

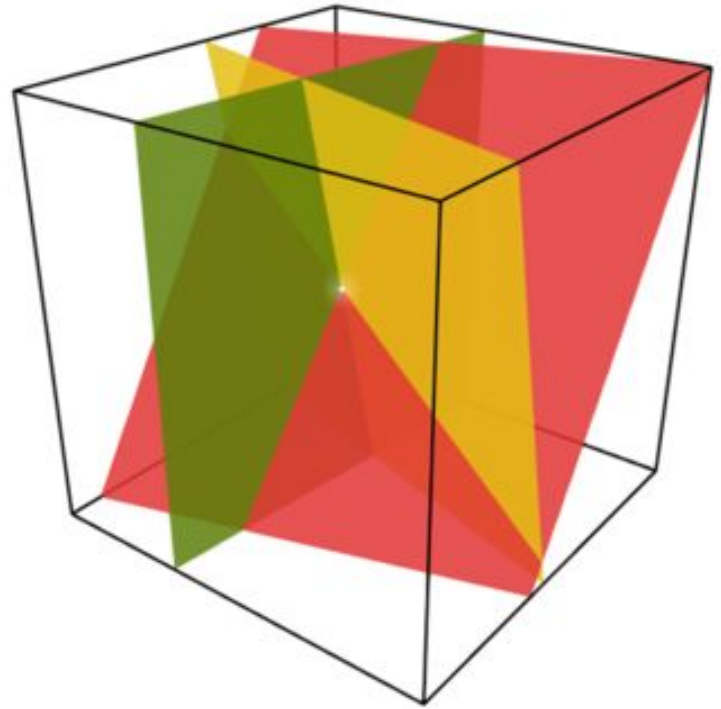
# Алгоритмы решения систем линейных алгебраических уравнений

# Система линейных уравнений

**Система линейных алгебраических уравнений** (*линейная система*, также употребляются аббревиатуры *СЛАУ*, *СЛУ*) — система уравнений, каждое уравнение в котором является линейным — алгебраическим уравнением первой степени.

В классическом варианте коэффициенты при переменных, свободные члены и неизвестные считаются вещественными числами, но все методы и результаты сохраняются (либо естественным образом обобщаются) на случай любых полей, например, комплексных чисел.

Решение систем линейных алгебраических уравнений — одна из классических задач линейной алгебры, во многом определившая её объекты и методы. Кроме того, линейные алгебраические уравнения и методы их решения играют важную роль во многих прикладных направлениях, в том



$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

# Система линейных

## уравнений

Общий вид системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{cases}$$

Здесь  $m$  — количество уравнений, а  $n$  — количество переменных,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — неизвестные, которые надо определить, коэффициенты  $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{mn}$  и свободные члены  $b_1, b_2, \dots, b_m$  предполагаются известными. Индексы коэффициентов в системах линейных уравнений ( $a_{ij}$ ) формируются по следующему соглашению: первый индекс ( $i$ ) обозначает номер уравнения, второй ( $j$ ) — номер переменной, при которой стоит этот коэффициент.

Система называется **однородной**, если все её свободные члены равны нулю ( $b_1, b_2, \dots, b_m = 0$ ), иначе — **неоднородной**.

**Квадратная система линейных уравнений** — система, у которой количество уравнений совпадает с числом неизвестных ( $m=n$ ). Система, у которой число неизвестных больше числа уравнений является **недоопределённой**, такие системы линейных алгебраических уравнений также называются **прямоугольными**. Если уравнений больше, чем неизвестных, то система является **переопределённой**.

# Система линейных уравнений


Решение системы линейных алгебраических уравнений — совокупность  $n$  чисел  $c_1, c_2, \dots, c_n$ , таких что их соответствующая подстановка вместо  $x_1, x_2, \dots, x_n$  в систему обращает все её уравнения в тождества.

Система называется **совместной**, если она имеет хотя бы одно решение, и **несовместной**, если у неё нет ни одного решения. Решения считаются **различными**, если хотя бы одно из значений переменных не совпадает. Совместная система с единственным решением называется **определённой**, при наличии более одного решения — **недоопределённой**.

В матричной форме система линейных алгебраических уравнений может быть представлена в виде

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

Здесь  $A$  — это матрица системы,  $x$  — столбец неизвестных, а  $b$  — столбец свободных членов. Если к матрице  $A$  приписать справа столбец свободных членов, то получившаяся матрица называется расширенной


$$Ax = b$$

# Система линейных уравнений

Пример

Система из двух уравнений с двумя неизвестными имеет вид



$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 = 6, \\ 4x_1 + 9x_2 = 15. \end{cases}$$

Чтобы найти неизвестные  $x_1$ ,  $x_2$  нужно решить верхнее уравнение относительно  $x_1$ :

$$x_1 = 3 - \frac{3}{2}x_2,$$

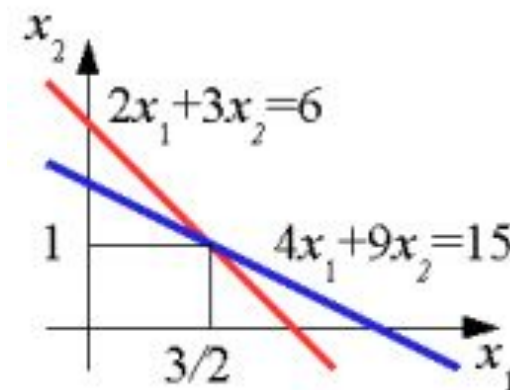
Затем подставить полученное решение в нижнее уравнение:

$$4\left(3 - \frac{3}{2}x_2\right) + 9x_2 = 15.$$

Получено решение:

$$x_1 = \frac{3}{2}, x_2 = 1$$

Данную систему можно наглядно изобразить на графике в виде двух прямых



# Система линейных уравнений

Пример

Швейная фабрика в течении трех дней производила костюмы, плащи и куртки. Известны объемы выпуска продукции за три дня и денежные затраты на производство за эти три дня. Найти себестоимость единицы продукции каждого вида.

Зная затраты на каждый день и количество произведенной продукции за день, составим систему линейных уравнений:

$$50x+10y+30z=176;$$

$$35x+25y+20z=168;$$

$$40x+20y+30z=184.$$

День	Объем выпуска продукции( единиц)			Затраты (тыс.усл.ед)
	Костюмы	Плащи	Куртки	
I	50	10	30	176
II	35	25	20	168
III	40	20	30	184

Себестоимость **1,8 тыс.усл.ед** для производства одного костюма, **2,6 тыс.усл.ед**- для производства одного плаща и **2 тысячи усл.ед.** - для производства одного плаща.

# Методы решения СЛАУ

**Прямые методы** дают алгоритм, по которому можно найти точное решение систем линейных алгебраических уравнений. **Итерационные методы** основаны на использовании повторяющегося процесса и позволяют получить решение в результате последовательных приближений.

## Некоторые прямые методы:

- Метод Гаусса
- Метод Гаусса — Жордана
- Метод Крамера
- Матричный метод
- Метод прогонки

## Итерационные методы:

- Метод Якоби (метод простой итерации)
- Метод Гаусса — Зейделя
- Метод релаксации
- Многосеточный метод

# Метод Гаусса

Наиболее распространенным методом решения систем линейных алгебраических уравнений является **метод Гаусса**, в основе которого лежит идея последовательного исключения неизвестных.

Метод Гаусса включает в себя **2 стадии**:

- последовательное (прямое) исключение;
- обратная подстановка.

## Последовательное исключение

Исключения Гаусса основаны на идее последовательного исключения переменных по одной до тех пор, пока не останется только одно уравнение с одной переменной в левой части. Затем это уравнение решается относительно единственной переменной. Таким образом, систему уравнений приводят к треугольной (ступенчатой) форме. Для этого среди элементов первого столбца матрицы выбирают ненулевой (а чаще максимальный) элемент и перемещают его на крайнее верхнее положение перестановкой строк. Затем нормируют все уравнения, разделив его на коэффициент  $a_{i1}$ , где  $i$  – номер столбца.

$$\begin{cases} x_1 + \frac{a_{12}}{a_{11}} \cdot x_2 + \dots + \frac{a_{1n}}{a_{11}} \cdot x_n = \frac{y_1}{a_{11}} \\ x_1 + \frac{a_{22}}{a_{21}} \cdot x_2 + \dots + \frac{a_{2n}}{a_{21}} \cdot x_n = \frac{y_2}{a_{21}} \\ \dots \\ x_1 + \frac{a_{n2}}{a_{n1}} \cdot x_2 + \dots + \frac{a_{nn}}{a_{n1}} \cdot x_n = \frac{y_n}{a_{n1}} \end{cases}$$



# Метод Гаусса

Затем вычитают получившуюся после перестановки первую строку из остальных строк:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + \frac{a_{12}}{a_{11}} \cdot x_2 + \dots + \frac{a_{1n}}{a_{11}} \cdot x_n = \frac{y_1}{a_{11}} \\ 0 + \left( \frac{a_{22}}{a_{21}} - \frac{a_{12}}{a_{11}} \right) \cdot x_2 + \dots + \left( \frac{a_{2n}}{a_{21}} - \frac{a_{1n}}{a_{11}} \right) \cdot x_n = \left( \frac{y_2}{a_{21}} - \frac{y_1}{a_{11}} \right) \\ \dots \\ 0 + \left( \frac{a_{n2}}{a_{n1}} - \frac{a_{12}}{a_{11}} \right) \cdot x_2 + \dots + \left( \frac{a_{nn}}{a_{n1}} - \frac{a_{1n}}{a_{11}} \right) \cdot x_n = \left( \frac{y_n}{a_{n1}} - \frac{y_1}{a_{11}} \right) \end{array} \right.$$

Получают новую систему уравнений, в которой заменены соответствующие коэффициенты.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + a'_{12} \cdot x_2 + \dots + a'_{1n} \cdot x_n = y'_1 \\ 0 + a'_{22} \cdot x_2 + \dots + a'_{2n} \cdot x_n = y'_2 \\ \dots \\ 0 + a'_{n2} \cdot x_2 + \dots + a'_{nn} \cdot x_n = y'_n \end{array} \right.$$

# Метод Гаусса

После того, как указанные преобразования были совершены, первую строку и первый столбец мысленно вычёркивают и продолжают указанный процесс для всех последующих уравнений пока не останется уравнение с одной неизвестной:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + a'_{12} \cdot x_2 + a'_{13} \cdot x_3 + \dots + a'_{1n} \cdot x_n = y'_1 \\ 0 + x_2 + a''_{23} \cdot x_3 + \dots + a''_{2n} \cdot x_n = y''_2 \\ 0 + 0 + x_3 + \dots + a'''_{3n} \cdot x_n = y'''_3 \\ \dots \\ 0 + 0 + 0 + \dots + x_n = y_n^{n'} \end{array} \right.$$

# Метод Гаусса

## Обратная подстановка

Обратная подстановка предполагает подстановку полученного на предыдущем шаге значения переменной  $x_n$  в предыдущие уравнения:

$$x_{n-1} = y_{n-1}^{(n-1)'} - a_{(n-1)n}^{(n-1)'} \cdot x_n$$

$$x_{n-2} + a_{(n-2)(n-1)}^{(n-2)'} \cdot x_{n-1} = y_{n-2}^{(n-2)'} - a_{(n-2)n}^{(n-2)'} \cdot x_n$$

...

$$x_2 + a_{23}'' \cdot x_3 + \dots + a_{2(n-1)}'' \cdot x_{n-1} = y_2'' - a_{2n}'' \cdot x_n$$

$$x_1 + a_{12}' \cdot x_2 + a_{13}' \cdot x_3 + \dots + a_{1(n-1)}' \cdot x_{n-1} = y_1' - a_{1n}' \cdot x_n$$

Эта процедура повторяется для всех оставшихся решений:



# Метод Гаусса

Эта процедура повторяется для всех оставшихся решений:

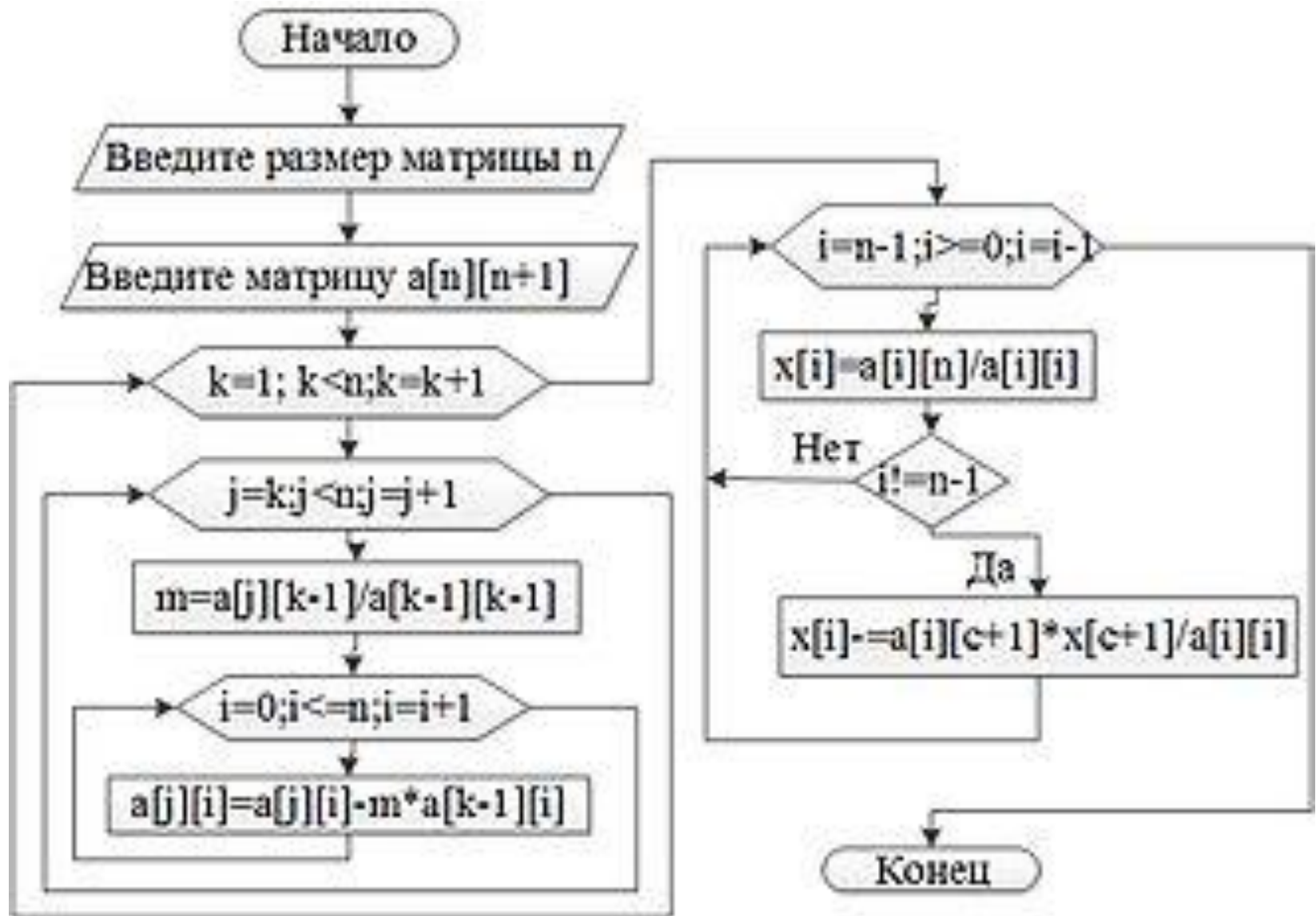
$$x_{n-2} = \left( y_{n-2}^{(n-2)'} - a_{(n-2)n}^{(n-2)'} \cdot x_n \right) - a_{(n-2)(n-1)}^{(n-2)'} \cdot x_{n-1}$$

...

$$x_2 + a_{23}'' \cdot x_3 + \dots = \left( y_2'' - a_{2n}'' \cdot x_n \right) - a_{2(n-1)}'' \cdot x_{n-1}$$

$$x_1 + a_{12}' \cdot x_2 + a_{13}' \cdot x_3 + \dots = \left( y_1' - a_{1n}' \cdot x_n \right) - a_{1(n-1)}' \cdot x_{n-1}$$

# Метод Гаусса



# Метод Гаусса

Пример

$$\begin{cases} 2 \cdot x_1 + 4 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 = 36 \\ 5 \cdot x_1 + 2 \cdot x_2 + 1 \cdot x_3 = 47 \\ 2 \cdot x_1 + 3 \cdot x_2 + 4 \cdot x_3 = 37 \end{cases} \quad \leftarrow \text{Дана система уравнений}$$

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 & 1 \\ 5 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36 \\ 47 \\ 37 \end{bmatrix} \quad \leftarrow \text{В матричной форме}$$

$$\begin{bmatrix} 5 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 47 \\ 36 \\ 37 \end{bmatrix} \quad \leftarrow \text{Выбираем строку с максимальным коэффициентом } a_{i1} \text{ и меняем ее с первой.}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{2}{5} & \frac{1}{5} \\ 1 & \frac{4}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & \frac{3}{2} & \frac{4}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{47}{5} \\ 36 \\ 37 \\ 2 \end{bmatrix} \quad \leftarrow \text{Нормируем уравнения относительно коэффициента при } x_1$$

# Метод Гаусса

Пример

Вычитаем 1 уравнение из 2 и 3

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 1.6 & 0.3 \\ 0 & 1.1 & 1.8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.4 \\ 8.6 \\ 9.1 \end{bmatrix}$$

Выбираем строку с наибольшим коэффициентом при  $a_{i2}$  (уравнение 1 не рассматривается) и перемещаем ее на место 2.

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & \boxed{1.6} & 0.3 \\ 0 & 1.1 & 1.8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.4 \\ 8.6 \\ 9.1 \end{bmatrix}$$

Нормируем 2 и 3 уравнения относительно коэффициента при  $x_2$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 1 & 0.1875 \\ 0 & 1 & 1.636 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.4 \\ 5.375 \\ 8.272 \end{bmatrix}$$

Вычитаем уравнение 2 из 3

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 1 & 0.1875 \\ 0 & 0 & 1.4489 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.4 \\ 5.375 \\ 2.897 \end{bmatrix}$$

# Метод Гаусса

Пример

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 1 & 0.166 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9.4 \\ 5.333 \\ 2 \end{bmatrix}$$



Нормируем уравнение 3 относительно коэффициента при  $x_3$

Откуда получаем  $x_3=2$ . Подставляем полученное значение в уравнения 2 и 1 получаем



$$x_2 = 5.333 - 0.1666 \cdot 2 = 5.333 - 0.333 = 5$$

$$x_1 + 0.4 \cdot x_2 = 9.4 - 0.2 \cdot 2 = 9.4 - 0.4 = 9$$

Подставляя полученное значение  $x_2=5$  в уравнение 1, найдем



$$x_1 = 9 - 0.4 \cdot 5 = 9 - 2 = 7$$

Таким образом, решением системы уравнений будет вектор

$$X = [7 \ 5 \ 2]^T$$



# Метод Гаусса

```
#include <stdio.h>
#define N 3
#define N1 N+1

float matrix[N][N1]={{2,4,1,36},
                    {5,2,1,47},
                    {2,3,4,37}
                    };

//ТОЧНОСТЬ
float epsilon=0.1;

// ВЫВОД МАТРИЦЫ
void ShowMatrix(void)
{ printf("Sistema: \n");
  int i,j;
  for (i=0;i<N;i++)
  {
    printf(" |");

    for (j=0;j<N;j++)

      printf("%+3.0fx%d",matrix[i][j],j+1);
    printf("=%3.0f\n",matrix[i][N]);
  }
}
```

```
int main()
{
  float tmp,xx[N1];
  short int i,j,k;
  ShowMatrix();
  /*Реализация метода Гаусса*/
  for (i=0;i<N;i++)
  {
    tmp=matrix[i][i];
    for (j=N;j>=i;j--) matrix[i][j]/=tmp;
    for (j=i+1;j<N;j++)
    {
      tmp=matrix[j][i];
      for (k=N;k>=i;k--)
        matrix[j][k]-=tmp*matrix[i][k];
    }
  }
  xx[N-1]=matrix[N-1][N];
  for (i=N-2;i>=0;i--)
  {
    xx[i]=matrix[i][N];
    for (j=i+1;j<N;j++) xx[i]-=matrix[i][j]*xx[j];
  }
  printf("\nMetod Gaussa:\n");
  for (i=0;i<N;i++)
    printf("x%d=%3.1f\n",i+1,xx[i]);
  system("pause");
  return 0;
}
```