

Министерство образования и науки РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Курсовая работа
по дисциплине
«Дискретная математика»

Студент группы М8О-108Б-22

Кочкожаров И.В.

Преподаватель

Осипова В.А.

Москва, 2023

1. Определить для орграфа, заданного матрицей смежности $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

а) матрицу односторонней связности;

б) матрицу сильной связности;

в) компоненты сильной связности;

г) матрицу контуров.

Решение.

Изображение графа:

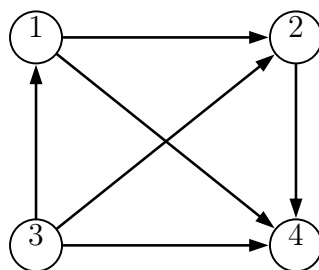


Рис. 1: Граф G

Матрица односторонней связности:

$$A = A(D) = \begin{array}{c|cccc} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \\ \hline v_1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ v_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ v_3 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ v_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}.$$

$$A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$A^3 = A \cdot A^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

$$\begin{aligned} T(D) = E \vee A \vee A^2 \vee A^3 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vee \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vee \\ &\vee \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Матрица двусторонней связности:

$$S(D) = T(D) \& [T(D)]^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \& \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$S(D) = E \Rightarrow$ в графе D нет контуров.

Компоненты сильной связности:

$$S_2(D) = S(D) = \begin{array}{c|c|c|c|c} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 \\ \hline v_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ v_4 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

$$D_1 = (V_1, X_1), V_1 = \{v_1\}$$

$$A(D_1) = \begin{array}{c|c} & v_1 \\ \hline v_1 & 0 \end{array} \quad D_1 : \quad \textcircled{1}$$

$$S_2(D) = \begin{array}{c|c|c|c} & v_2 & v_3 & v_4 \\ \hline v_2 & 1 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 1 & 0 \\ v_4 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

$$D_2 = (V_2, X_2), V_2 = \{v_2\}$$

$$A(D_2) = \begin{array}{c|c} & v_2 \\ \hline v_2 & 0 \end{array} \quad D_2 : \quad \textcircled{2}$$

$$S_3(D) = \begin{array}{c|c|c} & v_3 & v_4 \\ \hline v_3 & 1 & 0 \\ v_4 & 0 & 1 \end{array}$$

$$D_3 = (V_3, X_3), V_3 = \{v_3\}$$

$$A(D_3) = \begin{array}{c|c} & v_3 \\ \hline v_3 & 0 \end{array} \quad D_3 : \quad \textcircled{3}$$

$$S_4(D) = \begin{array}{c|c} & v_4 \\ \hline v_4 & 1 \end{array}$$

$$D_4 = (V_4, X_4), V_4 = \{v_4\}$$

$$A(D_4) = \begin{array}{c|c} & v_4 \\ \hline v_4 & 0 \end{array} \quad D_4 : \quad \textcircled{4}$$

Матрица контуров:

$$K(D) = A(D) \& S(D) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Используя алгоритм Терри, определить замкнутый маршрут, проходящий ровно по два раза (по одному в каждом направлении) через каждое ребро графа.

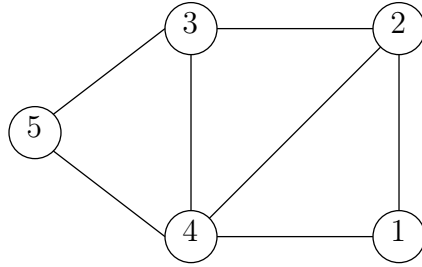


Рис. 2: Граф G

Решение.

Для решения этой задачи действуем в соответствии с алгоритмом Тэрри. Для реализации алгоритма помечаем первые заходящие в вершины ребра крестиками, которые наносим на ребрах ближе к той вершине в которую в первый раз заходим, а также указываем направления прохождения ребер и последовательность прохождения ребер. Алгоритм дает следующий возможный маршрут:

$$v_1 v_2 v_3 v_5 v_4 v_3 v_4 v_2 v_4 v_1 v_4 v_5 v_3 v_2 v_1$$

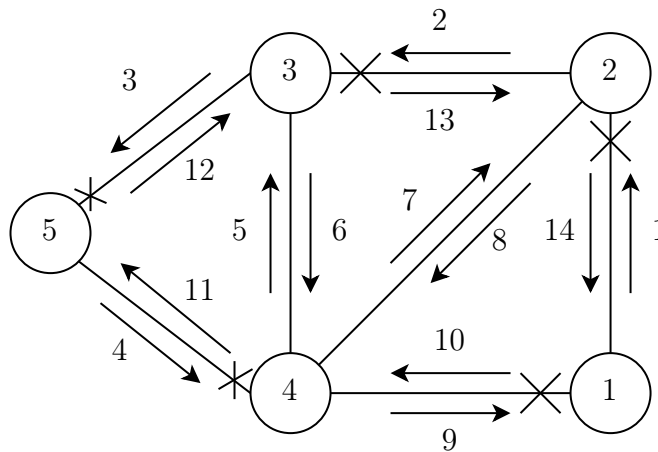


Рис. 3: Визуализация алгоритма Терри

3. Орграф $D = (V, X)$, где $V = \{v_1, \dots, v_{10}\}$ задан матрицей смежности $A(D)$. Найти все минимальные пути v_1 в v_8 .

$$A = A(D) = \begin{array}{c|ccccccccc} & v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 \\ \hline v_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ v_2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ v_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ v_4 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ v_5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ v_6 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_7 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ v_8 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}.$$

Решение.

Действуя согласно алгоритму фронта волны, последовательно определяем:

$$\begin{aligned} FW_0(v_1) &= \{v_1\}, FW_1(v_1) = D(v_1) = \{v_3, v_6\}, \\ FW_2(v_1) &= D(FW_1(v_1)) \setminus (FW_0(v_1) \cup FW_1(v_1)) = D(\{v_3, v_6\}) \setminus \{v_1, v_3, v_6\} = \\ &= \{v_1, v_3, v_4, v_6\} \setminus \{v_1, v_3, v_6\} = \{v_4\} \\ FW_3(v_1) &= D(FW_2(v_1)) \setminus (FW_0(v_1) \cup FW_1(v_1) \cup FW_2(v_1)) = \{v_1, v_2, v_3, v_6\} \setminus \\ &\setminus \{v_1, v_3, v_4, v_6\} = \{v_2\} \\ FW_4(v_1) &= D(FW_3(v_1)) \setminus (FW_0(v_1) \cup FW_1(v_1) \cup FW_2(v_1) \cup FW_3(v_1)) = \\ &= \{v_1, v_3, v_4, v_5, v_6\} \setminus \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_6\} = \{v_5\} \\ FW_5(v_1) &= D(FW_4(v_1)) \setminus (FW_0(v_1) \cup FW_1(v_1) \cup FW_2(v_1) \cup FW_3(v_1) \cup FW_4(v_1)) = \\ &= \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_7, v_8\} \setminus \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\} = \{v_7, v_8\} \end{aligned}$$

Таким образом, $v_8 \in FW_5(v_1)$, а следовательно, согласно алгоритму фронта волны существует минимальный путь в орграфе D из v_1 в v_8 длины 5. Найдём все эти пути.

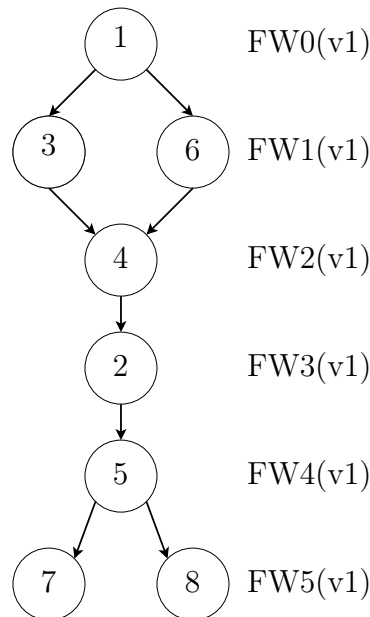


Рис. 4: Граф D'

На рисунке 4 изображен подграф D' орграфа D , на котором последовательно изображены множества $FW_k(v_1), k = 1, 2, 3, 4, 5$, а так же дуги вида (v, v') , где для некоторого $k \in \{0, 1, 2, 3, 4\}, v \in FW_k(v_1), v' \in FW_{k+1}(v_1)$, т.е. исходящие из вершин некоторого k -го фронта волны и заходящие в вершины следующего $(k + 1)$ -го фронта волны.

Используя изображение D' нетрудно выделить все минимальные пути из v_1 в v_8 в орграфе D . При этом, следуя алгоритму фронта волны, находим эти минимальные пути, используя оргграф D' но двигаясь в D' в обратной последовательности (т.е. не из v_1 в v_8 а наоборот, из v_8 в v_1). Используя рисунок 4, получаем, что в любом минимальном пути из v_1 в v_8 соблюдается следующая последовательность вершин. Вершиной, предшествующей вершине v_8 может быть v_5 . Вершиной, предшествующей вершине 5 может быть v_2 . Вершиной, предшествующей вершине v_2 – вершина v_4 . Вершиной, предшествующей вершине v_4 – любая из вершин v_3, v_6 . Вершиной, предшествующей вершинам v_3 и v_6 может быть только v_1 . Этими условиями однозначно определяется множество минимальных путей из v_1 в v_8 которое компактно изображено на рисунке 5. На этом рисунке изображены все вершины, входящие в минимальные пути v_1 в v_8 . Для каждой из промежуточных вершин v показано множество вершин, которые могут ей предшествовать, а также соответствующие дуги (исходящие из вершин, предшествующих v и заходящие в v). Из рисунка 5 видно, что всего существует два минимальных пути из v_1 в v_8 : $v_1v_3v_4v_2v_5v_8, v_1v_6v_4v_2v_5v_8$.

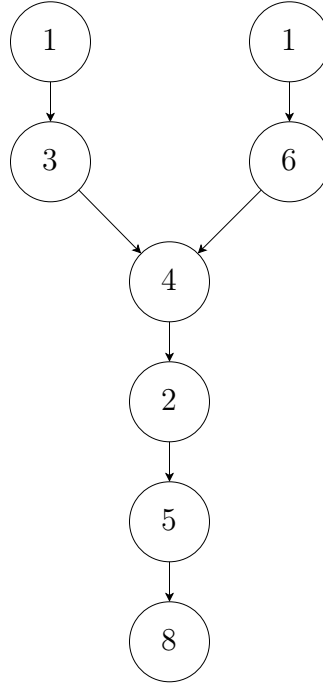


Рис. 5: Граф минимальных путей

4. Нагруженный орграф D задан матрицей длин дуг $C(D)$. Найти минимальные пути из v_1 во все достижимые вершины.

$$C(D) = \begin{pmatrix} \infty & 4 & \infty & \infty & 5 & \infty & \infty & \infty \\ 5 & \infty & 7 & 10 & 2 & \infty & \infty & \infty \\ \infty & \infty & \infty & 2 & \infty & 2 & \infty & \infty \\ 6 & \infty & \infty & \infty & \infty & \infty & 3 & 5 \\ 3 & 2 & \infty & \infty & \infty & 3 & 11 & \infty \\ 4 & \infty & 2 & \infty & \infty & \infty & 7 & \infty \\ 8 & \infty & \infty & 3 & \infty & \infty & \infty & 3 \\ \infty & \infty & \infty & \infty & 17 & \infty & \infty & \infty \end{pmatrix}$$

Решение.

Воспользуемся алгоритмом Форда. Сначала определим таблицу величин $\lambda_i^{(i)}, i = 1, 2, \dots, n - 1$, где $n = 8$

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8		$\lambda^{(0)}$	$\lambda^{(1)}$	$\lambda^{(2)}$	$\lambda^{(3)}$	$\lambda^{(4)}$	$\lambda^{(5)}$	$\lambda^{(6)}$	$\lambda^{(7)}$
v_1	∞	4	∞	∞	5	∞	∞	∞		0	0	0	0	0	0	0	0
v_2	5	∞	7	10	2	∞	∞	∞		∞	4	4	4	4	4	4	4
v_3	∞	∞	∞	2	∞	2	∞	∞		∞	∞	11	10	10	10	10	10
v_4	6	∞	∞	∞	∞	∞	3	5		∞	∞	14	13	12	12	12	12
v_5	3	2	∞	∞	∞	3	11	∞		∞	5	5	5	5	5	5	5
v_6	4	∞	2	∞	∞	∞	7	∞		∞	∞	8	8	8	8	8	8
v_7	8	∞	∞	3	∞	∞	∞	3		∞	∞	16	15	15	15	15	15
v_8	∞	∞	∞	∞	17	∞	∞	∞		∞	∞	∞	19	18	17	17	17

$C(D)$

Таблица величин

Обозначим $\lambda^{(k)} = (\lambda_1^{(k)}, \dots, \lambda_8^{(k)})^T$, где $k = 0, 1, \dots, 7$. Это столбцы в таблице величин. Первая строка по таблице величин состоит из нулевых элементов ($\lambda_1^{(k)} = 0, k = 0, 1, \dots, 7$), а первый столбец заполняем следующим образом: $\lambda_i^{(0)} = \infty, i = 2, \dots, 8$. Далее, используя формулу $\lambda_j^{(k+1)} = \min_{1 \leq i \leq 8} \{\lambda_i^{(k)} + c_{ij}\}$ последовательно определяем элементы столбца $\lambda^{(1)}$, используя элементы столбца $\lambda^{(0)}$ (а так же элементы матрицы $C(D)$), затем находим элементы столбца $\lambda^{(2)}$, используя элементы столбца $\lambda^{(1)}$ и т.д.

Длина минимального пути из v_1 в v_8 равна 17. Вершине v_8 предшествует v_4 , потому что $\lambda_8^{(5)} = 17 = \lambda_4^{(4)} + c_{48} = 12 + 5$. Вершине v_4 предшествует v_3 и т.д. В итоге получаем минимальный путь: $v_1 v_5 v_6 v_3 v_4 v_8$ (в таблице выделен жирным шрифтом). Соответственно, $v_1 v_5 v_6 v_3 v_4$, $v_1 v_5 v_6 v_3$, $v_1 v_5 v_6$, $v_1 v_5$ - минимальные пути из v_1 в соответствующие вершины. Минимальный путь из v_1 в v_7 находится аналогично. Получаем такой минимальный путь: $v_1 v_5 v_6 v_7$. Минимальный путь из v_1 в v_2 , очевидно, $v_1 v_2$.

5. Найти остовное дерево графа G с минимальной суммой длин входящих в него ребер.

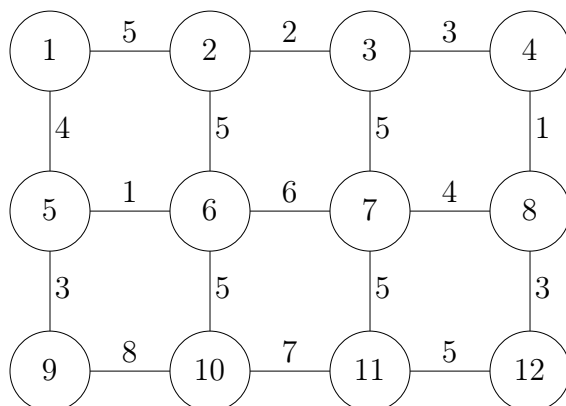


Рис. 6: Граф G

Решение. Согласно алгоритму Краскала выбираем ребро $\{v_5, v_6\}$ минимальной длины 1. Выделяем его жирной линией (см. рис. 7). Далее выбираем ребро минимальной длины, соединяющее либо v_5 либо v_6 с какой-нибудь новой (т.е. отличной от v_1, v_5) вершиной графа G (т.е. выбираем среди ребер $\{v_5, v_1\}, \{v_5, v_9\}, \{v_6, v_2\}, \{v_6, v_7\}, \{v_6, v_{10}\}$). Минимальную длину имеет ребро $\{v_5, v_9\}$. Выделяем его жирной линией (см. рис. 7). Далее выбираем ребро минимальной длины, соединяющее либо v_5 , либо v_6 , либо v_9 с какой-нибудь новой вершиной графа (выбираем между $\{v_9, v_{10}\}, \{v_6, v_{10}\}, \{v_6, v_7\}, \{v_6, v_2\}, \{v_5, v_1\}$). Минимальную длину имеет ребро $\{v_5, v_1\}$. Выделяем его жирной линией (см. рис. 7). Следующим ребром минимальной длины (если таких несколько, можно выбрать любое) среди всех возможных является $\{v_1, v_2\}$, затем $\{v_2, v_3\}$, далее $\{v_3, v_4\}$, далее $\{v_4, v_8\}$, далее $\{v_8, v_{12}\}$, далее $\{v_7, v_8\}$, далее $\{v_7, v_{11}\}$ и, наконец, $\{v_6, v_{10}\}$. Выделено $11 = 12 - 1 = n(G) - 1$ ребер, алгоритм окончен, выделяем минимальное остовное дерево графа (см. на рис. 7 подграф графа G , ребра которого выделены жирными линиями).

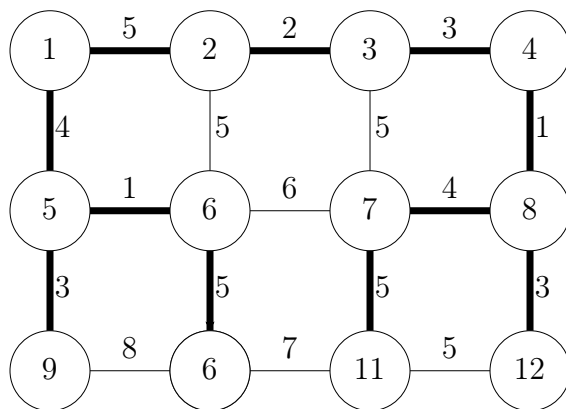


Рис. 7: Граф G с выделенным подграфом - минимальным остовным деревом

6. Пусть каждому ребру неориентированного графа изображенного на рис. 8 соответствует некоторый элемент электрической цепи. Составить линейно незави-

симые системы уравнений Кирхгофа для токов и напряжений. Пусть первому и пятому ребру соответствуют источники тока с ЭДС E_1 и E_2 (полярность выбирается произвольно), а остальные элементы являются сопротивлениями. Используя закон Ома, и, предполагая внутренние сопротивления источников тока равными нулю, получить общую систему уравнений для токов.

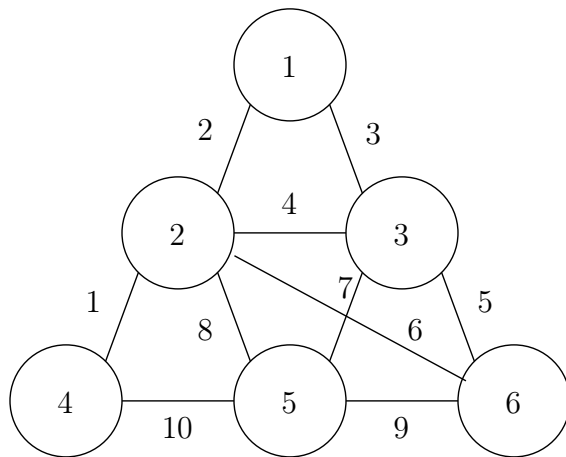


Рис. 8: Граф G

Решение. Выделим произвольным образом остовное дерево графа. Для графа изображенного на рис. 8, одним из возможных остовных деревьев является дерево, изображенное на рис. 9 (пунктирными линиями изображены удаленные из ребра).

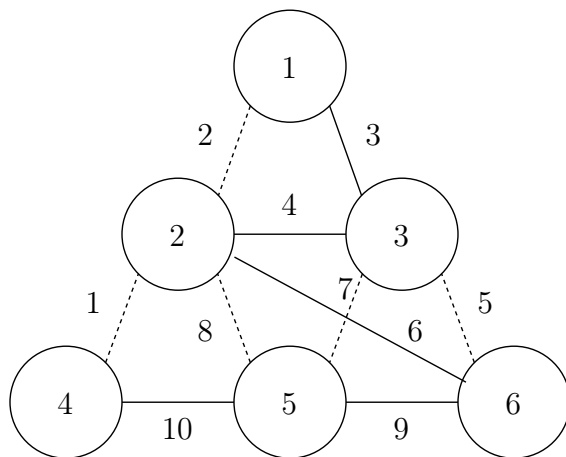


Рис. 9: Остовное дерево графа G

Добавляя любое из ребер, не вошедших в остовное дерево графа G (изображенных на рис. 9 пунктирными линиями), мы получим граф с некоторым простым циклом. Всего в остовное дерево не вошли $v(G) = m(G) - n(G) + 1$ ребер (для графа, изображенного на рис. 8, $v(G) = 10 - 6 + 1 = 5$), а поэтому можем получить таким образом $v(G) = 5$ простых циклов. Эти циклы различны в том смысле что каждый из них проходит через ребро (то самое, которое мы добавляли для выделения

данного цикла), через которое не проходит ни один другой цикл. Они образуют *цикловой базис графа G* .

Для графа, изображенного на рис. 8 в цикловой базис войдут циклы:

$$\mu_1 = \mu_1(x_1) = x_1 x_6 x_9 x_{10}, \mu_2 = \mu_2(x_2) = x_2 x_3 x_4, \mu_3 = \mu_3(x_5) = x_5 x_6 x_4$$

$$\mu_4 = \mu_4(x_7) = x_7 x_9 x_6 x_4, \mu_5 = \mu_5(x_8) = x_8 x_6 x_9$$

Введем произвольную ориентацию на ребрах графа G . В результате каждое ребро x_j превратится в дугу \tilde{x}_j и, соответственно, множество ребер X в множество дуг \tilde{X} , а сам граф $G = (V, X)$ в орграф $D = (V, \tilde{X})$. Для графа G , изображенного на рис. 8, в результате введения ориентации на его ребрах получаем, например, орграф $D = (V, \tilde{X})$, изображенный на рис. 10.

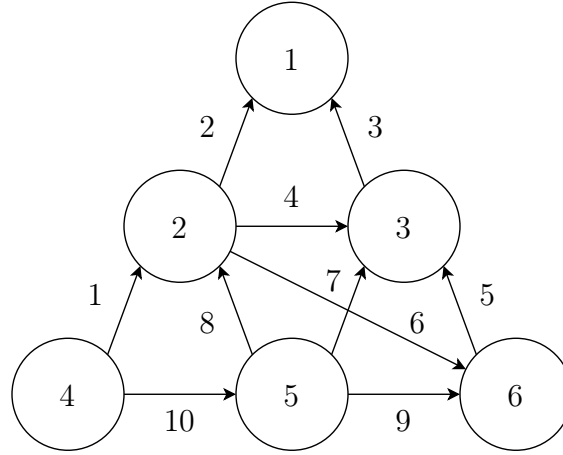


Рис. 10: Орграф D

Для графа G с выделенным ранее цикловым базисом $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5$ и выбранной ориентацией ребер, соответствующей орграфу D , изображенному на рис. 10, цикломатическая матрица имеет вид:

$$C(G) = \begin{array}{c|cccccccccc} & * & * & & & * & & * & * & & \\ & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} \\ \hline \mu_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ \mu_2 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ \mu_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array}$$

При построении циклового базиса графа G мы поочередно добавляли к основному дереву графа G ребра x_1, x_2, x_5, x_7, x_8 . Выделяем соответствующие этим ребрам столбцы в матрице $C(G)$. Из выделенных столбцов составим матрицу и найдем ее определитель.

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \neq 0$$

Ранг матрицы $C(G)$ равен числу строк, т.е. $v(G)$.

Пусть теперь граф G соответствует электрической цепи, где первому и пятому ребру соответствуют E_1 и E_2 (полярность выбирается произвольно), а остальные элементы являются сопротивлениями.

Выберем произвольным образом направления токов в элементах цепи (условные направления; после решения соответствующей системы уравнений знаки при величинах токов покажут истинные направления токов). Пусть эти направления соответствуют выбранной ранее ориентации ребер графа G . Впишем систему уравнений Кирхгофа для напряжений:

$$\mu_1 : -u_1 + u_6 - u_9 - u_{10} = 0$$

$$\mu_2 : u_2 - u_3 - u_4 = 0$$

$$\mu_3 : u_4 - u_5 - u_6 = 0$$

$$\mu_4 : u_4 - u_6 - u_7 + u_9 = 0$$

$$\mu_5 : u_6 + u_8 - u_9 = 0$$

или, с учетом закона Ома, а также того, что $u_1 = E_1, u_5 = E_2$, а номера сопротивлений соответствуют номерам ребер, имеем:

$$\begin{cases} -E_1 + i_6 r_6 - i_9 r_9 - i_{10} r_{10} = 0 \\ i_2 r_2 - i_3 r_3 - i_4 r_4 = 0 \\ i_4 r_4 - E_2 - i_6 r_6 = 0 \\ i_4 r_4 - i_6 r_6 - i_7 r_7 + i_9 r_9 = 0 \\ i_6 r_6 + i_8 r_8 - i_9 r_9 = 0 \end{cases}$$

Система уравнений Кирхгофа для токов имеет вид, где

$$C(G) = \begin{array}{c|cccccccccc} & \tilde{x}_1 & \tilde{x}_2 & \tilde{x}_3 & \tilde{x}_4 & \tilde{x}_5 & \tilde{x}_6 & \tilde{x}_7 & \tilde{x}_8 & \tilde{x}_9 & \tilde{x}_{10} \\ \hline v_1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v_2 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ v_3 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ v_4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ v_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ v_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

При этом для достижения линейной независимости системы уравнений Кирхгофа для токов необходимо исключить из системы любое уравнение, например, второе. В результате система линейно независимых уравнений Кирхгофа для токов имеет вид:

$$\begin{cases} i_2 + i_3 = 0 \\ -i_3 + i_4 + i_5 + i_7 = 0 \\ -i_1 - i_{10} = 0 \\ -i_7 - i_8 - i_9 + i_{10} = 0 \\ -i_5 + i_6 + i_9 = 0 \end{cases}$$

Таким образом, общей системой уравнений для токов является объединение систем. Заметим, что полученная объединенная система уравнений состоит из девяти уравнений относительно девяти неизвестных i_1, i_2, \dots, i_{10} : после нахождения которых нетрудно определить u_1, u_2, \dots, u_{10} .

7. Построить максимальный поток по транспортной сети.

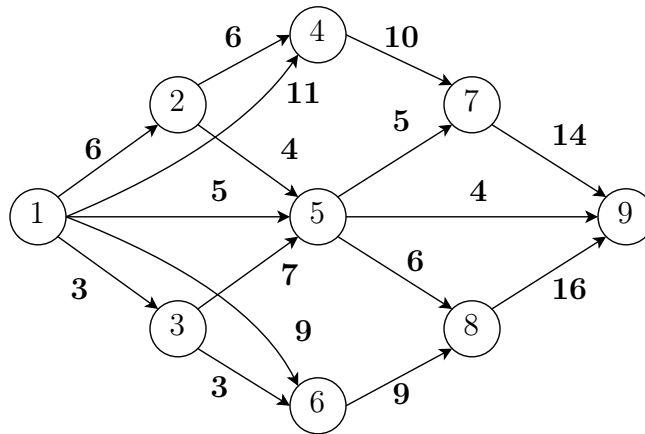


Рис. 11: Граф транспортной сети D

Решение. Начинаем с нулевого потока ϕ_0 . Каждой новой цепи из v_1 в $v_n = v_9$ будем ставить в соответствие ее очередной номер, т.е. будем обозначать эти цепи через η_1, η_2 и т.д. Соответственно, после нахождения цепи η_1 поток ϕ_0 изменится на поток ϕ_1 . После нахождения цепи η_2 поток ϕ_1 изменится на ϕ_2 и т.д. Числа, на которые увеличиваем потоки по дугам из η_i обозначаем через α_i . Насыщенные дуги при изображении транспортной сети D с очередным потоком ϕ_i помечаем символом \times . На рис. 12 приведены изображения орграфа D с потоком ϕ_0 , а так же вспомогательного орграфа D' , который на этом этапе совпадает с D .

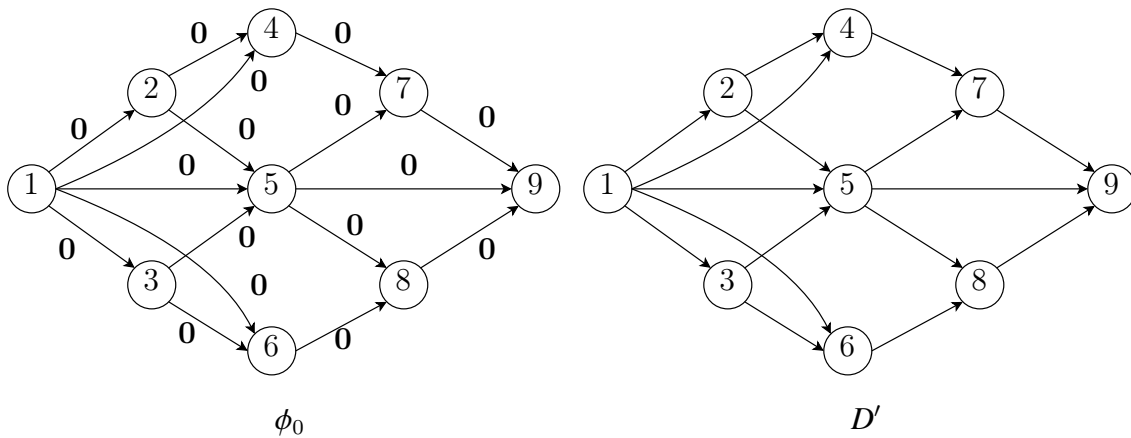


Рис. 12

Выделяем в D' простую цепь $\eta_1 = v_1 v_2 v_4 v_7 v_9$ из v_1 в v_9 . Увеличиваем поток $\phi(x)$ по каждой дуге x из η_1 на одинаковую величину $\alpha_1 = 6$ до насыщения дуг $(v_1 v_2)$ и $(v_2 v_4)$. На рис. 13 приведены изображения орграфа D с потоком ϕ_1 , а также соответствующего этому потоку вспомогательного орграфа D' .

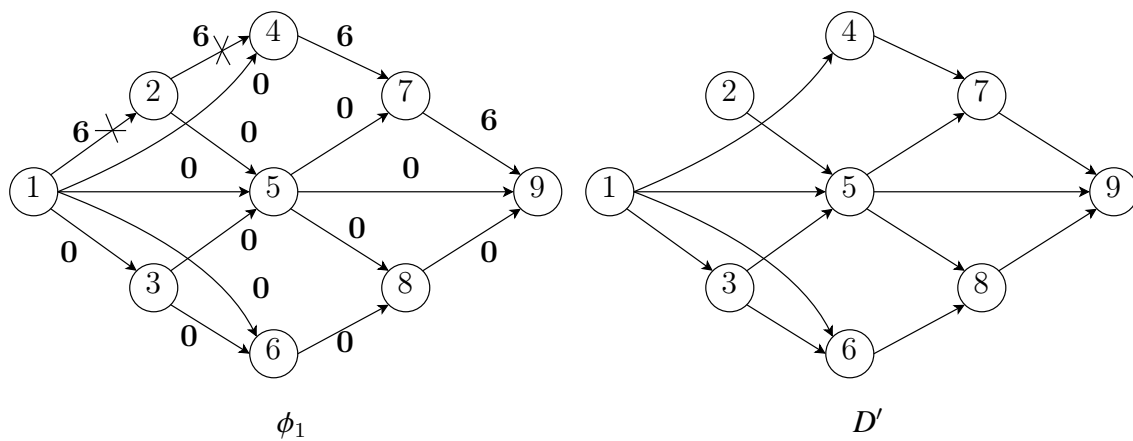


Рис. 13

Продолжаем выделять произвольные простые цепи и максимально увеличивать поток на них, а затем удалять насыщенные дуги, пока сток перестанет быть доступным из истока.

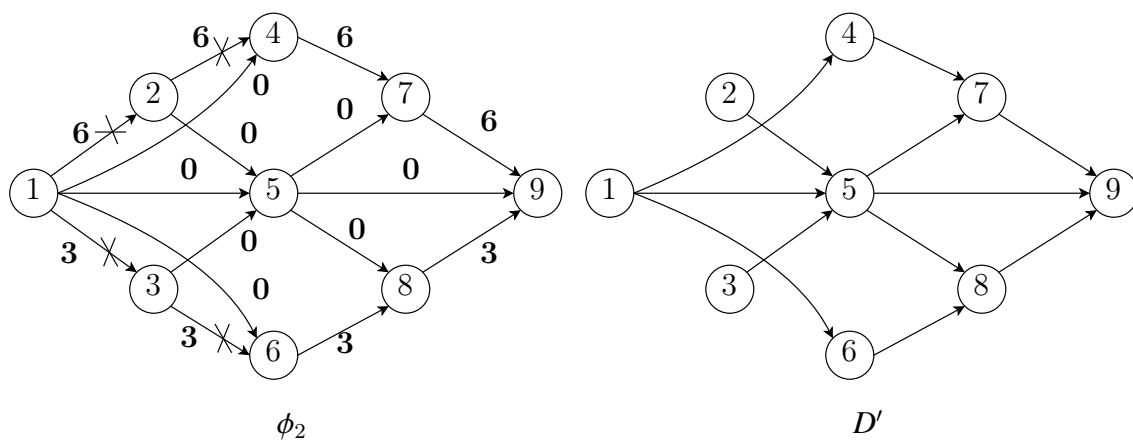


Рис. 14

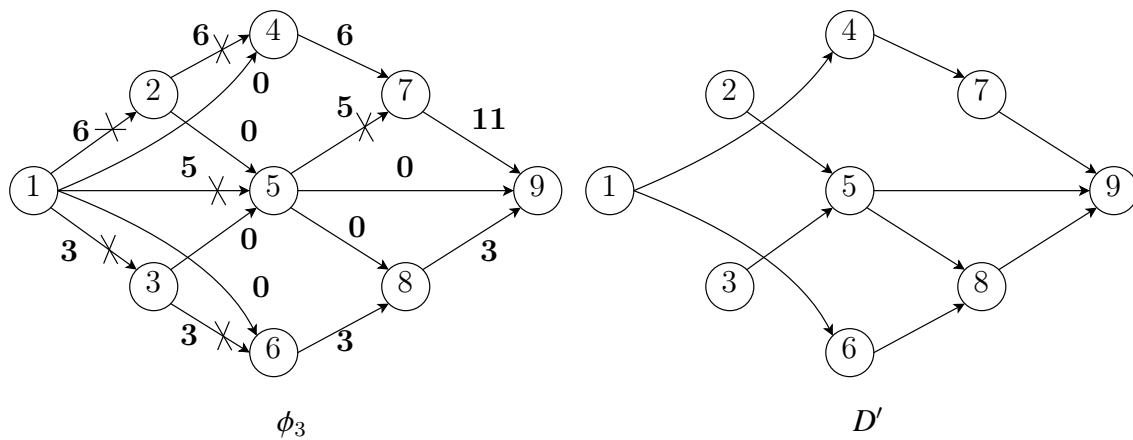


Рис. 15

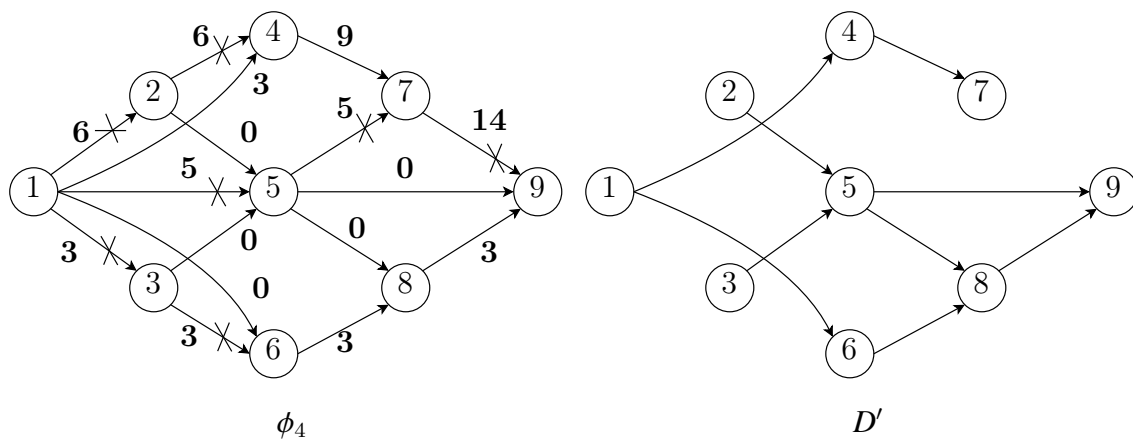


Рис. 16

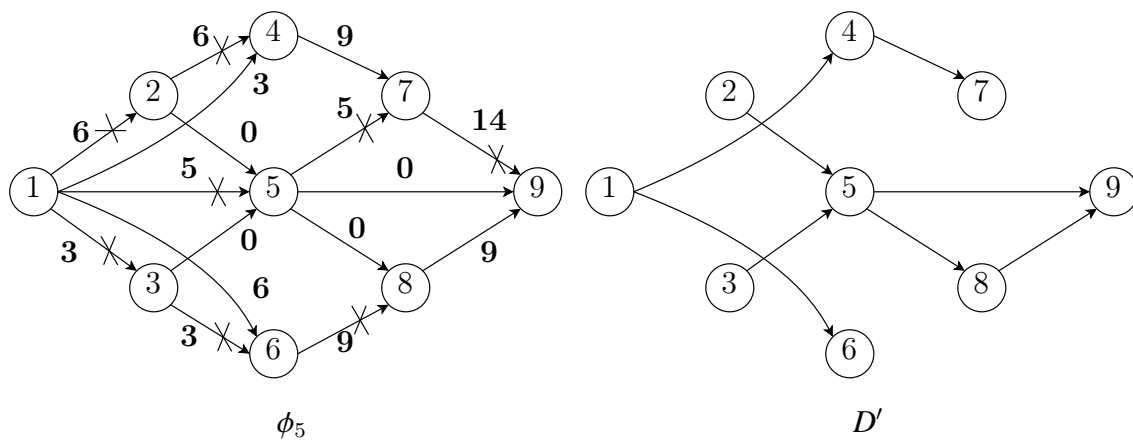


Рис. 17: Орграф приращений $I(D, \phi)$ и модифицированный орграф

Мы видим, что для орграфа D' , соответствующего потоку ϕ_2 не существует пути из источника в сток, а следовательно, ϕ_3 – полный поток. Для увеличения полного потока до максимального нужно построить орграф приращений.

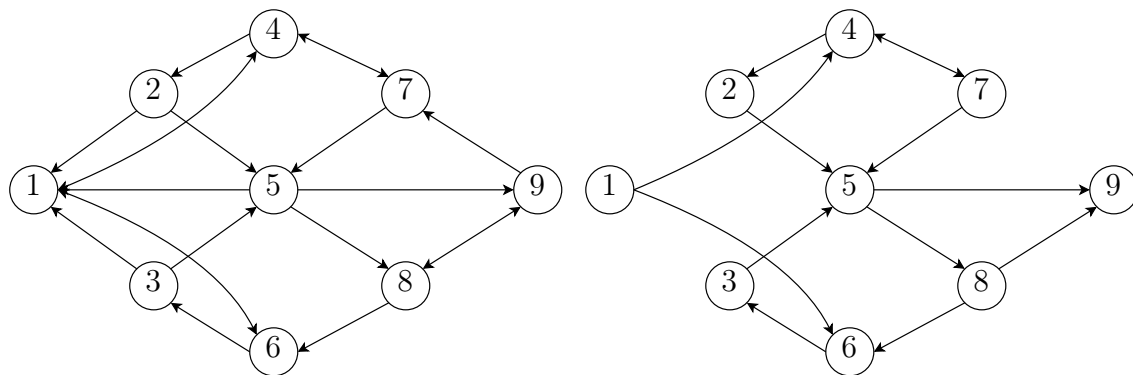


Рис. 18

Для построения максимального потока воспользуемся алгоритмом Форда-Фалкерсона. Начинаем с ранее построенного потока ϕ_5 . Выделяем в $I(D, \phi)$ простую цепь $\eta_6 =$

$v_1v_6v_3v_5v_9$. Увеличиваем потоки по дугам из η_4 на одинаковую величину, равную 3, до насыщения (v_1, v_6) , при этом поток по дугам (v_3, v_5) , (v_5, v_9) не превышает пропускной способности, а по дуге (v_3, v_6) уменьшается на 3. В результате поток ϕ_5 меняется на поток ϕ_6 . Далее строим модифицированный орграф приращений.

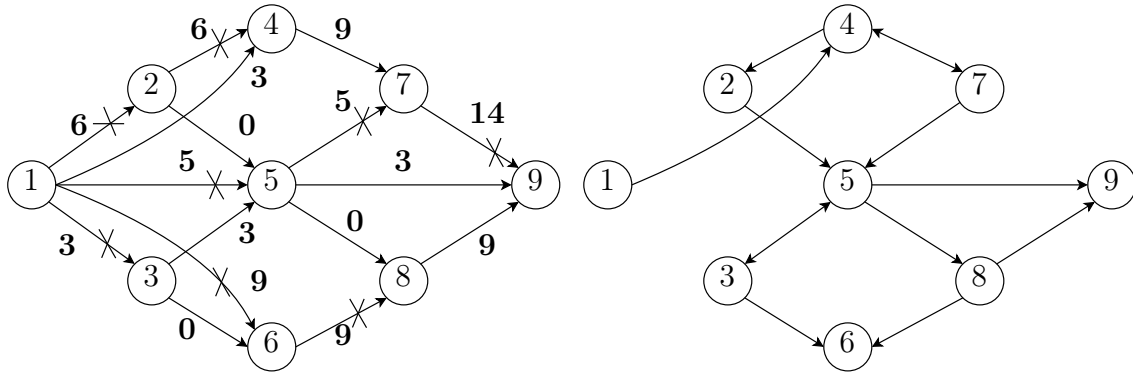


Рис. 19

Выполняем те же самые действия для цепи $v_1v_4v_2v_5v_8v_9$ (увеличиваем поток по ней на 4, получаем ϕ_7)

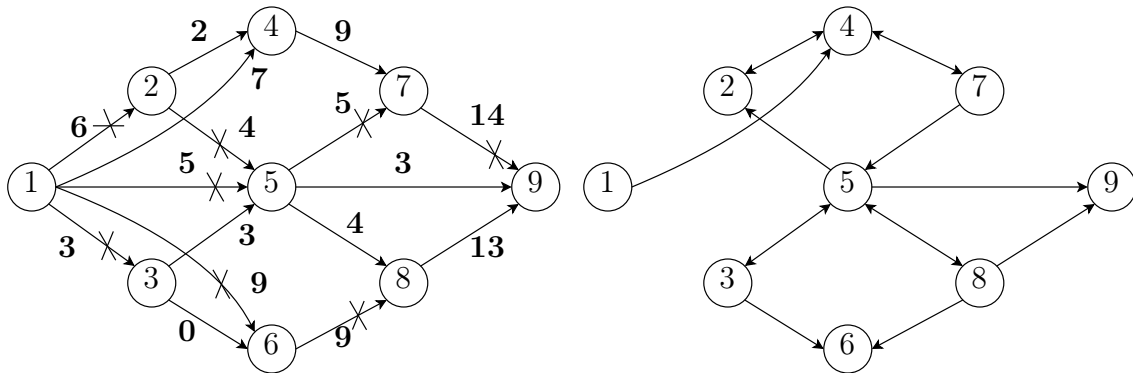


Рис. 20

Выполняем те же самые действия для цепи $v_1v_4v_7v_5v_9$ (увеличиваем поток на 1 по ней на 1, получаем ϕ_8)

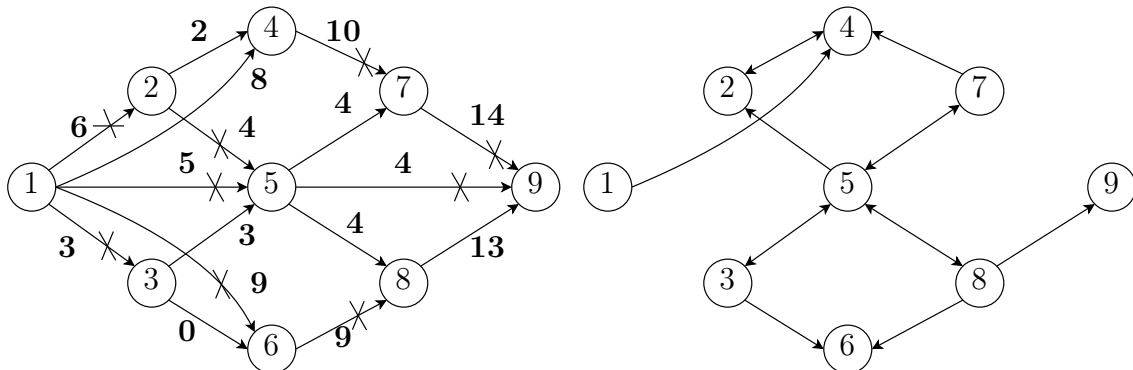


Рис. 21

Поскольку в $I(D, \phi_8)$ вершина v_9 не достижима из v_1 , то согласно алгоритму - ϕ_8 - искомый максимальный поток, при этом $\bar{\phi}_8 = 31$.

8. Построение функции Гранди графа. Изучить возможность построения функции Гранди для графа, содержащего контуры

1 Алгоритм

1.1 Определение функции Гранди

Рассмотрим орграфа $D = (V, X)$. Функция $g(v)$, ставящая в соответствие каждой вершине $v \in V$ целое число $g(v) \geq 0$, называется *функцией Гранди* для орграфа D , если в каждой вершине $v \in V$ число $g(v)$ является минимальным из всех целых неотрицательных чисел, не принадлежащих множеству $\{g(w) | w \in D(v)\}$, и $g(v) = 0$ при $D(v) = \emptyset$. Если для орграфа D существует функция Гранди, то говорят, что орграф *допускает* (в противном случае - *не допускает*) функцию Гранди. Не всякий орграф D допускает функцию Гранди, а если допускает, то она не обязательно единственная.

1.2 Описание алгоритма

Алгоритм находит все возможные функции Гранди для орграфа $D = (V, X)$, или определяет, что она для него недопустима. Граф вводится в виде матрицы смежности $n \times n$.

1. Разбить граф на уровни $V_0, V_1 \dots V_n$, используя алгоритм разбиения орграфа на уровни. Если разбиение удалось, перейти к пункту 2. Иначе, перейти к пункту 3 (т.к. заданный орграф имеет контуры).
2. Определяем функцию Гранди для первых двух уровней: $\forall v \in V_0, g(v) = 0; \forall v \in V_1, g(v) = 1$. Далее находим значения функции на каждом уровне $V_i, i \geq 2$, используя значения функции на предыдущих уровнях. Функция Гранди будет однозначно определена для этого графа.
3. Находим ядра графа N ($\forall v \in N, N \cap D(v) = \emptyset; \forall v \in V \setminus N, n \cap D(v) \neq \emptyset$). Для этого можно воспользоваться методом Магу. Значения функции Гранди в вершинах, входящих в ядро равны 0. Рекурсивно определяем значения функции Гранди в остальных вершинах. Повторив эти действия для всех ядер, получаем все возможные функции Гранди, допустимые для этого графа. Если ядер нет — функция Гранди недопустима.

1.3 Обоснование алгоритма

1. Если у орграфа $D = (V, X)$ нет контуров, то разбиение на уровни $V_0, V_1 \dots V_r$:

$$\begin{aligned} V_0 &= \{v \in V \mid D(v) = \emptyset\}; \\ V_1 &= \{v \in V \setminus V_0 \mid D(v) \subseteq V_0\}; \\ V_2 &= \{v \in V \setminus (V_0 \cup V_1) \mid D(v) \subseteq V_0 \cup V_1\}; \\ &\dots \\ V_r &= \{v \in V \setminus \bigcup_{k=0}^{r-1} V_k \mid D(v) \subseteq \bigcup_{k=0}^{r-1} V_k\}, \\ r &= \min\{n \in \mathbb{N} \mid V \setminus \bigcup_{k=0}^n V_k = \emptyset\} \end{aligned}$$

являются непустыми множествами, образующими разбиение множества вершин V (теорема 4.8 и утверждение 4.53 из "Курса дискретной математики").

Для нахождения этих уровней можно воспользоваться специальным алгоритмом, который так же может показать, что оргграф имеет контуры, и разбиение невозможно. Для начала надо выписать матрицу смежности графа $A(D)$. Под матрицей образуем строку Λ_0 , в i -м месте которой укажем число единиц в i -ой строке матрицы $A(D)$. Уровень образуют вершины, которым в строке Λ_0 соответствует число 0. Если $V = V_0$, то V_0 - единственный уровень орграфа. Иначе, под Λ_0 образуем Λ_i , ставя под нулям из Λ_{i-1} символы \times (и под символами \times тоже ставим \times) и при подсчете единиц, не учитываем те, которые находятся над \times , до тех пор, пока вся Λ_i не будет состоять из 0 и \times . Тогда Λ_i будет соответствовать V_i состоящий из вершин, которым в Λ_i соответствует число 0. Если в течение алгоритма появится строка без 0, то это говорит о том, что оргграф содержит контуры (алгоритм 4.9 и утверждение 4.54 из "Курса дискретной математики").

2. Напомним, что для орграфа $D(V, X)$ функция Гранди определяется рекурсивно: $g(v) = \min(\{n \in \mathbb{Z} \mid n \geq 0\} \setminus \{g(w) \mid w \in D(v)\})$ и $g(v) = 0, D(v) = \emptyset$.

Рассмотрим два случая. В первом случае оргграф, для которого необходимо определить функцию Гранди, не имеет контуры, а во втором он с контурами.

Докажем следующее: *Если оргграф допускает функцию Гранди, то найдется вершина $v \in V$ такая, что $g(v) = 0$.*

Пусть в оргграфе $D \forall v \in V, g(v) > 0$. Рассмотрим произвольную вершину $w \in V$. Тогда, с одной стороны, в силу нашего утверждения имеем $g(w) > 0$, а с другой стороны, используя это же утверждение получаем, что либо $D(w) = \emptyset$, либо $\forall v \in D(w), g(v) > 0$, а следовательно, по определению функции Гранди, $g(w) = 0$, т.е. противоречие.

3. В первом случае оргграф *допускает и притом единственную функцию Гранди*. Множество вершин разбито на уровни V_0, \dots, V_r . По определению функции Гранди, если она допустима для D , то $\forall v \in V_0, g(v) = 0; \forall v \in V_1, g(v) = 1$. Заметим, что значения функции Гранди на каждом уровне V_i , где $i \geq 2$, однозначно находятся по ее значениям на предыдущих уровнях V_0, \dots, V_{i-1} (поскольку $\forall v \in V_i, D(v) \subseteq$

$\bigcup_{k=0}^{i-1} V_k$), а следовательно, исходя из определенных значений функции для вершин нулевого и первого уровней, ее можно однозначно определить на всех последующих уровнях.

4. Для рассмотрения второго случая докажем следующую теорему: *Если орграф $D = (V, X)$ допускает функцию Гранди $g(v)$, то множество вершин $N = \{v \in V | g(v) = 0\}$ является ядром этого орграфа.*

Покажем, что множество N удовлетворяет условиям (см. определение ядра):

1. $\forall v \in N, N \cap D(v) = \emptyset$;
2. $\forall v \in V \setminus N, N \cap D(v) \neq \emptyset$.

Докажем сначала, что выполняется первое условие. Пусть $v \in N$. Тогда $g(v) = 0$. Если предположить, что $N \cap D(v) \neq \emptyset$, то существует вершина $w \in N \cap D(v)$. Но тогда из $w \in N$ имеем $g(w) = 0$, а из $w \in D(v)$ получаем, что не может выполняться равенство $g(v) = 0$. Данное противоречие подтверждает справедливость первого условия.

Докажем теперь, что выполняется второе условие. Пусть $v \in V \setminus N$. Тогда $g(v) \neq 0$. Если предположить, что $N \cap D(v) = \emptyset$, то по определению функции Гранди должно выполняться равенство $g(v) = 0$, т.е. пришли к противоречию, а значит $N \cap D(v) \neq \emptyset$.

Из этой теоремы следует то, что количество ядер графа равно количеству различных функций Гранди, которые он допускает. Поэтому, если найти ядра N_i графа с помощью метода Магу, можно рекурсивно определить i функций Гранди для остальных, учитывая, что она равна 0 в вершинах принадлежащих N_i . А если ядер нет, то нарушается ранее доказанное утверждение существования функции Гранди.

5. На ЭВМ проще всего реализовать метод Магу следующим образом. Сначала нужна КНФ, получаемая из матрицы $A(D)$ смежности по специальным формулам.

$$D = (V, X), X \neq \emptyset, U \subseteq V$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & \text{если } v_i \in U \\ 0, & \text{если } v_i \notin U \end{cases}$$

$$\bigwedge_{i=1}^n \bigwedge_{j=1}^n (\bar{a}_{ij} \vee \bar{\varepsilon}_i \vee \bar{\varepsilon}_j) = 1 \Rightarrow U \text{ — внутренне устойчивое множество}$$

$$\bigwedge_{i=1}^n (\varepsilon_i \vee \bigvee_{a_{ij}=1} \varepsilon_j) = 1 \Rightarrow U \text{ — внешне устойчивое множество}$$

$$\bigwedge_{i=1}^n \bigwedge_{j=1}^n (\bar{a}_{ij} \vee \bar{\varepsilon}_i \vee \bar{\varepsilon}_j) \wedge \bigwedge_{i=1}^n (\varepsilon_i \vee \bigvee_{a_{ij}=1} \varepsilon_j) = 1 \Rightarrow U \text{ — ядро}$$

Эту КНФ нужно привести к СДНФ с помощью построения таблиц истинности. Эта СДНФ будет соответствовать всем ядрам графа.

2 Программа алгоритма

Для работы скрипта необходимы библиотеки NetworkX и Matplotlib. На вход требуется корректная матрица смежности графа. Если функция допустима, то в отдельном окне откроется граф с подписанными значениями функции Гранди в вершинах. При закрытии окна откроется следующая возможная функция (если такая существует). Иначе, скрипт сообщит о том, что функция недопустима.

```
#!/usr/bin/env python3
import matplotlib.pyplot as plt
import networkx as nx
from itertools import product

class InvalidMatrixException(Exception):
    pass

def input_digraph() -> list[list[int]]:
    first_line = list(map(int, input().split()))
    set_line = set(first_line)

    if set_line != set([1]) and set_line != set([0]) \
       and set_line != set([0, 1]):
        raise InvalidMatrixException("Adjacency_matrix_"
                                     "can_only_contain_0_or_1")

    n = len(first_line)

    m = [first_line]

    for _ in range(n-1):
        line = list(map(int, input().split()))
        set_line = set(line)
        if set_line != set([1]) and set_line != set([0]) \
           and set_line != set([0, 1]):
            raise InvalidMatrixException("Adjacency_matrix_"
                                         "can_only_contain_0_or_1")

        if len(line) != n:
            raise InvalidMatrixException("Invalid_matrix_line_size")
        m.append(line)
    return m

def digraph_levels(m: list[list[int]]):
    levels = []
    n = len(m[0])
    lmbd = [sum(i) for i in m]
    levels.append([i for i in range(n) if lmbd[i] == 0])
    if lmbd == [0]*n: return [lmbd]
    while (set(lmbd) != set([0])):
        new_lmbd = [0]*n
```

```

    level = []
    has_circuit = True
    for i in range(n):
        s = 0
        for j in range(n):
            if lmbd[j] != 0:
                s += m[i][j]
        new_lmbd[i] = s
        if lmbd[i] != 0 and s == 0:
            level.append(i)
            has_circuit = False
        if has_circuit: return False
    lmbd = new_lmbd
    levels.append(level)
return levels

def grundy_from_levels(m, levels):
    n = len(m[0])
    grundy_values = [0]*n
    if len(grundy_values) > 1:
        for v in levels[1]:
            grundy_values[v] = 1
        for level in levels[2:]:
            for v in level:
                temp = [dv for i, dv in enumerate(grundy_values)
                        if m[v][i] == 1]
                temp = set(temp)
                mex = 0
                while mex in temp:
                    mex += 1
                grundy_values[v] = mex
    return grundy_values

def graph_cores(m):
    n = len(m)
    cnf1 = []
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            if m[i][j] == 1:
                cnf1.append((i, j))

    cnf2 = []
    for i in range(n):
        dis = [i]
        for j in range(n):
            if m[i][j] == 1:
                dis.append(j)

```

```

        cnf2.append(dis)

cores = []

for line in product([0,1], repeat=n):
    res = True
    for dis in cnf1:
        res = res and (not line[dis[0]]
                        or not line[dis[1]])
    for dis in cnf2:
        res = res and any(line[i] for i in dis)
    if res == True:
        cores.append(line)

for i in range(len(cores)):
    cores[i] = [j for j,v in enumerate(cores[i]) if v==1]
return cores

def rec_grundy(matrix, vertex, core):
    if vertex in core:
        return 0
    values = [rec_grundy(matrix, i, core) for
              i in range(len(matrix)) if matrix[vertex][i]]
    result = 0
    while result in values:
        result += 1
    return result

def graph_display(m, grundy):
    G = nx.DiGraph()
    n = len(m[0])
    for i in range(n):
        G.add_node(str(i+1)+'_('+str(grundy[i]) + ")")
        for j in range(n):
            if m[i][j] == 1:
                G.add_edge(str(i+1)+'_('+str(grundy[i]) + ')',
                           str(j+1)+'_('+str(grundy[j]) + ')')
    nx.draw_planar(G, with_labels=True, node_size=1300,
                   font_weight="bold")
    plt.show()

def main():
    m = input_digraph()
    l = digraph_levels(m)
    n=len(m)
    if l:
        grundy = grundy_from_levels(m,l)

```

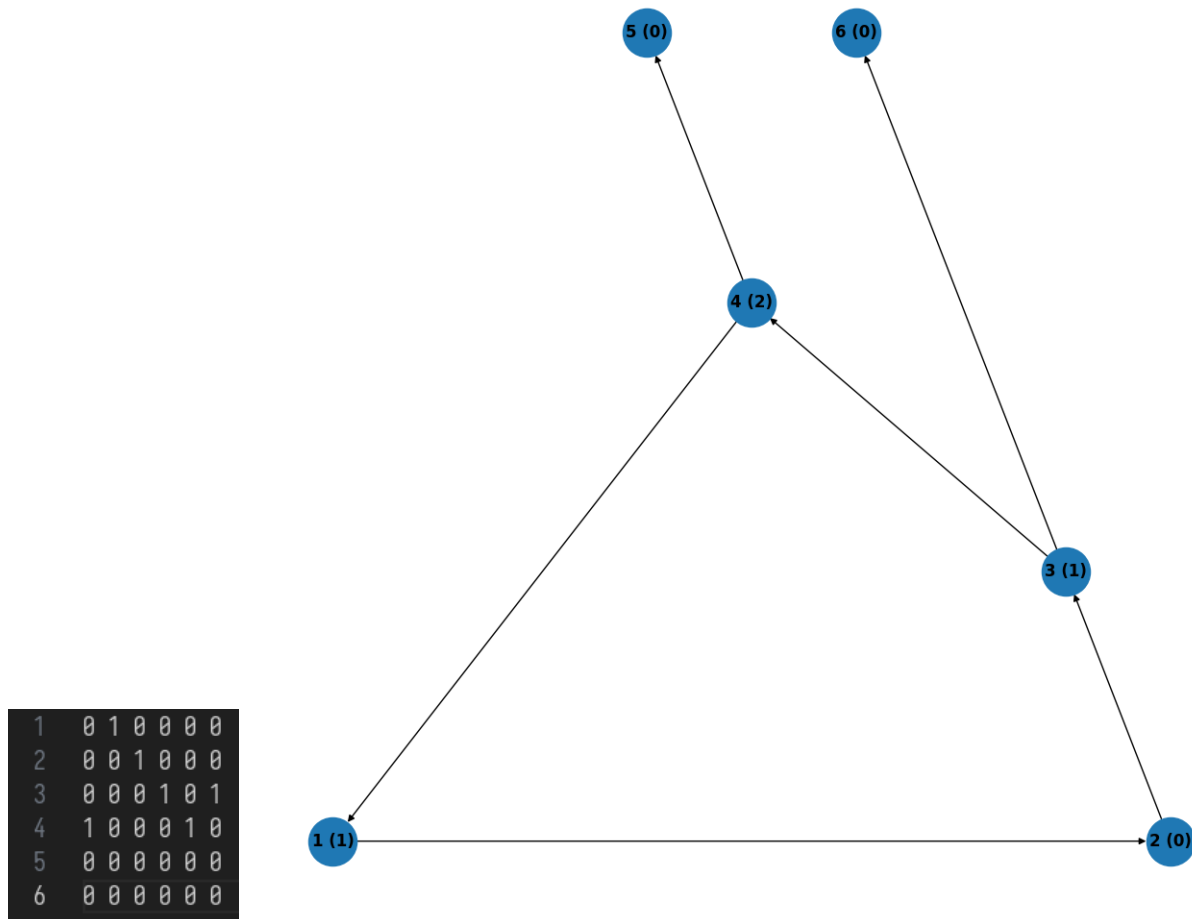
```

graph_display(m, grundy)
else:
    print("The_digraph_contains_circuits ,_"
          "proceed_to_the_search_for_the_cores")
    cores = graph_cores(m)
    if cores == []:
        print("Grundy's_function_is "
              "invalid_for_this_digraph")
    else:
        for core in cores:
            grundy = [rec_grundy(m,i ,core)
                      for i in range(n)]
            graph_display(m, grundy)

if __name__ == "__main__":
    main()

```

3 Примеры



4 Оценка сложности

Для графа без контуров с количеством вершин равным n алгоритм работает за $O(n^3)$, а для графа с контурами — за $O(2^n)$ (нахождение ядер графа — NP-полная задача, поэтому переборный алгоритм является разумным решением).

5 Прикладная задача

Функция Гранди позволяет находить выигрышные и проигрышные позиции в игре "Фишка на графе".

Правила игры. Дан ориентированный ациклический граф. В некоторой его вершине находится фишка. Играют двое, ходы делаются по очереди. За один ход можно переместить фишку в любую вершину, в которую существует ребро из текущей. Проигрывает тот, кто не может сделать следующий ход. Как и ранее, при анализе данной игры можно отметить выигрышные и проигрышные вершины.

При этом можно использовать такие соображения:

- начать можно с того, что вершины, из которых не выходит ни одного ребра, будут проигрышными (то есть, если перед ходом какого-то игрока фишка стоит в такой вершине, то он проиграл, так как не сможет сделать ход)
- любая вершина, из которой есть хотя бы одно ребро, ведущее в проигрышную — будет выигрышной;
- любая вершина, из которой можно попасть только в выигрышные — сама является проигрышной.

Так как в перспективе мы собираемся рассмотреть сумму из таких игр, то в данной задаче будем не просто выяснять является ли вершина выигрышной или проигрышной, а для каждой вершины будем вычислять функцию Гранди

Функция Гранди равна нулю для всех проигрышных вершин и положительна для всех выигрышных.

Для того, чтобы ответить на вопрос «кто выиграет?» достаточно вычислить функцию для той вершины, где в начальный момент находится фишка.

Чтобы ответить на вопрос: «какой ход нужно сделать из определенной позиции?» нужно рассмотреть все исходящие ребра для текущей вершины. Если вершина является выигрышной, то, по построению, из нее обязательно будет хотя бы один ход в одну из проигрышных. Этот ход и нужно делать.

Усложним задачу: **много фишек на графе.**

Правила игры. Дан ориентированный ациклический граф. В некоторых его вершинах находятся фишки. Играют двое, ходы делаются по очереди. За один ход можно переместить фишку в любую вершину, в которую существует ребро из текущей. Проигрывает тот, кто не может сделать следующий ход. В процессе игры разрешается размещать несколько фишек в одной вершине.

Эта игра является суммой нескольких предыдущих игр. То есть, ее можно рассматривать как несколько одновременно происходящих игр, каждая из которых ведется с единственной фишкой. В этом случае перед игроком появляется дополнительная задача.

Во-первых, следует правильно выбрать в какой из элементарных игр он будет делать ход (какую фишку он будет двигать). При этом данная элементарная игра не должна быть завершена (ход этой фишкой должен быть возможен).

Во-вторых, следует сделать правильный ход выбранной фишкой.

Для этого мы будем использовать функцию Гранди g .

- Вычислим $g(v)$ для всех вершин графа;
- Рассмотрим все вершины, в которых находятся фишки. Тогда общим значением S для суммарной позиции будет $S = g(v_1) \oplus g(v_2) \oplus \dots \oplus g(v_k)$, где v_1, \dots, v_k — вершины, в которых стоят фишки, \oplus — побитовое исключающее "или".

Если вычисленное значение $S = 0$, то позиция по сумме игр — проигрышная (что не означает проигрыша во всех играх суммы. В отдельных играх суммы возможен выигрыш).

Если вычисленное значение $S > 0$, то позиция по сумме игр — выигрышная (что, опять же, не означает выигрыша во всех играх суммы. В отдельных играх возможен проигрыш).

Правильным будет ход, который приведет к позиции с $S = 0$ (то есть после которого сопернику достанется проигрышная позиция).

Пример

В качестве примера будем использовать граф, для которого уже вычислены значения функции Гранди, они указаны в скобках. Установим несколько фишек, их расположение показано черным цветом.

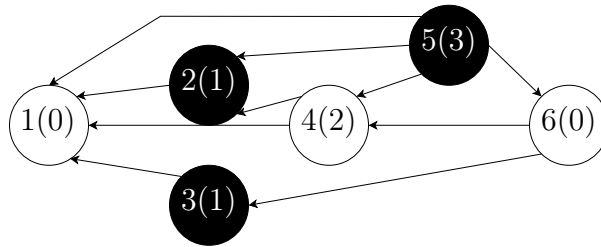


Рис. 22: Граф с фишками

Для оценки позиции по сумме игр нужно найти: $g(v_2) \oplus g(v_3) \oplus F(v_5) = 1 \oplus 3 \oplus 1 = 3$

В приведенном примере необходимо сделать ход фишкой из вершины v_4 в вершину v_5 . Таким образом $g(v_2) \oplus g(v_4) \oplus g(v_3) = 0$.