_m^{(1)} - y_2 \cdot a_{m2}^{(1)} \end{array} \right.$$

или в более компактном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + c_{12} \cdot x_2 + \dots + c_{1m} \cdot x_m = y_1 \\ \quad x_2 + \dots + c_{2m} \cdot x_m = y_2 \\ \quad \quad \quad \dots + a_{3m}^{(2)} \cdot x_m = b_3^{(2)}, \\ \quad \quad \quad \ddots \quad \quad \quad \vdots \\ \quad \quad \quad \dots + a_{mm}^{(2)} \cdot x_m = b_m^{(2)} \end{array} \right.$$

где $a_{ij}^{(2)}$ и $b_i^{(2)}$ – повторно модифицированные коэффициенты при неизвестных и правой части, соответственно:

$$a_{ij}^{(2)} = (a_{ij}^{(1)} - c_{2j} \cdot a_{i2}^{(1)}), \quad b_i^{(2)} = (b_i^{(1)} - y_2 \cdot a_{i2}^{(1)}), \quad (i, j = 3, 4, \dots, m)$$

Исключая таким же образом неизвестные x_3, x_4, \dots, x_m , исходная система линейных уравнений приводится к эквивалентному виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + c_{12} \cdot x_2 + c_{13} \cdot x_3 + \dots + c_{1m} \cdot x_m = y_1 \\ \quad x_2 + c_{23} \cdot x_3 + \dots + c_{2m} \cdot x_m = y_2 \\ \quad \quad x_3 + \dots + c_{3m} \cdot x_m = y_3 \\ \quad \quad \quad \ddots \quad \quad \quad \vdots = \vdots \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad x_m = y_m \end{array} \right.$$

1.2 Обратный ход метода Гаусса

Обратный ход заключается в нахождении неизвестных x_1, x_2, \dots, x_m полученной эквивалентной системы в прямом ходе метода Гаусса. Поскольку матрица системы имеет треугольный вид, то можно последовательно, начиная с x_m , найти все неизвестные $x_{m-1}, x_{m-2}, \dots, x_1$:

$$\begin{aligned} x_m &= y_m \\ x_{m-1} &= y_{m-1} - c_{m-1,m} \cdot x_m \\ x_{m-2} &= y_{m-2} - c_{m-2,m-1} \cdot x_{m-1} - c_{m-2,m} \cdot x_m \\ &\vdots = \dots \\ x_1 &= y_1 - \sum_{j=2}^m c_{1j} \cdot x_j \end{aligned}$$

Общие формулы обратного хода имеют вид:

$$x_i = y_i - \sum_{j=i+1}^m c_{ij} \cdot x_j, \quad i = (m-1, m-2, \dots, 1), \quad x_m = y_m$$

1.3 Метод Гаусса с выбором главного элемента

На практике, часто может оказаться, что система имеет единственное решение, хотя какой-либо из угловых миноров матрицы \mathbf{A} равен нулю.

$$\mathbf{A} \cdot \vec{x} = \vec{b}.$$

Кроме того, заранее обычно неизвестно, все ли угловые миноры матрицы \mathbf{A} отличны от нуля. В этих случаях обычный метод Гаусса может оказаться *непригодным*. Избежать указанных трудностей позволяет метод Гаусса с выбором главного элемента.

Основная идея метода состоит в том, чтобы на очередном шаге исключать не следующее по номеру неизвестное, а то неизвестное, коэффициент при котором является *наибольшим по модулю*. Таким образом, в качестве ведущего элемента здесь выбирается *главный*, т.е. наибольший по модулю элемент. Поэтому, если $\det(\mathbf{A}) \neq 0$, то в процессе вычислений не будет происходить деление на нуль.

На практике чаще всего применяется и метод Гаусса с выбором главного элемента по всей матрице, когда в качестве ведущего выбирается максимальный по модулю элемент *среди всех элементов* матрицы системы.

1.4 Численное решение системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса

Пример численного решения системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса:

$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 10 \\ 4x_1 + 5x_2 + 6x_3 = 31 \\ 3x_1 + x_2 + 5x_3 = 22 \end{cases}$$

Прямой ход метода Гаусса.

1) Разделим 1-ю строку на коэффициент при x_1 (2)

$$\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 = 5 \\ 4x_1 + 5x_2 + 6x_3 = 31 \\ 3x_1 + x_2 + 5x_3 = 22 \end{cases}$$

2) Умножим 1-ю строку на коэффициент при x_1 (4) во 2-ом уравнении

$$4x_1 + 6x_2 + 2x_3 = 20$$

и вычтем результат умножения из 2-й строки

$$\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 = 5 \\ -x_2 + 4x_3 = 11 \\ 3x_1 + x_2 + 5x_3 = 22 \end{cases}$$

3) Умножим 1-ю строку на коэффициент при x_1 (3) в 3-ем уравнении

$$3x_1 + \frac{9}{2}x_2 + \frac{3}{2}x_3 = 15$$

и вычтем результат умножения из 3-й строки

$$\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 = 5 \\ -x_2 + 4x_3 = 11 \\ -\frac{7}{2}x_2 + \frac{7}{2}x_3 = 7 \end{cases}$$

4) Разделим 2-ю строку на коэффициент при x_2 (-1)

$$\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 = 5 \\ x_2 - 4x_3 = -11 \\ -\frac{7}{2}x_2 + \frac{7}{2}x_3 = 7 \end{cases}$$

5) Умножим 2-ю строку на коэффициент при x_2 ($-\frac{7}{2}$) в 3-ем уравнении

$$-\frac{7}{2}x_2 + 14x_3 = \frac{77}{2}$$

и вычтем результат умножения из 3-й строки

$$\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 = 5 \\ x_2 - 4x_3 = -11 \\ -\frac{21}{2}x_3 = -\frac{63}{2} \end{cases}$$

6) Разделим 3-ю строку на коэффициент при x_3 ($-\frac{21}{2}$)

$$\begin{cases} x_1 + \frac{3}{2}x_2 + \frac{1}{2}x_3 = 5 \\ x_2 - 4x_3 = -11 \\ x_3 = 3 \end{cases}$$

Обратный ход метода Гаусса.

Последовательно определяем неизвестные x_3, x_2, x_1 :

$$x_3 = 3$$

$$x_2 = -11 + 4x_3 = -11 + 4 \cdot 3 = 1$$

$$x_1 = 5 - \frac{3}{2}x_2 - \frac{1}{2}x_3 = 5 - \frac{3}{2} \cdot 1 - \frac{1}{2} \cdot 3 = 2$$

Ответ: решение системы линейных уравнений: $x_1 = 2, x_2 = 1, x_3 = 3$.

Проведём *проверку решения* системы уравнений методом прямой подстановки. Для этого подставим найденный вектор неизвестных $\vec{x} = (2, 1, 3)$ в исходную систему уравнений:

$$\begin{cases} 2 \cdot 2 + 3 \cdot 1 + 1 \cdot 3 = 10 \\ 4 \cdot 2 + 5 \cdot 1 + 6 \cdot 3 = 31 \\ 3 \cdot 2 + 1 + 5 \cdot 3 = 22 \end{cases}$$

Проводим арифметические действия и получаем тождества для каждого уравнения системы:

$$\begin{cases} 4 + 3 + 3 = 10 \\ 8 + 5 + 18 = 31 \\ 6 + 1 + 15 = 22 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 10 = 10 \\ 31 = 31 \\ 22 = 22 \end{cases}$$

2 Интерполирование функций

2.1 Интерполяция функций полиномами Лагранжа

Пусть на отрезке $x \in [a, b]$ выбраны узлы интерполирования $\{x_i\}$ ($i = 0, 1, \dots, n$), в которых известны значения функции $y_i = f(x_i)$. Задача интерполирования алгебраическими многочленами состоит в том, чтобы построить многочлен степени n

$$L_n(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_n \cdot x^n = \sum_{i=0}^n a_i x^i$$

значения которого в заданных точках $\{x_i\}$, совпадают со значениями функции $\{y_i\}$ в этих точках.

Многочлен $L_n(x)$ должен удовлетворять условиям:

$$\begin{cases} L_n(x_0) = y_0 \\ L_n(x_1) = y_1 \\ L_n(x_2) = y_2 \\ \dots\dots\dots \\ L_n(x_n) = y_n \end{cases}$$

Интерполяционная формула Лагранжа позволяет представить многочлен $L_n(x)$ в виде линейной комбинации значений функции $y(x)$ в узлах интерполирования:

$$L_n(x) = c_0(x) \cdot y_0 + c_1(x) \cdot y_1 + c_2(x) \cdot y_2 + \dots + c_n(x) \cdot y_n$$

где $c_0(x), c_1(x), c_2(x), \dots, c_n(x)$ – неизвестные функции.

Из условий интерполирования:

$$\begin{cases} c_0(x_0) \cdot y_0 + c_1(x_0) \cdot y_1 + c_2(x_0) \cdot y_2 + \dots + c_n(x_0) \cdot y_n = y_0 \\ c_0(x_1) \cdot y_0 + c_1(x_1) \cdot y_1 + c_2(x_1) \cdot y_2 + \dots + c_n(x_1) \cdot y_n = y_1 \\ c_0(x_2) \cdot y_0 + c_1(x_2) \cdot y_1 + c_2(x_2) \cdot y_2 + \dots + c_n(x_2) \cdot y_n = y_2 \\ \dots\dots\dots \\ c_0(x_n) \cdot y_0 + c_1(x_n) \cdot y_1 + c_2(x_n) \cdot y_2 + \dots + c_n(x_n) \cdot y_n = y_n \end{cases}$$

Система уравнений совместна если выполняются условия:

$$c_i(x_j) = \begin{cases} 1, & x_j = x_i \\ 0, & x_j \neq x_i \end{cases}$$

Коэффициенты $c_i(x)$ можно искать в виде многочленов степени n :

[illegible]

Определим неизвестные $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ из условия для коэффициентов $c_i(x)$:

[illegible]

Таким образом, коэффициенты $c_i(x)$ интерполяционного многочлена находятся из соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{lcl} c_0(x) & = & \frac{(x - x_1) \cdot (x - x_2) \cdot \dots \cdot (x - x_n)}{(x_0 - x_1) \cdot (x_0 - x_2) \cdot \dots \cdot (x_0 - x_n)} \\ c_1(x) & = & \frac{(x - x_0) \cdot (x - x_2) \cdot \dots \cdot (x - x_n)}{(x_1 - x_0) \cdot (x_1 - x_2) \cdot \dots \cdot (x_1 - x_n)} \\ & \dots & \\ c_n(x) & = & \frac{(x - x_0) \cdot (x - x_1) \cdot \dots \cdot (x - x_{n-1})}{(x_n - x_0) \cdot (x_n - x_1) \cdot \dots \cdot (x_n - x_{n-1})} \end{array} \right.$$

Или в более компактной форме:

$$c_i(x) = \frac{\prod_{j \neq i}^n (x - x_j)}{\prod_{j \neq i}^n (x_i - x_j)}$$

Итак, интерполяционный многочлен Лагранжа имеет вид:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n \frac{\prod_{j \neq i}^n (x - x_j)}{\prod_{j \neq i}^n (x_i - x_j)} \cdot y_i$$

2.2 Пример интерполирование функции полином Лагранжа $L_3(x)$

Известно множество данных (узлов интерполяции) $\{x_i\}$ ($i = 0, 1, 2, 3$), в которых определены значения функции $y_i = f(x_i)$:

| | | | | |
|-------|-------|-------|------|------|
| x_i | -0.76 | -0.09 | 0.22 | 0.55 |
| y_i | 0.08 | 1.84 | 0.40 | 0.96 |

Построим интерполяционный полином Лагранжа $L_3(x)$ на основе данных об узлах интерполяции $\{x_i\}$ и значений функции в этих точках $\{y_i\}$:

$$L_3(x) = \sum_{i=0}^3 \frac{\prod_{j \neq i}^3 (x - x_j)}{\prod_{j \neq i}^3 (x_i - x_j)} \cdot y_i$$

1) Представим полином Лагранжа в развернутом виде:

$$\begin{aligned} L_3(x) = & \frac{(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)(x_0 - x_3)} \cdot f(x_0) + \\ & + \frac{(x - x_0)(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} \cdot f(x_1) + \\ & + \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} \cdot f(x_2) + \\ & + \frac{(x - x_0)(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_0)(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} \cdot f(x_3) \end{aligned}$$

2) Воспользуемся численными данными об узлах интерполяции $\{x_i\}$ и значе-

ния интерпретируемой функции в этих узлах $\{f(x_i)\}$:

$$\begin{aligned}
 L_3(x) = & \frac{(x - (-0,09))(x - 0,22)(x - 0,55)}{(-0,76 - (-0,09))(-0,76 - 0,22)(-0,76 - 0,55)} \cdot 0,08 + \\
 & + \frac{(x - (-0,76))(x - 0,22)(x - 0,55)}{(-0,09 - (-0,76))(-0,09 - 0,22)(-0,09 - 0,55)} \cdot 1,84 + \\
 & + \frac{(x - (-0,76))(x - (-0,09))(x - 0,55)}{(0,22 - (-0,76))(0,22 - (-0,09))(0,22 - 0,55)} \cdot 0,40 + \\
 & + \frac{(x - (-0,76))(x - (-0,09))(x - 0,22)}{(0,55 - (-0,76))(0,55 - (-0,09))(0,55 - 0,22)} \cdot 0,96
 \end{aligned}$$

3) Проведем необходимые арифметические действия:

$$\begin{aligned}
 L_3(x) = & \frac{(x + 0,09)(x - 0,22)(x - 0,55)}{(-0,67)(-0,98)(-1,31)} \cdot 0,08 + \\
 & + \frac{(x + 0,76)(x - 0,22)(x - 0,55)}{(0,67)(-0,31)(-0,64)} \cdot 1,84 + \\
 & + \frac{(x + 0,76)(x + 0,09)(x - 0,55)}{(0,98)(0,31)(-0,33)} \cdot 0,40 + \\
 & + \frac{(x + 0,76)(x + 0,09)(x - 0,22)}{(1,31)(0,64)(0,33)} \cdot 0,96
 \end{aligned}$$

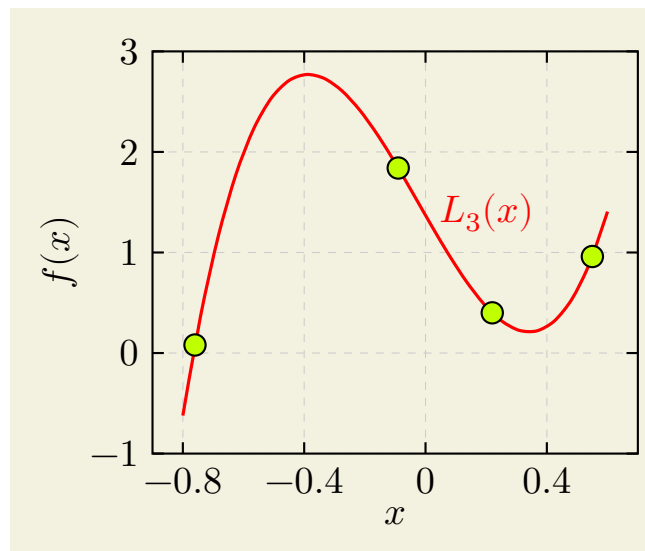
или

$$\begin{aligned}
 L_3(x) = & \frac{(x + 0,09)(x - 0,22)(x - 0,55)}{-0,86} \cdot 0,08 + \\
 & + \frac{(x + 0,76)(x - 0,22)(x - 0,55)}{0,13} \cdot 1,84 + \\
 & + \frac{(x + 0,76)(x + 0,09)(x - 0,55)}{-0,10} \cdot 0,40 + \\
 & + \frac{(x + 0,76)(x + 0,09)(x - 0,22)}{0,28} \cdot 0,96
 \end{aligned}$$

Продолжая делать упрощения окончательно получим:

$$\begin{aligned}
 L_3(x) = & (x + 0,09)(x - 0,22)(x - 0,55) \cdot (-0,09) + \\
 & + (x + 0,76)(x - 0,22)(x - 0,55) \cdot 13,84 + \\
 & + (x + 0,76)(x + 0,09)(x - 0,55) \cdot (-3,99) + \\
 & + (x + 0,76)(x + 0,09)(x - 0,22) \cdot 3,47
 \end{aligned}$$

- 4) На одном графике представим диаграмму рассеяния (разброса) данных $f(x_i)$ (маркеры) и интерполяционный полином Лагранжа $L_3(x)$ (**сплошная линия**).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод Эйлера численного решения задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Для заданной системы дифференциальных уравнений первого порядка построены рекуррентные соотношения для неизвестных функций $u_1(t)$ и $u_2(t)$, которые позволяют последовательно определить их значения в узлах временной сетке ω_τ .

На основе построенных рекуррентных соотношений найдено численное решение задачи Коши в узлах равномерной сетке $\omega_\tau = \{0, 2, 4, 6, 8, 10\}$. Построены графики функций $u_1(t)$ и $u_2(t)$ на основании вычисленных значений значениях неизвестных функций в различных узлах временной сетки ω_τ .

Определена предельная абсолютная погрешность приближенного решения задачи Коши в пределах всего заданного временного интервала. Установлено, что максимальная предельная абсолютная погрешность для $u_1(t)$ составляет $\epsilon_1 = 5, 1$, а для функции $u_2(t) - \epsilon_2 = 2, 4$.

Приобретен практический навык применения численных методов решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Самарский А. А. Введение в численные методы. – Лань, 2009. –288 с.
- 2 Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: учебное пособие для вузов // М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1989. –432 с.
- 3 Самарский А. А. и др. Задачи и упражнения по численным методам: Учебное пособие // М.: Эдиториал УРСС, 2000. –208 с.
- 4 Калиткин Н. Н. Численные методы. 2 изд. –СПб.: БХВ-Петербург, 2011. –592 с.
- 5 Калиткин Н. Н. Численные методы: Учебное пособие. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1978. –511 с.
- 6 Демидович, Б.П. Численные методы анализа: приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова ; под ред. Б.П. Демидович. – Изд. 3-е, перераб. – Москва : Главная редакция физико-математической литературы, 1967. –368 с.