

Взвешенные графы

Борис Золотов (Б06)

Иван Казменко (Б01, Б05)

Владислав Макаров (Б02, Б03)

Вячеслав Соколов (Б09)

Арина Филимонова (Б10)

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Вторник, 12 декабря 2023 года

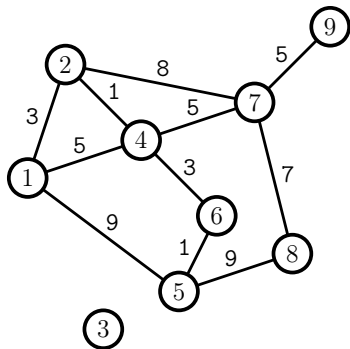
Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Содержание

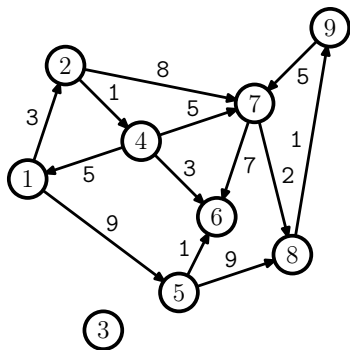
- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Определения



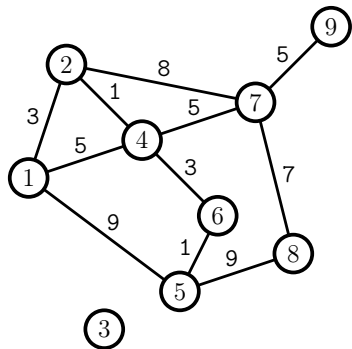
Определение: взвешенный граф (неориентированный) — это пара (V, E) , где V — множество вершин, а E — множество (неориентированных) рёбер. Каждое ребро — это неупорядоченная пара вершин, которой приписано число — его вес.

Определения



Определение: взвешенный ориентированный граф (орграф) — это пара (V, E) , где V — множество вершин, а E — множество дуг (ориентированных рёбер). Каждое ребро — это упорядоченная пара вершин, которой приписано число — его вес.

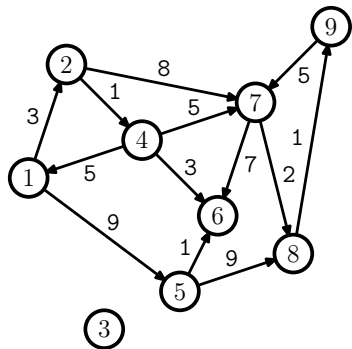
Задание графа



Ввод:

```
9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9
```

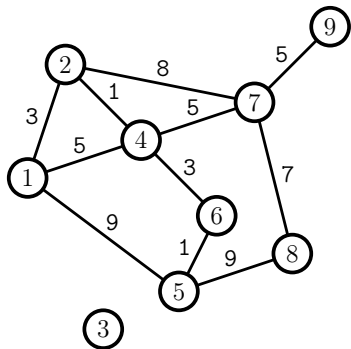
Задание графа



Ввод:

```
9 13
1 2 3
2 7 8
2 4 1
4 1 5
7 6 7
4 6 3
4 7 5
5 8 9
5 6 1
7 8 2
9 7 5
1 5 9
8 9 1
```

Матрица смежности



Ввод:

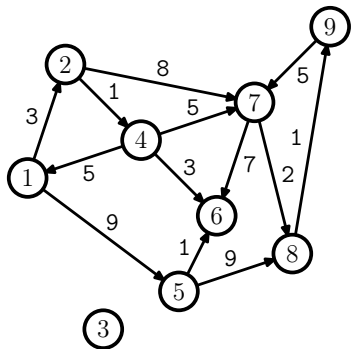
```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | ∞ | 3 | ∞ | 5 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 2 | 3 | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 5 | 1 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | 9 | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 1 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 7 | ∞ | 8 | ∞ | 5 | ∞ | ∞ | ∞ | 7 | 5 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | ∞ | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | ∞ |

Матрица смежности



Ввод:

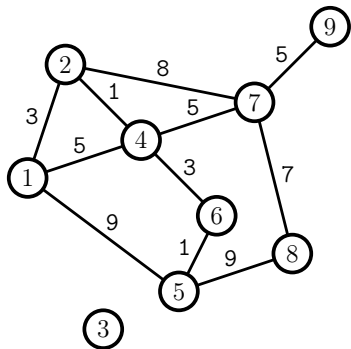
```

9 13
1 2 3
2 7 8
2 4 1
4 1 5
7 6 7
4 6 3
4 7 5
5 8 9
5 6 1
7 8 2
9 7 5
1 5 9
8 9 1

```

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | ∞ | 3 | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 2 | ∞ | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 5 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | 9 | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 7 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 7 | ∞ | 2 | ∞ |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 1 |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | ∞ |

Списки смежных рёбер



Ввод:

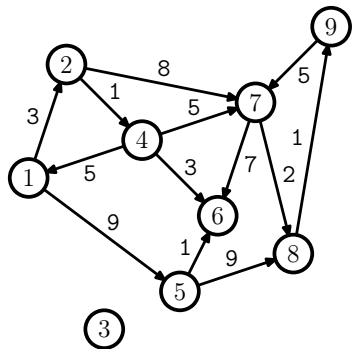
```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

| | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2,3 | 4,5 | 5,9 | |
| 2 | 1,3 | 7,8 | 4,1 | |
| 3 | | | | |
| 4 | 1,5 | 2,1 | 6,3 | 7,5 |
| 5 | 8,9 | 6,1 | 1,9 | |
| 6 | 4,3 | 5,1 | | |
| 7 | 2,8 | 4,5 | 9,5 | 8,7 |
| 8 | 5,9 | 7,7 | | |
| 9 | 7,5 | | | |

Списки смежных рёбер



Ввод:

```

9 13
1 2 3
2 7 8
2 4 1
4 1 5
7 6 7
4 6 3
4 7 5
5 8 9
5 6 1
7 8 2
9 7 5
1 5 9
8 9 1

```

| | | |
|---|-----|---------|
| 1 | 2,3 | 5,9 |
| 2 | 7,8 | 4,1 |
| 3 | | |
| 4 | 1,5 | 6,3 7,5 |
| 5 | 8,9 | 6,1 |
| 6 | | |
| 7 | 6,7 | 8,2 |
| 8 | 9,1 | |
| 9 | 7,5 | |

Матрица смежности

```

1  #include <iostream>
2  #include <vector>
3  using namespace std;
4
5  int const infinity = 0x3F3F3F3F;
6
7  int main () {
8      int n, m;
9      cin >> n >> m;
10     vector <vector <int> > a (n,
11         vector <int> (n, infinity));
12     for (int j = 0; j < m; j++) {
13         int u, v, w;
14         cin >> u >> v >> w;
15         u -= 1;
16         v -= 1;
17         a[u][v] = w;
18         a[v][u] = w;
19     }
20     return 0;
21 }

```

ВВОД:

```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | ∞ | 3 | ∞ | 5 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 1 | 3 | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 2 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 3 | 5 | 1 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 4 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | 9 | ∞ |
| 5 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 1 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 6 | ∞ | 8 | ∞ | 5 | ∞ | ∞ | ∞ | 7 | 5 |
| 7 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | ∞ | ∞ |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | ∞ |

Матрица смежности

```

1  #include <iostream>
2  #include <vector>
3  using namespace std;
4
5  int const infinity = 0x3F3F3F3F;
6
7  int main () {
8      int n, m;
9      cin >> n >> m;
10     vector <vector <int> > a (n,
11         vector <int> (n, infinity));
12     for (int j = 0; j < m; j++) {
13         int u, v, w;
14         cin >> u >> v >> w;
15         u -= 1;
16         v -= 1;
17         a[u][v] = w;
18
19     }
20     return 0;
21 }

```

ВВОД:

```

9 13
1 2 3
2 7 8
2 4 1
4 1 5
7 6 7
4 6 3
4 7 5
5 8 9
5 6 1
7 8 2
9 7 5
1 5 9
8 9 1

```

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | ∞ | 3 | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 1 | ∞ | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 2 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 3 | 5 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 4 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 1 | ∞ | 9 | ∞ |
| 5 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 7 | ∞ | 2 | ∞ |
| 7 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 1 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | ∞ |

Списки смежных рёбер

```

1  #include <iostream>
2  #include <vector>
3  using namespace std;
4
5  struct Edge {int v; int w;};
6
7  int main () {
8      int n, m;
9      cin >> n >> m;
10     vector <vector <Edge> > adj (n);
11
12     for (int j = 0; j < m; j++) {
13         int u, v, w;
14         cin >> u >> v >> w;
15         u -= 1;
16         v -= 1;
17         adj[u].push_back ({v, w});
18         adj[v].push_back ({u, w});
19     }
20     return 0;
21 }

```

ВВОД:

| | | | | | |
|-------|---|-----|-----|-----|-----|
| 9 11 | 0 | 1,3 | 3,5 | 4,9 | |
| 1 2 3 | 1 | 0,3 | 6,8 | 3,1 | |
| 1 4 5 | 2 | | | | |
| 2 7 8 | 3 | 0,5 | 1,1 | 5,3 | 6,5 |
| 2 4 1 | 4 | 7,9 | 5,1 | 0,9 | |
| 4 6 3 | 5 | 3,3 | 4,1 | | |
| 4 7 5 | 6 | 1,8 | 3,5 | 8,5 | 7,7 |
| 5 8 9 | 7 | 4,9 | 6,7 | | |
| 7 9 5 | 8 | 6,5 | | | |
| 5 6 1 | | | | | |
| 7 8 7 | | | | | |
| 1 5 9 | | | | | |

Списки смежных рёбер

```

1  #include <iostream>
2  #include <vector>
3  using namespace std;
4
5  struct Edge {int v; int w;};
6
7  int main () {
8      int n, m;
9      cin >> n >> m;
10     vector <vector <Edge> > adj (n);
11
12     for (int j = 0; j < m; j++) {
13         int u, v, w;
14         cin >> u >> v >> w;
15         u -= 1;
16         v -= 1;
17         adj[u].push_back ({v, w});
18
19     }
20     return 0;
21 }

```

ВВОД:

```

9 13
1 2 3
2 7 8
2 4 1
4 1 5
7 6 7
4 6 3
4 7 5
5 8 9
5 6 1
7 8 2
9 7 5
1 5 9
8 9 1

```

| | | | |
|---|-----|-----|-----|
| 0 | 1,3 | 4,9 | |
| 1 | 6,8 | 3,1 | |
| 2 | | | |
| 3 | 0,5 | 5,3 | 6,5 |
| 4 | 7,9 | 5,1 | |
| 5 | | | |
| 6 | 5,7 | 7,2 | |
| 7 | 8,1 | | |
| 8 | 6,5 | | |

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - **Задача**
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Задача

- Дан взвешенный граф (или оргграф).
- Длина пути – сумма длин его рёбер (или дуг).
- Задача 1: найдите кратчайший путь от вершины u до вершины v .

Задача

- Дан взвешенный граф (или оргграф).
- Длина пути – сумма длин его рёбер (или дуг).
- Задача 1: найдите кратчайший путь от вершины u до вершины v .
- Задача 2: найдите кратчайшие пути от вершины u до всех остальных вершин.

Задача

- Дан взвешенный граф (или оргграф).
- Длина пути – сумма длин его рёбер (или дуг).
- Задача 1: найдите кратчайший путь от вершины u до вершины v .
- Задача 2: найдите кратчайшие пути от вершины u до всех остальных вершин.
- Задача 3: найдите кратчайшие пути между всеми парами вершин.

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Алгоритм Флойда–Уоршола: идея

- Рассмотрим матрицу A , в которой клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v .
- Начнём с матрицы смежности и будем улучшать её.
- Будем рассматривать вершины по порядку.

Алгоритм Флойда–Уоршола: идея

- Рассмотрим матрицу A , в которой клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v .
- Начнём с матрицы смежности и будем улучшать её.
- Будем рассматривать вершины по порядку.
- Для каждой вершины $k = 1, 2, \dots, n$:
 - Рассмотрим каждую пару вершин (i, j) .
 - Длина пути из i в j не больше $A_{i,j}$.

Алгоритм Флойда–Уоршола: идея

- Рассмотрим матрицу A , в которой клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v .
- Начнём с матрицы смежности и будем улучшать её.
- Будем рассматривать вершины по порядку.
- Для каждой вершины $k = 1, 2, \dots, n$:
 - Рассмотрим каждую пару вершин (i, j) .
 - Длина пути из i в j не больше $A_{i,j}$.
 - Попробуем пройти из i в j через k : $A_{i,k} + A_{k,j}$.
 - Если этот путь короче, запишем $A_{i,j} := A_{i,k} + A_{k,j}$.

Алгоритм Флойда–Уоршола: идея

- Рассмотрим матрицу A , в которой клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v .
- Начнём с матрицы смежности и будем улучшать её.
- Будем рассматривать вершины по порядку.
- Для каждой вершины $k = 1, 2, \dots, n$:
 - Рассмотрим каждую пару вершин (i, j) .
 - Длина пути из i в j не больше $A_{i,j}$.
 - Попробуем пройти из i в j через k : $A_{i,k} + A_{k,j}$.
 - Если этот путь короче, запишем $A_{i,j} := A_{i,k} + A_{k,j}$.
- После этого матрица A построена.

Алгоритм Флойда–Уоршола: код

```
1   for (int i = 0; i < n; i++)
2       a[i][i] = 0;
3
4
5
6
7
8   for (int k = 0; k < n; k++)
9       for (int i = 0; i < n; i++)
10          for (int j = 0; j < n; j++)
11             if (a[i][j] > a[i][k] + a[k][j])
12                 a[i][j] = a[i][k] + a[k][j];
13
14
15
16   int x = 0, y = n - 1;
17   cout << a[x][y] << endl;
```

ВВОД:

```
9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9
```

ВЫВОД:

14

Алгоритм Флойда–Уоршола: код

```

1     vector <vector <int> > p (n, vector <int> (n));
2     for (int i = 0; i < n; i++) {
3         a[i][i] = 0;
4         for (int j = 0; j < n; j++)
5             p[i][j] = j;
6     }
7
8     for (int k = 0; k < n; k++)
9         for (int i = 0; i < n; i++)
10            for (int j = 0; j < n; j++)
11                if (a[i][j] > a[i][k] + a[k][j]) {
12                    a[i][j] = a[i][k] + a[k][j];
13                    p[i][j] = p[i][k];
14                }
15
16     int x = 0, y = n - 1;
17     cout << a[x][y] << endl;
18     while (x != y) {
19         cout << x + 1 << " ";
20         x = p[x][y];
21     }
22     cout << x + 1 << endl;

```

ВВОД:

```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

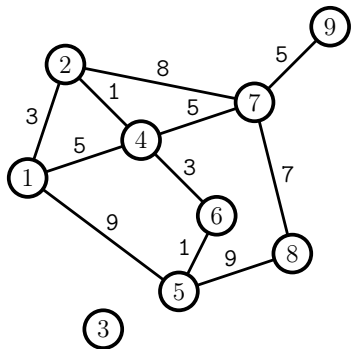
ВЫВОД:

```

14
1 2 4 7 9

```

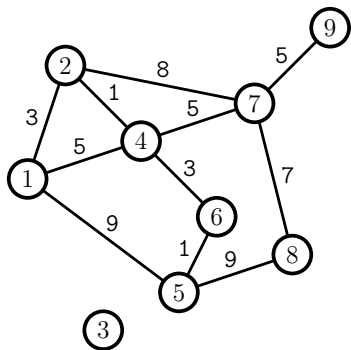
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 5 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | ∞ | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 5 | 1 | ∞ | 0 | ∞ | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | 0 | 1 | ∞ | 9 | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 1 | 0 | ∞ | ∞ | ∞ |
| 7 | ∞ | 8 | ∞ | 5 | ∞ | ∞ | 0 | 7 | 5 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

 $k = 0$

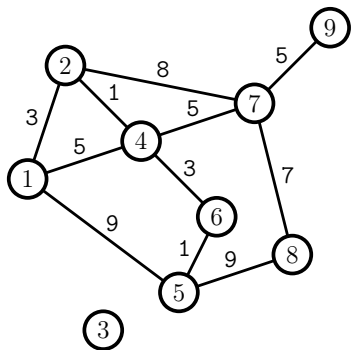
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 5 | 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 12 | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 5 | 1 | ∞ | 0 | 14 | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | 9 | 12 | ∞ | 14 | 0 | 1 | ∞ | 9 | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 1 | 0 | ∞ | ∞ | ∞ |
| 7 | ∞ | 8 | ∞ | 5 | ∞ | ∞ | 0 | 7 | 5 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

 $k = 1$

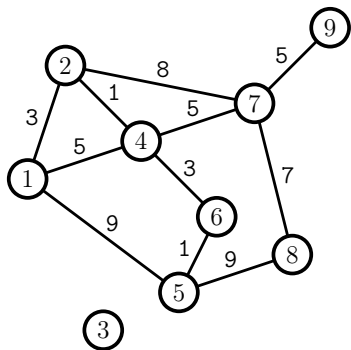
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 9 | ∞ | 11 | ∞ | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 12 | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 13 | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | 9 | 12 | ∞ | 13 | 0 | 1 | 20 | 9 | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 1 | 0 | ∞ | ∞ | ∞ |
| 7 | 11 | 8 | ∞ | 5 | 20 | ∞ | 0 | 7 | 5 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

$$k = 2$$

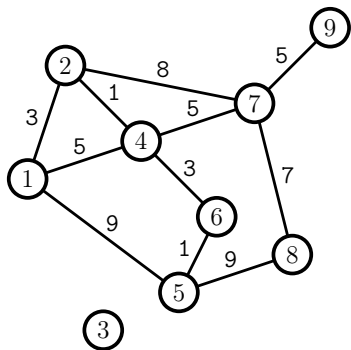
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 9 | ∞ | 11 | ∞ | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 12 | ∞ | 8 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 13 | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | 9 | 12 | ∞ | 13 | 0 | 1 | 20 | 9 | ∞ |
| 6 | ∞ | ∞ | ∞ | 3 | 1 | 0 | ∞ | ∞ | ∞ |
| 7 | 11 | 8 | ∞ | 5 | 20 | ∞ | 0 | 7 | 5 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

$$k = 3$$

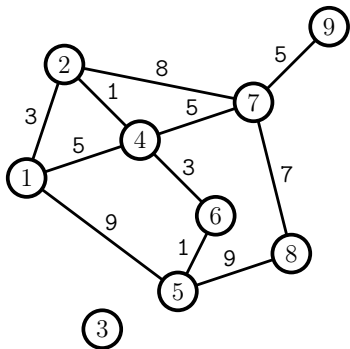
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 9 | 7 | 9 | ∞ | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 12 | 4 | 6 | ∞ | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 13 | 3 | 5 | ∞ | ∞ |
| 5 | 9 | 12 | ∞ | 13 | 0 | 1 | 18 | 9 | ∞ |
| 6 | 7 | 4 | ∞ | 3 | 1 | 0 | 8 | ∞ | ∞ |
| 7 | 9 | 6 | ∞ | 5 | 18 | 8 | 0 | 7 | 5 |
| 8 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 9 | ∞ | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

$$k = 4$$

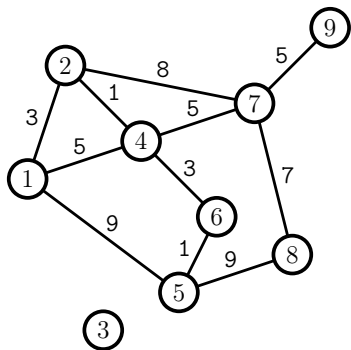
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 9 | 7 | 9 | 18 | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 12 | 4 | 6 | 21 | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 13 | 3 | 5 | 22 | ∞ |
| 5 | 9 | 12 | ∞ | 13 | 0 | 1 | 18 | 9 | ∞ |
| 6 | 7 | 4 | ∞ | 3 | 1 | 0 | 8 | 10 | ∞ |
| 7 | 9 | 6 | ∞ | 5 | 18 | 8 | 0 | 7 | 5 |
| 8 | 18 | 21 | ∞ | 22 | 9 | 10 | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

$$k = 5$$

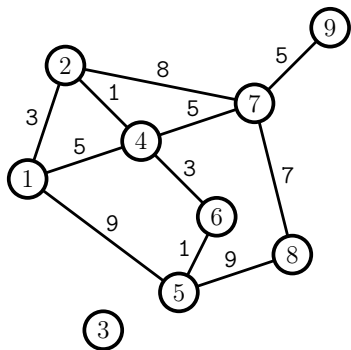
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 8 | 7 | 9 | 17 | ∞ |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 5 | 4 | 6 | 14 | ∞ |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 4 | 3 | 5 | 13 | ∞ |
| 5 | 8 | 5 | ∞ | 4 | 0 | 1 | 9 | 9 | ∞ |
| 6 | 7 | 4 | ∞ | 3 | 1 | 0 | 8 | 10 | ∞ |
| 7 | 9 | 6 | ∞ | 5 | 9 | 8 | 0 | 7 | 5 |
| 8 | 17 | 14 | ∞ | 13 | 9 | 10 | 7 | 0 | ∞ |
| 9 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | 5 | ∞ | 0 |

$$k = 6$$

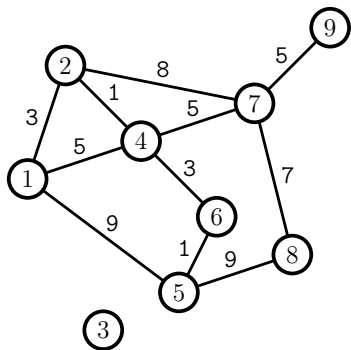
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 8 | 7 | 9 | 16 | 14 |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 5 | 4 | 6 | 13 | 11 |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 4 | 3 | 5 | 12 | 10 |
| 5 | 8 | 5 | ∞ | 4 | 0 | 1 | 9 | 9 | 14 |
| 6 | 7 | 4 | ∞ | 3 | 1 | 0 | 8 | 10 | 13 |
| 7 | 9 | 6 | ∞ | 5 | 9 | 8 | 0 | 7 | 5 |
| 8 | 16 | 13 | ∞ | 12 | 9 | 10 | 7 | 0 | 12 |
| 9 | 14 | 11 | ∞ | 10 | 14 | 13 | 5 | 12 | 0 |

$$k = 7$$

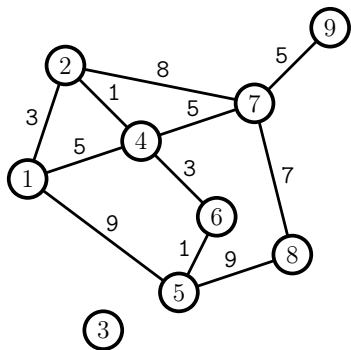
Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 8 | 7 | 9 | 16 | 14 |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 5 | 4 | 6 | 13 | 11 |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 4 | 3 | 5 | 12 | 10 |
| 5 | 8 | 5 | ∞ | 4 | 0 | 1 | 9 | 9 | 14 |
| 6 | 7 | 4 | ∞ | 3 | 1 | 0 | 8 | 10 | 13 |
| 7 | 9 | 6 | ∞ | 5 | 9 | 8 | 0 | 7 | 5 |
| 8 | 16 | 13 | ∞ | 12 | 9 | 10 | 7 | 0 | 12 |
| 9 | 14 | 11 | ∞ | 10 | 14 | 13 | 5 | 12 | 0 |

$$k = 8$$

Алгоритм Флойда–Уоршола: пример



| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0 | 3 | ∞ | 4 | 8 | 7 | 9 | 16 | 14 |
| 2 | 3 | 0 | ∞ | 1 | 5 | 4 | 6 | 13 | 11 |
| 3 | ∞ | ∞ | 0 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 4 | 4 | 1 | ∞ | 0 | 4 | 3 | 5 | 12 | 10 |
| 5 | 8 | 5 | ∞ | 4 | 0 | 1 | 9 | 9 | 14 |
| 6 | 7 | 4 | ∞ | 3 | 1 | 0 | 8 | 10 | 13 |
| 7 | 9 | 6 | ∞ | 5 | 9 | 8 | 0 | 7 | 5 |
| 8 | 16 | 13 | ∞ | 12 | 9 | 10 | 7 | 0 | 12 |
| 9 | 14 | 11 | ∞ | 10 | 14 | 13 | 5 | 12 | 0 |

$$k = 9$$

Алгоритм Флойда–Уоршола: доказательство

- Как доказать, что в получившейся матрице клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v ?

Алгоритм Флойда–Уоршола: доказательство

- Как доказать, что в получившейся матрице клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v ?
- Индукция по k :
- После k итераций клетка (u, v) содержит кратчайший путь из тех, в которых промежуточные вершины имеют номера от 1 до k .

Алгоритм Флойда–Уоршола: доказательство

- Как доказать, что в получившейся матрице клетка (u, v) содержит длину кратчайшего пути из u в v ?
- Индукция по k :
- После k итераций клетка (u, v) содержит кратчайший путь из тех, в которых промежуточные вершины имеют номера от 1 до k .
 - База: $k = 0$, в матрице ребро, промежуточных вершин нет.
 - Предположение: после $k - 1$ итерации утверждение верно.
 - Переход: кратчайший путь с вершинами $1, 2, \dots, k$ содержит k не более одного раза.
 - Если не содержит k , он уже найден.
 - Если содержит k , он найдётся как $A_{u,k} + A_{k,v}$, ведь эти части пути состоят из вершин с номерами строго меньше k .

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память:
- Время:
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время:
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

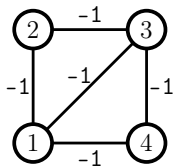
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины:

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины:

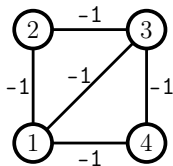


| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----|----------|----|----------|
| 1 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | 0 | -1 | ∞ |
| 3 | -1 | -1 | 0 | -1 |
| 4 | -1 | ∞ | -1 | 0 |

$$k = 0$$

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины:

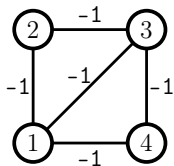


| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----|----|----|----|
| 1 | 0 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | -2 | -2 | -2 |
| 3 | -1 | -2 | -2 | -2 |
| 4 | -1 | -2 | -2 | -2 |

$$k = 1$$

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины:

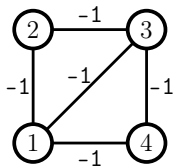


| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----|----|-----|-----|
| 1 | -2 | -3 | -5 | -5 |
| 2 | -3 | -4 | -6 | -6 |
| 3 | -5 | -6 | -12 | -12 |
| 4 | -5 | -6 | -12 | -12 |

$$k = 2$$

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины:

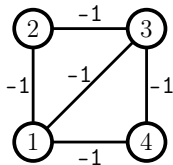


| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 1 | -10 | -11 | -17 | -29 |
| 2 | -11 | -12 | -18 | -30 |
| 3 | -17 | -18 | -24 | -36 |
| 4 | -29 | -30 | -36 | -72 |

$$k = 3$$

Алгоритм Флойда–Уоршола: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n^2)$ (можно переиспользовать матрицу смежности).
- Время: $\Theta(n^3)$.
- Находит кратчайшие пути между всеми парами вершин.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины:



| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|-----|-----|-----|-----|
| 1 | -58 | -59 | -65 | 101 |
| 2 | -59 | -60 | -66 | 102 |
| 3 | -65 | -66 | -72 | 108 |
| 4 | 101 | 102 | 108 | 144 |

$$k = 4$$

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Алгоритм Беллмана–Форда: идея

- Будем для каждой вершины v считать $d(v)$: кратчайшее расстояние от $start$ до v .
- Начнём с $d(start) = 0$ и $d(v \neq start) = \infty$.

Алгоритм Беллмана–Форда: идея

- Будем для каждой вершины v считать $d(v)$: кратчайшее расстояние от $start$ до v .
- Начнём с $d(start) = 0$ и $d(v \neq start) = \infty$.
- Сделаем $n - 1$ одинаковых шагов:
 - Рассмотрим каждое ребро (дугу) (u, v) веса w .
 - Релаксируем его: $d(v) := \min(d(v), d(u) + w)$.

Алгоритм Беллмана–Форда: идея

- Будем для каждой вершины v считать $d(v)$: кратчайшее расстояние от $start$ до v .
- Начнём с $d(start) = 0$ и $d(v \neq start) = \infty$.
- Сделаем $n - 1$ одинаковых шагов:
 - Рассмотрим каждое ребро (дугу) (u, v) веса w .
 - Релаксируем его: $d(v) := \min(d(v), d(u) + w)$.
- После этого в d посчитаны кратчайшие расстояния.

Алгоритм Беллмана–Форда: код

```
1     vector <int> d (n, infinity);
2
3     d[0] = 0;
4     for (int k = 0; k < n - 1; k++) {
5         for (int u = 0; u < n; u++)
6             for (auto e : adj[u])
7                 if (d[e.v] > d[u] + e.w)
8                     d[e.v] = d[u] + e.w;
9     }
10
11
12
13     int y = n - 1;
14     cout << d[y] << endl;
```

ВВОД:

```
9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9
```

ВЫВОД:

14

Алгоритм Беллмана–Форда: код

```

1     vector <int> d (n, infinity);
2     vector <int> p (n, infinity);
3     d[0] = 0;
4     for (int k = 0; k < n - 1; k++) {
5         for (int u = 0; u < n; u++)
6             for (auto e : adj[u])
7                 if (d[e.v] > d[u] + e.w) {
8                     d[e.v] = d[u] + e.w;
9                     p[e.v] = u;
10                }
11    }
12
13    int x = 0, y = n - 1;
14    cout << d[y] << endl;
15    vector <int> path;
16    while (x != y) {
17        y = p[y];
18        path.push_back (y + 1);
19    }
20    copy (path.rbegin (), path.rend (),
21          ostream_iterator <int> (cout, " "));
22    cout << n << endl;

```

ВВОД:

```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

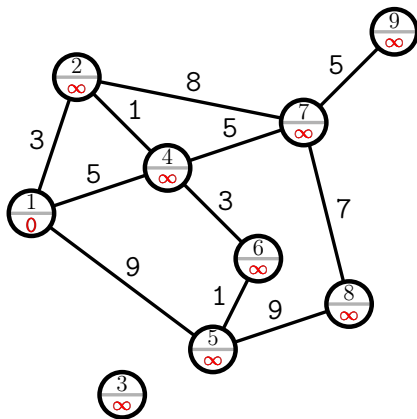
ВЫВОД:

```

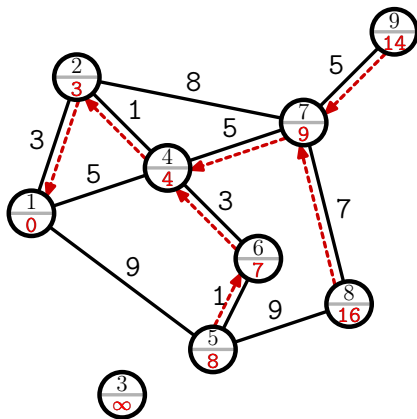
14
1 2 4 7 9

```

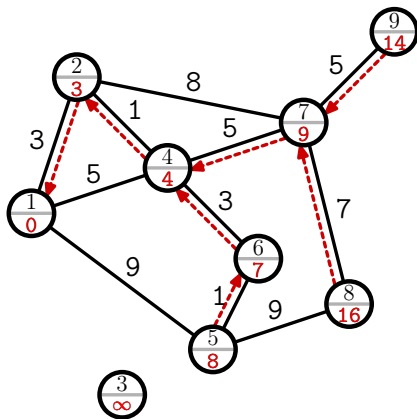
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1

 $k = 0$

Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1

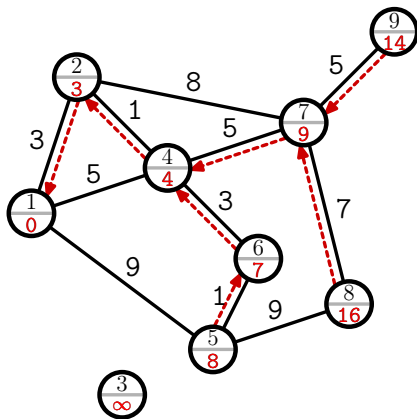
 $k = 1$

Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1

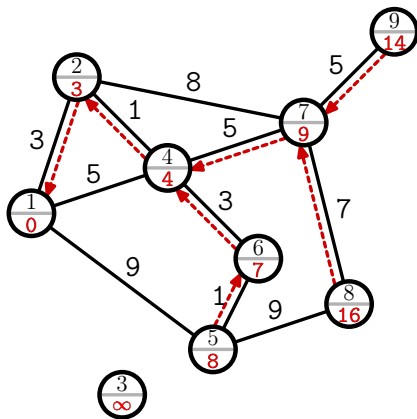


$$k = 2$$

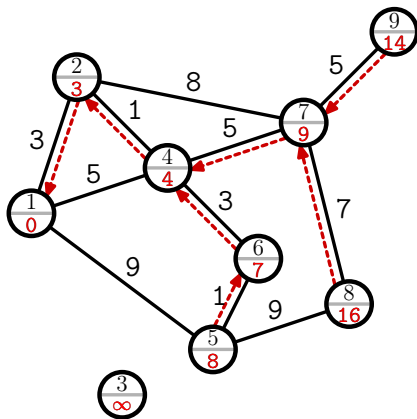
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1


 $k = 3$

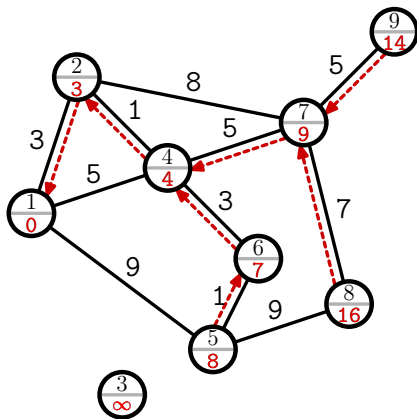
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1


 $k = 4$

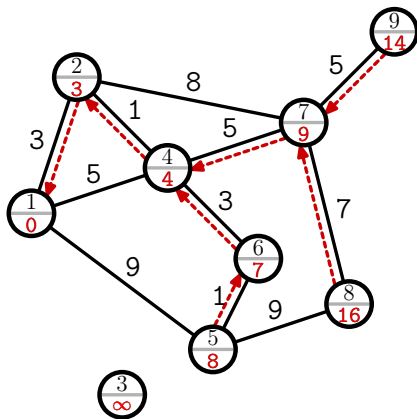
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1


 $k = 5$

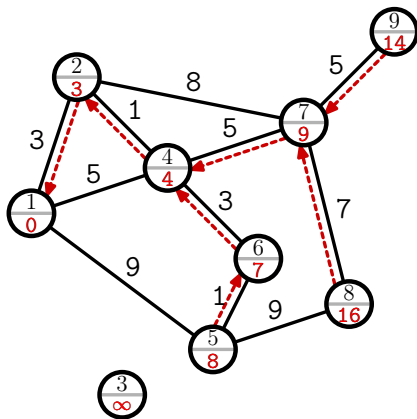
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1


 $k = 6$

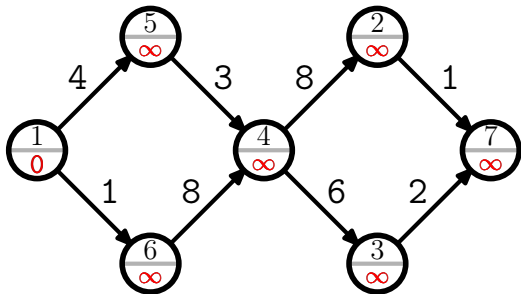
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1


 $k = 7$

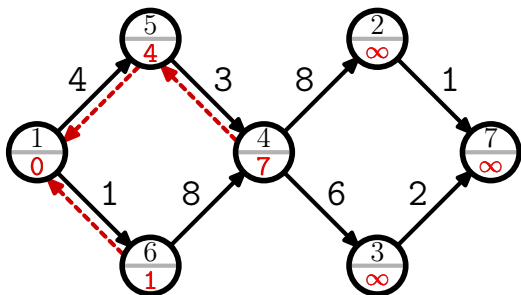
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 1

 $k = 8$

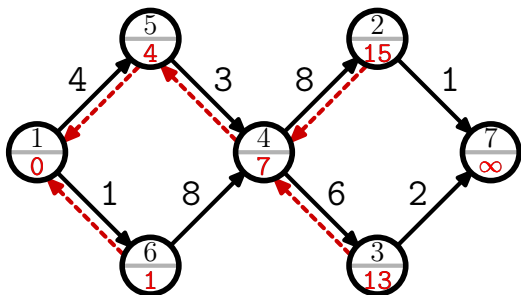
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2

 $k = 0$

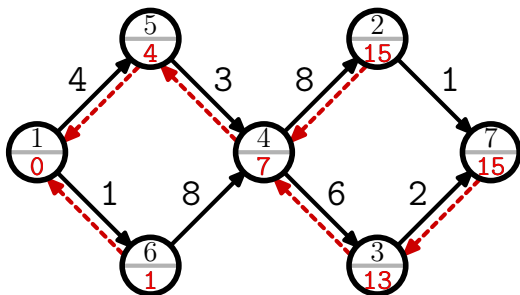
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2


 $k = 1$

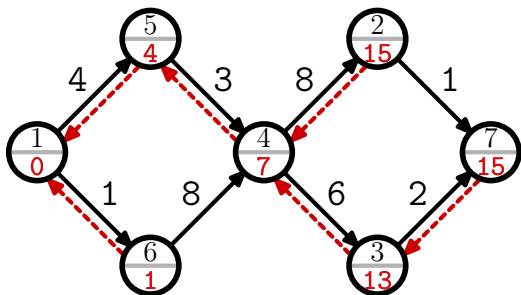
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2


 $k = 2$

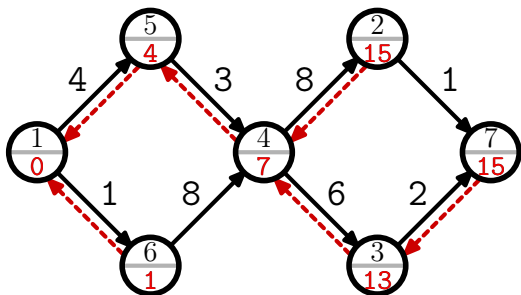
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2


 $k = 3$

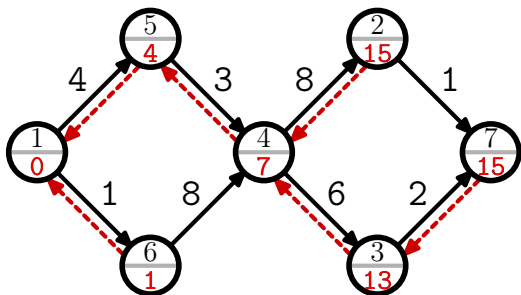
Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2

 $k = 4$

Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2


 $k = 5$

Алгоритм Беллмана–Форда: пример 2


 $k = 6$

Алгоритм Беллмана–Форда: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа – кратчайшие расстояния?

Алгоритм Беллмана–Форда: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа – кратчайшие расстояния?
- Индукция по k :
- После k итераций найдены все кратчайшие пути, состоящие не более чем из k рёбер.

Алгоритм Беллмана–Форда: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа – кратчайшие расстояния?
- Индукция по k :
- После k итераций найдены все кратчайшие пути, состоящие не более чем из k рёбер.
 - База: $k = 0$, найден только пустой путь.
 - Предположение: после $k - 1$ итерации утверждение верно.
 - Переход: пусть кратчайший путь до какой-то вершины v состоит из k рёбер.
 - Тогда этот же путь, но до предпоследней вершины $p(v)$, тоже кратчайший, и состоит из $k - 1$ ребра.
 - Значит, путь до $p(v)$ найден на предыдущем шаге.
 - И при релаксации ребра $(p(v), v)$ мы найдём путь до v .

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память:
- Время:
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время:
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

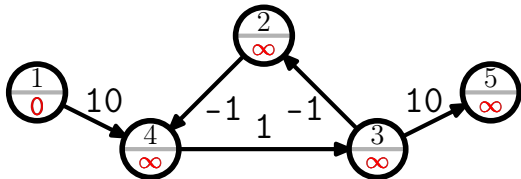
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

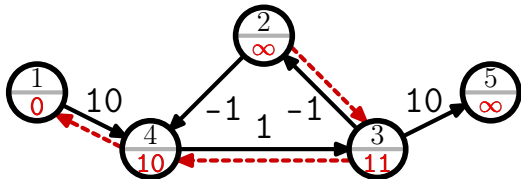
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 0$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

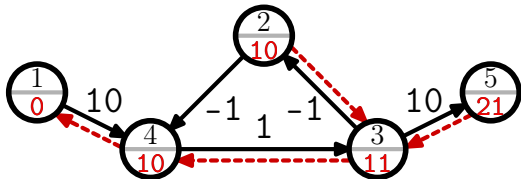
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 1$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

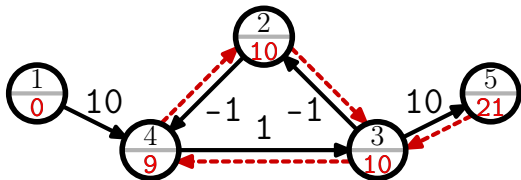
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 2$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

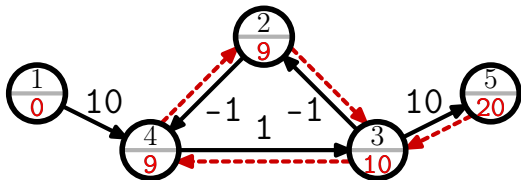
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 3$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

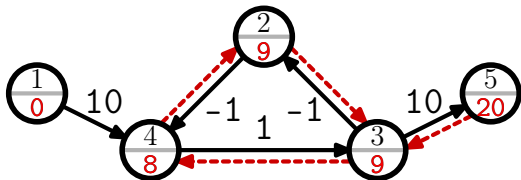
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 4$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

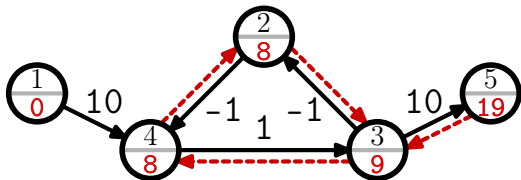
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 5$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

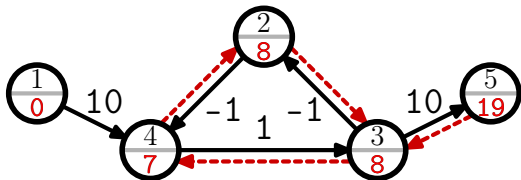
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 6$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

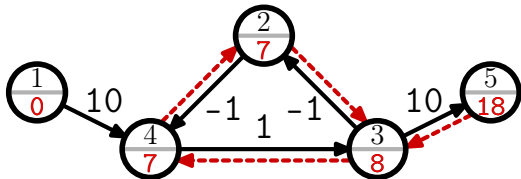
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 7$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...



$$k = 8$$

Алгоритм Беллмана–Форда: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $\Theta(mn)$.
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть циклы отрицательной длины...
- Но помогает их обнаружить, если сделать ещё итерацию!

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Алгоритм Дейкстры: идея

- Будем для каждой вершины v считать $d(v)$: кратчайшее расстояние от $start$ до v .
- Также будем строить дерево кратчайших путей.
- Начнём с $d(start) = 0$ и $d(v \neq start) = \infty$.
- А в дерево изначально добавим одну вершину $start$.

Алгоритм Дейкстры: идея

- Будем для каждой вершины v считать $d(v)$: кратчайшее расстояние от $start$ до v .
- Также будем строить дерево кратчайших путей.
- Начнём с $d(start) = 0$ и $d(v \neq start) = \infty$.
- А в дерево изначально добавим одну вершину $start$.
- Сделаем не более $n - 1$ следующих шагов:
 - Из только что добавленной вершины u рассмотрим каждую дугу (u, v) веса w и релаксируем её:
 $d(v) := \min(d(v), d(u) + w)$.
 - Из всех вершин вне дерева выберем для добавления ту, расстояние до которой минимально.
 - Если таких вершин не осталось, завершим работу.

Алгоритм Дейкстры: идея

- Будем для каждой вершины v считать $d(v)$: кратчайшее расстояние от $start$ до v .
- Также будем строить дерево кратчайших путей.
- Начнём с $d(start) = 0$ и $d(v \neq start) = \infty$.
- А в дерево изначально добавим одну вершину $start$.
- Сделаем не более $n - 1$ следующих шагов:
 - Из только что добавленной вершины u рассмотрим каждую дугу (u, v) веса w и релаксируем её:
 $d(v) := \min(d(v), d(u) + w)$.
 - Из всех вершин вне дерева выберем для добавления ту, расстояние до которой минимально.
 - Если таких вершин не осталось, завершим работу.
- После этого в d посчитаны кратчайшие расстояния, а в дерево добавлены все достижимые вершины.

Алгоритм Дейкстры: код

```
1     vector <int> d (n, infinity);
2
3     vector <bool> vis (n);
4     int u = 0;
5     d[u] = 0;
6     while (u != -1) {
7         vis[u] = true;
8         for (auto e : adj[u])
9             if (d[e.v] > d[u] + e.w)
10                d[e.v] = d[u] + e.w;
11
12         u = -1;
13         for (int v = 0; v < n; v++)
14             if (!vis[v])
15                 if (u == -1 || d[u] > d[v])
16                     u = v;
17     }
18
19
20     int y = n - 1;
21     cout << d[y] << endl;
```

ВВОД:

```
9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9
```

ВЫВОД:

14

Алгоритм Дейкстры: код

```

1     vector <int> d (n, infinity);
2     vector <int> p (n, infinity);
3     vector <bool> vis (n);
4     int u = 0;
5     d[u] = 0;
6     while (u != -1) {
7         vis[u] = true;
8         for (auto e : adj[u])
9             if (d[e.v] > d[u] + e.w) {
10                d[e.v] = d[u] + e.w;
11                p[e.v] = u;
12            }
13        u = -1;
14        for (int v = 0; v < n; v++)
15            if (!vis[v])
16                if (u == -1 || d[u] > d[v])
17                    u = v;
18    }
19
20    int x = 0, y = n - 1;
21    cout << d[y] << endl;
22    /* ... */

```

ВВОД:

```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

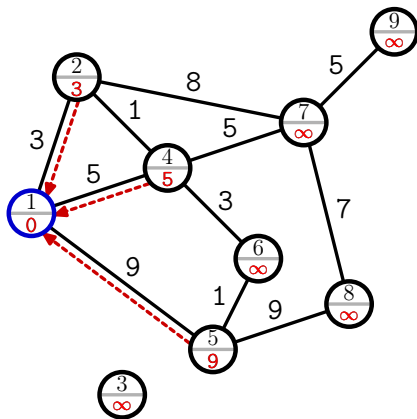
ВЫВОД:

```

14
1 2 4 7 9

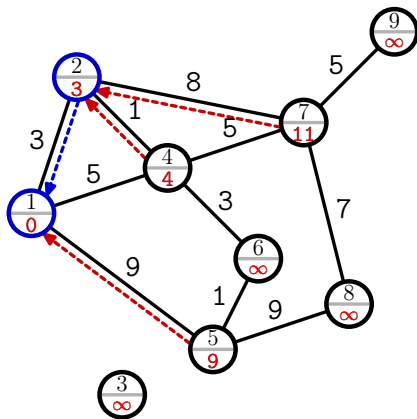
```

Алгоритм Дейкстры: пример



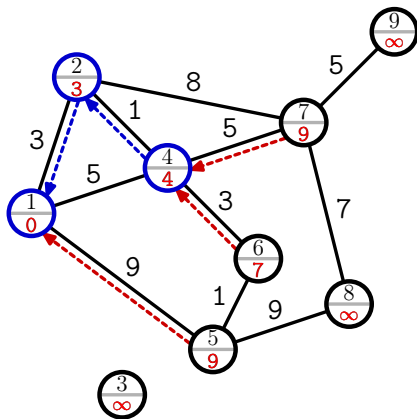
step 1

Алгоритм Дейкстры: пример



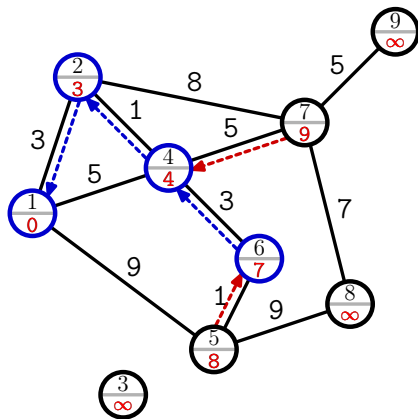
step 2

Алгоритм Дейкстры: пример



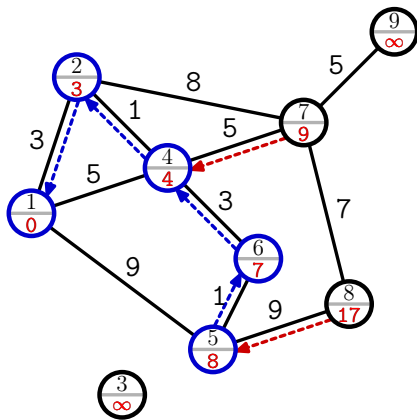
step 3

Алгоритм Дейкстры: пример



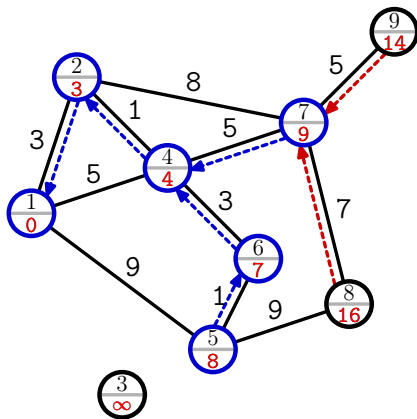
step 4

Алгоритм Дейкстры: пример



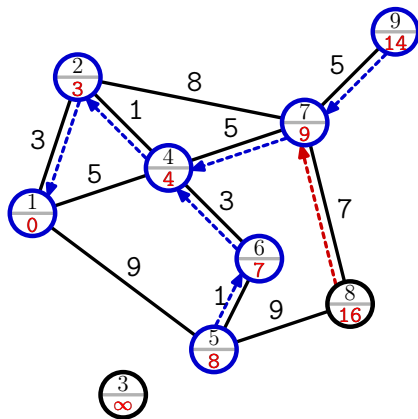
step 5

Алгоритм Дейкстры: пример



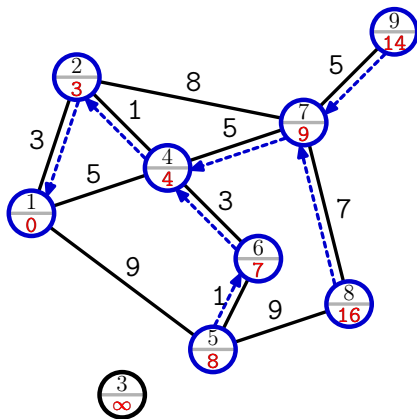
step 6

Алгоритм Дейкстры: пример



step 7

Алгоритм Дейкстры: пример



step 8

Алгоритм Дейкстры: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа — кратчайшие расстояния?
- Алгоритму нужно, чтобы рёбра были неотрицательны.

Алгоритм Дейкстры: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа — кратчайшие расстояния?
- Алгоритму нужно, чтобы рёбра были неотрицательны.
- На каждом шаге мы добавляем в дерево кратчайших путей ближайшую к старту вершину из оставшихся.
- От противного: пусть расстояние до этой вершины равно x , и предположим, что мы потом сможем найти до этой вершины более короткий путь p .

Алгоритм Дейкстры: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа — кратчайшие расстояния?
- Алгоритму нужно, чтобы рёбра были неотрицательны.
- На каждом шаге мы добавляем в дерево кратчайших путей ближайшую к старту вершину из оставшихся.
- От противного: пусть расстояние до этой вершины равно x , и предположим, что мы потом сможем найти до этой вершины более короткий путь p .
- Рассмотрим дерево на этом шаге.
- Путь p когда-то выходит из этого дерева.
- В этот момент длина p не меньше, чем x : ведь это ближайшая из вершин вне дерева.
- Все следующие рёбра в пути p неотрицательны.

Алгоритм Дейкстры: доказательство

- Как доказать, что получившиеся в d числа — кратчайшие расстояния?
- Алгоритму нужно, чтобы рёбра были неотрицательны.
- На каждом шаге мы добавляем в дерево кратчайших путей ближайшую к старту вершину из оставшихся.
- От противного: пусть расстояние до этой вершины равно x , и предположим, что мы потом сможем найти до этой вершины **более короткий путь** p .
- Рассмотрим дерево на этом шаге.
- Путь p когда-то выходит из этого дерева.
- В этот момент длина p не меньше, чем x : ведь это ближайшая из вершин вне дерева.
- Все следующие рёбра в пути p неотрицательны.
- Значит, общая длина p не меньше x — **противоречие!**

Алгоритм Дейкстры: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память:
- Время:
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.

Алгоритм Дейкстры: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время:
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.

Алгоритм Дейкстры: анализ

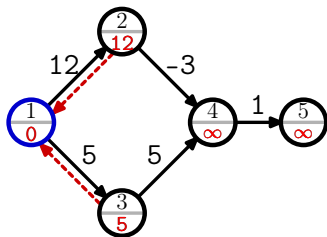
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.

Алгоритм Дейкстры: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.

Алгоритм Дейкстры: анализ

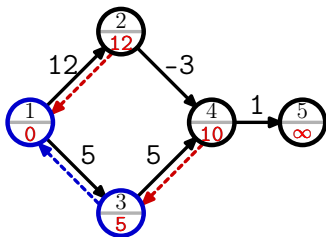
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.



step 1

Алгоритм Дейкстры: анализ

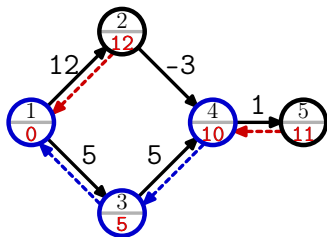
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.



step 2

Алгоритм Дейкстры: анализ

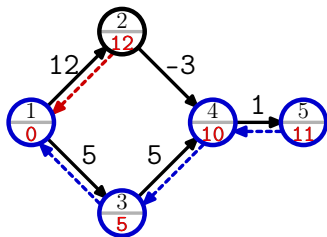
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.



step 3

Алгоритм Дейкстры: анализ

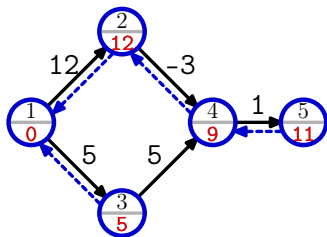
- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.



step 4

Алгоритм Дейкстры: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.



step 5

Алгоритм Дейкстры: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: пока что $O(n^2)$...
- Находит кратчайшие пути из одной вершины во все остальные.
- Не работает, если в графе есть **рёбра** отрицательной длины.
- Давайте ускорим до $O(m \log n)$.

Алгоритм Дейкстры: код 2

```
1     vector <int> d (n, infinity);
2
3     vector <bool> vis (n);
4     int u = 0;
5     d[u] = 0;
6     while (u != -1) {
7         vis[u] = true;
8         for (auto e : adj[u])
9             if (d[e.v] > d[u] + e.w)
10                d[e.v] = d[u] + e.w;
11
12        u = -1;
13        for (int v = 0; v < n; v++)
14            if (!vis[v])
15                if (u == -1 || d[u] > d[v])
16                    u = v;
17
18    }
19
20    int y = n - 1;
21    cout << d[y] << endl;
```

ВВОД:

```
9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9
```

ВЫВОД:

14

Алгоритм Дейкстры: код 2

```
1     vector <int> d (n, infinity);
2     vector <bool> vis (n);
3     set <pair <int, int> > s;
4     int x = 0;
5     d[x] = 0;
6     s.insert ({d[x], x});
7     while (!s.empty ()) {
8         auto u = s.begin () -> second;
9         s.erase (s.begin ());
10        vis[u] = true;
11        for (auto e : adj[u])
12            if (!vis[e.v])
13                if (d[e.v] > d[u] + e.w) {
14                    s.erase ({d[e.v], e.v});
15                    d[e.v] = d[u] + e.w;
16                    s.insert ({d[e.v], e.v});
17                }
18    }
19
20    int y = n - 1;
21    cout << d[y] << endl;
```

ВВОД:

```
9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9
```

ВЫВОД:

14

Алгоритм Дейкстры: код 2

```

1    vector <int> d (n, infinity);
2    vector <bool> vis (n);
3    priority_queue <pair <int, int> > pq;
4    int x = 0;
5    d[x] = 0;
6    pq.push ({-d[x], x});
7    while (!pq.empty ()) {
8        auto u = pq.top ().second;
9        pq.pop ();
10       if (vis[u])
11           continue;
12       vis[u] = true;
13       for (auto e : adj[u])
14           if (!vis[e.v])
15               if (d[e.v] > d[u] + e.w) {
16                   d[e.v] = d[u] + e.w;
17                   pq.push ({-d[e.v], e.v});
18               }
19   }
20
21   int y = n - 1;
22   cout << d[y] << endl;

```

ВВОД:

```

9 11
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
5 6 1
7 8 7
1 5 9

```

ВЫВОД:

14

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 **Минимальное остовное дерево**
 - **Задача**
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Задача

- Дан связный взвешенный граф.
- Мы хотим выбрать некоторые рёбра графа:
 - рёбра должны составлять дерево,
 - это дерево должно содержать все вершины графа,
 - суммарная длина этих рёбер должна быть минимальна.

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Алгоритм Прима: идея

- Будем строить дерево, начиная с одной любой вершины.
- Будем для каждой вершины v вне дерева поддерживать $d(v)$: кратчайшее расстояние от v до какой-либо вершины дерева.
- А также $p(v)$ номер этой вершины дерева.

Алгоритм Прима: идея

- Будем строить дерево, начиная с одной любой вершины.
- Будем для каждой вершины v вне дерева поддерживать $d(v)$: кратчайшее расстояние от v до какой-либо вершины дерева.
- А также $p(v)$ номер этой вершины дерева.
- Сделаем ровно $n - 1$ следующих шагов:
 - Из только что добавленной в дерево вершины u рассмотрим каждое ребро (u, v) веса w и релаксируем её:
 - Если $d(v) > w$, то заменим $d(v)$ на w и $p(v)$ на u .
 - Из всех вершин вне дерева выберем для добавления ту, расстояние до которой минимально.
 - Если таких вершин не осталось, завершим работу.

Алгоритм Прима: идея

- Будем строить дерево, начиная с одной любой вершины.
- Будем для каждой вершины v вне дерева поддерживать $d(v)$: кратчайшее расстояние от v до какой-либо вершины дерева.
- А также $p(v)$ номер этой вершины дерева.
- Сделаем ровно $n - 1$ следующих шагов:
 - Из только что добавленной в дерево вершины u рассмотрим каждое ребро (u, v) веса w и релаксируем её:
 - Если $d(v) > w$, то заменим $d(v)$ на w и $p(v)$ на u .
 - Из всех вершин вне дерева выберем для добавления ту, расстояние до которой минимально.
 - Если таких вершин не осталось, завершим работу.
- Минимальное остовное дерево — это рёбра $(v, p(v))$ для всех v , кроме самой первой вершины.

Алгоритм Прима: код

```
1  vector <int> d (n, infinity);
2
3  vector <bool> vis (n);
4  int u = 0;
5  d[u] = 0;
6  int res = 0;
7  while (u != -1) {
8      res += d[u];
9      vis[u] = true;
10     for (auto e : adj[u])
11         if (d[e.v] > e.w)
12             d[e.v] = e.w;
13     u = -1;
14     for (int v = 0; v < n; v++)
15         if (!vis[v])
16             if (u == -1 || d[u] > d[v])
17                 u = v;
18 }
19 cout << res << endl;
```

Ввод:

```
9 12
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
6 5 1
7 8 7
1 5 9
5 3 2
```

Вывод:

27

Алгоритм Прима: код

```

1  vector <int> d (n, infinity);
2  vector <int> p (n, infinity);
3  vector <bool> vis (n);
4  int u = 0;
5  d[u] = 0;
6  int res = 0;
7  while (u != -1) {
8      if (u != 0)
9          cout << u + 1 << " " <<
10             p[u] + 1 << " " << d[u] << endl;
11     res += d[u];
12     vis[u] = true;
13     for (auto e : adj[u])
14         if (d[e.v] > e.w) {
15             d[e.v] = e.w;
16             p[e.v] = u;
17         }
18     u = -1;
19     for (int v = 0; v < n; v++)
20         if (!vis[v])
21             if (u == -1 || d[u] > d[v])
22                 u = v;
23 }
24 cout << res << endl;

```

Ввод:

```

9 12
1 2 3
1 4 5
2 7 8
2 4 1
4 6 3
4 7 5
5 8 9
7 9 5
6 5 1
7 8 7
1 5 9
5 3 2

```

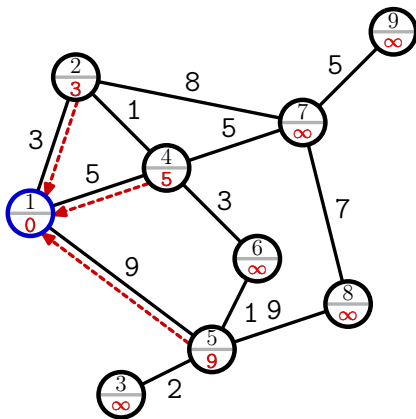
Вывод:

```

2 1 3
4 2 1
6 4 3
5 6 1
3 5 2
7 4 5
9 7 5
8 7 7
27

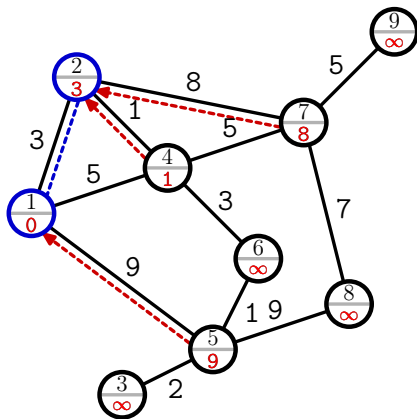
```

Алгоритм Прима: пример



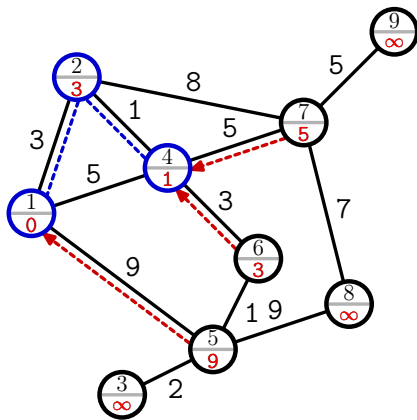
step 1

Алгоритм Прима: пример



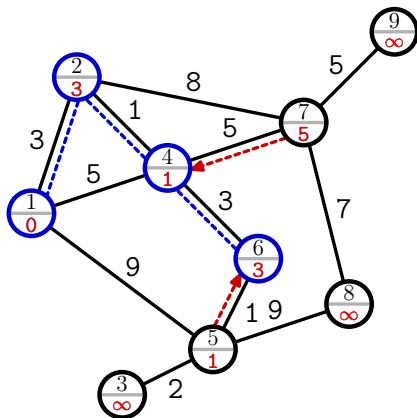
step 2

Алгоритм Прима: пример



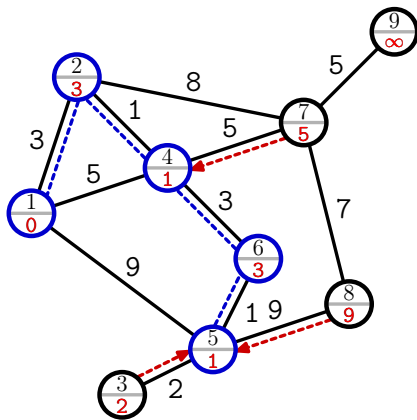
step 3

Алгоритм Прима: пример



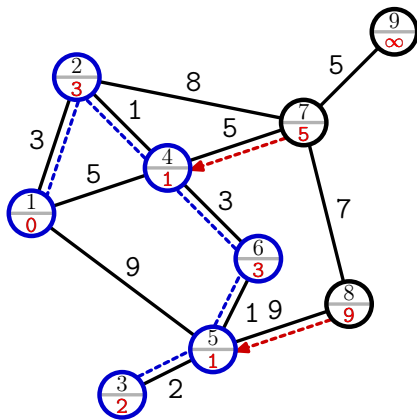
step 4

Алгоритм Прима: пример



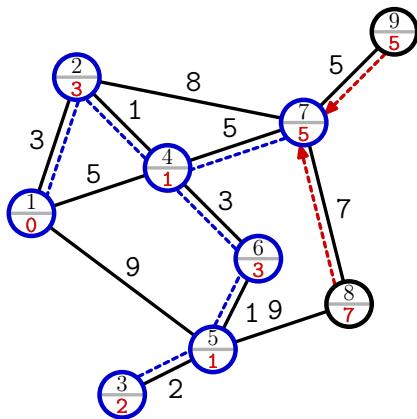
step 5

Алгоритм Прима: пример



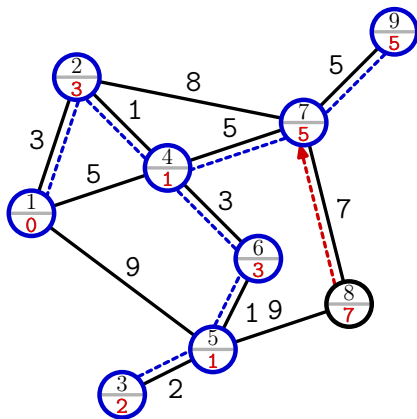
step 6

Алгоритм Прима: пример



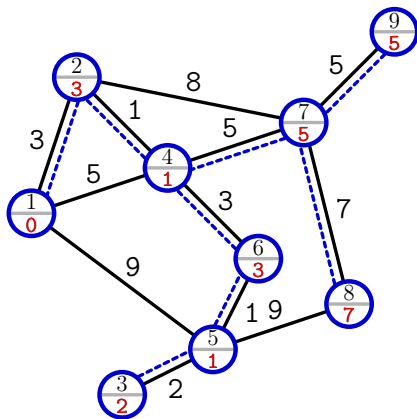
step 7

Алгоритм Прима: пример



step 8

Алгоритм Прима: пример



step 9

Алгоритм Прима: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?

Алгоритм Прима: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?
- Пусть правильный ответ — минимальное дерево T .
- Рассмотрим первый шаг, на котором мы взяли ребро (u, v) , которого нет в T .

Алгоритм Прима: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?
- Пусть правильный ответ — минимальное дерево T .
- Рассмотрим первый шаг, на котором мы взяли ребро (u, v) , которого нет в T .
 - Добавим его к дереву T , получится цикл.
 - Посмотрим на дерево S , которое мы построили к этому моменту.
 - В цикле есть ребро (u, v) , которое пересекает границу S .
 - Значит, в цикле есть другое ребро (u', v') , которое также пересекает границу S .
 - Рассмотрим дерево T с добавленным (u, v) и удалённым (u', v') .
 - Это тоже остовное дерево, и его вес не больше веса T , так как вес (u, v) минимальный среди всех рёбер, пересекающих границу S .

Алгоритм Прима: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?
- Пусть правильный ответ — минимальное дерево T .
- Рассмотрим первый шаг, на котором мы взяли ребро (u, v) , которого нет в T .
 - Добавим его к дереву T , получится цикл.
 - Посмотрим на дерево S , которое мы построили к этому моменту.
 - В цикле есть ребро (u, v) , которое пересекает границу S .
 - Значит, в цикле есть другое ребро (u', v') , которое также пересекает границу S .
 - Рассмотрим дерево T с добавленным (u, v) и удалённым (u', v') .
 - Это тоже остовное дерево, и его вес не больше веса T , так как вес (u, v) минимальный среди всех рёбер, пересекающих границу S .
- Заменяя так рёбра, получаем, что наше дерево не хуже T .

Алгоритм Прима: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память:
- Время:

Алгоритм Прима: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время:

Алгоритм Прима: анализ

- Сколько времени и памяти требуется алгоритму?
- Память: $\Theta(n)$.
- Время: $O(n^2)$, можно ускорить до $O(m \log n)$.

Дейкстра и Прим: сравнение кода

```
1     vector <int> d (n, infinity);
2
3     vector <bool> vis (n);
4     int u = 0;
5     d[u] = 0;
6     while (u != -1) {
7         vis[u] = true;
8         for (auto e : adj[u])
9             if (d[e.v] > d[u] + e.w)
10                d[e.v] = d[u] + e.w;
11
12
13        u = -1;
14        for (int v = 0; v < n; v++)
15            if (!vis[v])
16                if (u == -1 || d[u] > d[v])
17                    u = v;
18    }
19
20    int y = n - 1;
21    cout << d[y] << endl;
```

Дейкстра и Прим: сравнение кода

```
1     vector <int> d (n, infinity);
2
3     vector <bool> vis (n);
4     int u = 0;
5     d[u] = 0;
6     int res = 0;
7     while (u != -1) {
8         res += d[u];
9         vis[u] = true;
10        for (auto e : adj[u])
11            if (d[e.v] > e.w)
12                d[e.v] = e.w;
13        u = -1;
14        for (int v = 0; v < n; v++)
15            if (!vis[v])
16                if (u == -1 || d[u] > d[v])
17                    u = v;
18    }
19    cout << res << endl;
```

Содержание

- 1 Введение
 - Определения
 - Задание графа
 - Хранение графа
 - Код
- 2 Поиск кратчайшего пути
 - Задача
- 3 Алгоритм Флойда–Уоршола
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
- 4 Алгоритм Беллмана–Форда
 - Идея
 - Код
 - Пример 1
 - Пример 2
 - Доказательство
 - Анализ
- 5 Алгоритм Дейкстры
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Код 2
- 6 Минимальное остовное дерево
 - Задача
- 7 Алгоритм Прима
 - Идея
 - Код
 - Пример
 - Доказательство
 - Анализ
 - Сравнение кода
- 8 Алгоритм Краскала
 - Идея
 - Доказательство

Алгоритм Краскала: идея

- Будем строить дерево, начиная с графа из n вершин и 0 рёбер.
- Будем рассматривать рёбра в порядке возрастания веса.
- И будем поддерживать компоненты связности в графе.

Алгоритм Краскала: идея

- Будем строить дерево, начиная с графа из n вершин и 0 рёбер.
- Будем рассматривать рёбра в порядке возрастания веса.
- И будем поддерживать компоненты связности в графе.
- Если очередное ребро соединяет различные компоненты связности, добавим его в дерево и объединим компоненты связности.
- Если очередное ребро соединяет вершины из одной компоненты связности, пропустим это ребро.

Алгоритм Краскала: идея

- Будем строить дерево, начиная с графа из n вершин и 0 рёбер.
- Будем рассматривать рёбра в порядке возрастания веса.
- И будем поддерживать компоненты связности в графе.
- Если очередное ребро соединяет различные компоненты связности, добавим его в дерево и объединим компоненты связности.
- Если очередное ребро соединяет вершины из одной компоненты связности, пропустим это ребро.
- Основная часть кода — система непересекающихся множеств с прошлого занятия.

Алгоритм Краскала: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?

Алгоритм Краскала: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?
- Пусть правильный ответ — минимальное дерево T .
- Рассмотрим первый шаг, на котором мы взяли ребро (u, v) , которого нет в T .

Алгоритм Краскала: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?
- Пусть правильный ответ — минимальное дерево T .
- Рассмотрим первый шаг, на котором мы взяли ребро (u, v) , которого нет в T .
 - Добавим его к дереву T , получится цикл.
 - Поскольку в нашем решении u и v лежат в разных компонентах связности, в этом цикле есть другое ребро (u', v') , которое мы ещё не рассмотрели.
 - Рассмотрим дерево T с добавленным (u, v) и удалённым (u', v') .
 - Это тоже остовное дерево, и его вес не больше веса T , так как вес (u, v) не больше веса любого другого ребра, которое мы рассмотрим позже.

Алгоритм Краскала: доказательство

- Как доказать, что получившееся остовное дерево — минимальное?
- Пусть правильный ответ — минимальное дерево T .
- Рассмотрим первый шаг, на котором мы взяли ребро (u, v) , которого нет в T .
 - Добавим его к дереву T , получится цикл.
 - Поскольку в нашем решении u и v лежат в разных компонентах связности, в этом цикле есть другое ребро (u', v') , которое мы ещё не рассмотрели.
 - Рассмотрим дерево T с добавленным (u, v) и удалённым (u', v') .
 - Это тоже остовное дерево, и его вес не больше веса T , так как вес (u, v) не больше веса любого другого ребра, которое мы рассмотрим позже.
- Заменяя так рёбра, получаем, что наше дерево не хуже T .

Вопросы?

Вопросы?