

ПРИМЕНЕНИЕ СИМПЛЕКС-МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО ЭНЕРГОЗАТРАТАМ УПРАВЛЕНИЙ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В СЛОЖНЫХ СЕТЯХ

А. А. Волков, Р. Т. Волколупова

Харьков

При проектировании и исследовании системы управления воздухо-распределением в шахтной вентиляционной сети возникают задачи синтеза оптимального управления конечным состоянием воздухораспределения. В общем случае такие задачи формулируются как задачи математического программирования. Когда потокораспределение задается во всех ветвях сети — это задачи линейного программирования. При заданной топологии сети и параметрах ее элементов (в том числе и регулирующих органов) необходимо найти координаты регулирующих органов в сети (напоры вентиляторов и депрессии дросселирующих устройств), которые обеспечили бы заданное потокораспределение, удовлетворяли бы ограничениям, накладываемым на систему, и обращали в минимум критерий оптимальности системы — энергетические затраты.

Значения подлежащих управлению потоков в части базисных ветвей (связях графа) сети в этом случае можно задавать их математическими ожиданиями, определенными на некоторый период эксплуатации системы. Значения не подлежащих управлению потоков в остальных базисных ветвях сети принимаются, исходя из конкретных условий работы системы, или находятся путем решения определенным образом сформулированной задачи дискретного моделирования [1] процессов потокораспределения в сети.

Математическая формулировка этой задачи зависит от принятого способа управления: активного, пассивного или комбинированного. Рассмотрим комбинированный способ управления, когда используются как активные, так и пассивные регулирующие органы. Тогда рассматриваемая задача формулируется следующим образом: найти неотрицательные значения депрессий $h_i^{(n)}$ пассивных регулирующих органов, неотрицательные значения $h_i^{(a)}$ напоров активных регулирующих органов и z (z — линейная функция цели), удовлетворяющие условиям:

$$B_1^* \bar{h}_1^{(n)} + B_2^* \bar{h}_1^{(a)} = B_2^* \bar{h}_{11}^{(a)} - B^* \bar{h}^{(e)}; \quad (1)$$

$$-z = -\bar{q}_{11} \bar{h}_{11}^{(a)} + \bar{q}^* \bar{h}^{(e)}; \quad (2)$$

$$B^* \bar{h}^{(e)} = H^{(e)} = \text{const};$$

$$B_2^* \bar{h}_{11}^{(a)} = (h_{n+1}^{(a)}, \dots, h_{n+v}^{(a)}, 0, \dots, 0), \quad (3)$$

где

$$h_i^{(a)} \geq 0; \quad i \in s, \quad i \in M; \quad s = \{n+1, \dots, n+v\}. \quad (4)$$

Здесь в качестве функции цели z принят линейный функционал, представляющий собой разность между общими энергетическими затра-

тами на создание потоков в сети и постоянными энергетическими затратами, обусловленными естественными сопротивлениями ветвей сети.

Исходная информация данной задачи следующая:

а) топология сети, представленная в виде линейного оператора A_x , отображающего m -мерное векторное пространство V^* дуг графа сети в n -мерное векторное пространство R^* независимых обобщенных узлов этого графа или в виде линейного оператора B , отображающего m -мерное векторное пространство V^* дуг графа в $s = (m - n)$ -мерное векторное подпространство Θ^* независимых циклов графа [2];

б) уравнения ветвей моделирующего графа сети, связывающие падения напоров (депрессии) $h_i^{(e)}$, $i \in M$ в ветвях сети и установившиеся значения потоков (дебитов) в этих ветвях;

в) уравнения регулирующих органов, устанавливающие связь между установившимися значениями потоков q_i и напорами $h_i^{(n)}$ или депрессиями $h_i^{(n)}$ для активных и пассивных регулирующих органов соответственно;

г) местоположение активных регулирующих органов, заданное номерами ветвей сети, в которых они расположены;

д) требуемое потокораспределение в сети, заданное s -мерным вектором $\bar{q}_1 = (q_{n+1}, \dots, q_m)$, составляющие которого относятся к связям графа сети (базисных ветвях подпространства R^*). В остальных ветвях сети (ветвях дерева графа) требуемые значения потоков определяются n -мерным вектором — столбцом

$$\bar{q}_1 = -A_2 \bar{q}_1 = B_1 \bar{q}_1; \quad \bar{q}_1 = (q_1, \dots, q_n); \quad (1)$$

е) критерий оптимальности (функция цели)

$$z = \sum_{i=1}^m h_i^{(n)} q_i = \bar{q}^T \bar{q}^{(n)}.$$

Для электронной вычислительной машины М-20 была составлена программа, решающая задачу синтеза оптимального управления конечным состоянием потокораспределения в шахтной вентиляционной сети. Эту программу можно разбить на три этапа:

1) определение машинного представления системы (1), (2) и проведение анализа на допустимость решения;

2) выбор нового базисного элемента и машинное представление системы (1), (2) при выбранном новом базисном элементе (k -ая итерация симплекс-процесса);

3) определение оптимальных координат регулирующих органов в сети.

Каждый из этих блоков осуществляется при помощи соответствующего алгоритма. Опишем эти алгоритмы.

Как сказано выше, топология сети представляется в виде линейного оператора A_x или линейного оператора B . Представить топологию сети линейным оператором A_x значит преобразовать условную матрицу инцидентий [3] A^* в $A^* = (A_1^*, A_2^*)$, где A_1^* — условная единичная подматрица $E^{(n)}$ (где $(n - 1)$ — количество узлов сети), отвечающая дереву графа. Сделаем преобразование $B_1^* = -A_2^*$, где $B^* = (B_1^*, B_2^*)$ (B_2^* — единичная условная подматрица $E^{(s)}$, где s — цикломатическое число графа сети, отвечающее базису системы).

Это преобразование позволяет нам получить информацию о топологии сети в виде линейного оператора B . В таком виде необходимо задание топологии сети для решения рассматриваемой задачи. Все преобразования информации о топологии сети ведутся предварительно программно с помощью машины.

Имея все необходимое для решения задачи синтеза оптимального управления конечным состоянием потокораспределения в сети как задачи линейного программирования, воспользуемся симплекс-методом Данцига [5]. Он состоит из двух этапов. Первый этап предназначен для получения начальной допустимой канонической формы, т. е. начального базисного допустимого решения, а второй служит для улучшения неоптимального базисного допустимого решения.

Для рассматриваемой задачи справедлива **теорема 1**: любое допустимое базисное решение задачи синтеза оптимального управления потоками в сети не может быть улучшено и является минимальным допустимым решением (оптимальным) [4].

Поэтому для нахождения оптимального решения нашей задачи достаточно использовать только первый этап симплекс-метода. Рассматриваемая задача имеет ряд специфических особенностей, которые не позволяют использовать симплекс-метод по его обычной схеме. Правые части некоторых уравнений исходной системы (1) содержат неизвестные. Неотрицательность значений таких правых частей мы полагаем заранее, так как $B_2^* h_{11}^{(a)}$ всегда можно сделать большими или равными $B^* h^{(e)}$ соответствующим выбором $h_{11}^{(a)}$, являющегося искомой величиной. Поскольку в качестве переменных выбраны напоры $h_i^{(a)}$, а не координаты регулирующих органов, входящие в операторы регулирующих органов, то в качестве элементов симплекс-таблицы используются только элементы условной матрицы $B^* = (B_1^*, B_2^*)$, которая задает в то же время и топологию сети. Это позволяет существенно увеличить размерность рассматриваемых сетей.

Для комбинированного метода управления справедлива следующая **теорема 2**: допустимое базисное решение задачи синтеза оптимального управления потоками в сети комбинированным способом является минимальным допустимым базисным решением (оптимальным) тогда и только тогда, когда составляющие $h_i^{(a)}$ вектора $h_{11}^{(a)}$ являются минимально возможными [4].

Иначе, напоры $h_i^{(a)}$ активных регулирующих органов равны естественным падениям напоров (депрессиям) H_k соответствующих независимых контуров сети, которые определяются соотношением

$$h_i^{(a)} = H_k^* \quad (k = 1 - n = 1, \dots, v; i = n + 1, \dots, n + v).$$

Другими словами, в базисных ветвях (связях), содержащих активные регулирующие органы, дросселирование должно отсутствовать.

В связи с этим в симплекс-методе при выборе базисного (он также называется главным или ведущим) элемента необходимо проводить дополнительный анализ. Ведущий элемент по возможности должен быть выбран так, чтобы это привело к изменению координат только у пассивных регулирующих устройств, а если это невозможно, то у минимального числа активных регулирующих органов.

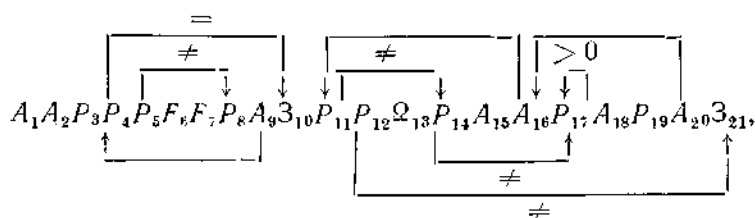
Получение начальной допустимой канонической формы проводится при использовании имеющихся в системе базисных переменных и добавлении недостающих искусственных переменных с последующим их исключением.

Первый этап программы решения задачи синтеза системы регулирующих органов в сети предназначен для машинного представления системы (1), (2) и проведения анализа на допустимость решения. Систему (1), (2) будем считать представленной в машинном виде, если определены ее правые части, которые содержат неизвестные $h_i^{(a)}$. Математическое описание рассматриваемой задачи предполагает следующее ограни-

чение: каждое уравнение системы (1) содержит не более одной неизвестной, т.е. в каждом независимом цикле сети может содержаться не более одного активного регулирующего органа. Неизвестная определяется путем проверки наличия среди элементов B^* ветвей, содержащих активные регулирующие органы.

Решение будет допустимым, если правые части системы ≥ 0 . При анализе правых частей необходимо проверить наличие кода неизвестной в правых частях каждого уравнения. Если неизвестная есть — значение правой части этого уравнения считаем всегда ≥ 0 , так как уже говорилось, что мы всегда можем взять $B_2^* h_{11}^{(a)} \geq B^* h^{(e)}$. Если в рассматриваемом уравнении нет неизвестной, анализируем правую часть на знак. В случае, если значение правой части отрицательно, то в этом уравнении необходимо изменить базисную переменную. Введению искусственной переменной в данном алгоритме отвечает изменение знака на противоположный соответствующему элементу условной матрицы B_2^* (связи соответствующего цикла). Значения правой части и элементов уравнения условной матрицы B^* также меняют знаки на противоположные.

Операторная схема алгоритма первого этапа имеет вид



где A_1 — запись этой подпрограммы на МБ-1;

A_2 — ввод и перевод r_i и информация о ветвях с активными регулирующими органами;

P_3 — преобразование числовой информации о ветвях с активными регулирующими органами в кодовую восьмеричную;

P_4 — анализ условной матрицы B^* на конец;

P_5 — анализ строки условной матрицы B^* на наличие активного регулирующего органа;

F_6 — формирование признака у элемента B_2^* ;

F_7 — формирование кода, определяющего неизвестную величину в правых частях;

P_8 — формирование кодов вычисления ($-B^* h^{(e)}$);

A_9 — вычисление ($-B^* h^{(e)}$);

Z_{10} — засылка нуля в счетчик искусственных переменных;

P_{11} — анализ значений правых частей на конец;

P_{12} — анализ счетчика искусственных переменных на нуль;

Q_{13} — конец работы рассматриваемого алгоритма в случае, когда решение допустимое;

P_{14} — анализ значения правых частей на код, определяющий неизвестную;

A_{15} — прибавление единицы в регистр адреса;

A_{16} — прибавление единицы в регистр адреса и в счетчик строк;

P_{17} — анализ значения правых частей на знак;

A_{18} — изменение знака значения правой части и прибавление единицы в счетчик искусственных переменных;

P_{19} — поиск соответствующей строки в условной матрице;

A_{20} — изменение знака на противоположный в строке условной матрицы B^* ;

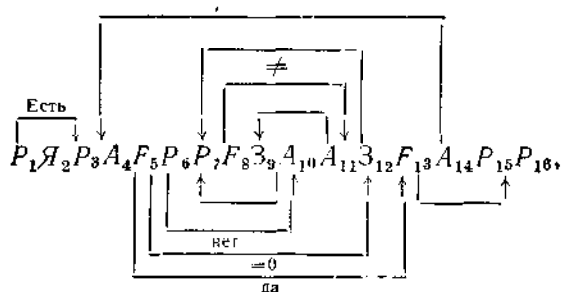
Z_{21} — вызов подпрограммы симплекс-алгоритма.

Второй этап программы осуществляет симплекс-алгоритм метода. Разделим второй этап на две части: выбор нового базисного элемента и машинное представление системы при выбранном новом элементе базиса (k -ая итерация симплекс-процесса).

Подготовительным процессом для преобразования симплекс-таблицы является правильный выбор ведущего элемента.

В первую очередь исключается та искусственная переменная, для которой можно найти такой ведущий элемент, чтобы при проведении с ним преобразования симплекс-таблицы не изменились строки условной матрицы B^* , содержащие неизвестные в правых частях. То есть, ведущий элемент должен быть выбран в таком условном столбце B^* , чтобы соответствующие элементы этого столбца в уравнениях с неизвестными в правой части равнялись нулю. При отсутствии в B^* элемента, отвечающего таким требованиям, сужаем ограничение, считая, что возможно изменение только одной строки условной матрицы B^* с неизвестной в правой части, прибавив в счетчик ограничений на ведущий элемент единицу. Если и такой ведущий элемент нельзя выбрать, прибавляем снова в счетчик ограничений на ведущий элемент единицу и т. д. до нахождения ведущего элемента с максимально возможным ограничениями.

Операторная схема алгоритма выбора нового базисного элемента имеет вид



где P_1 — поиск отрицательного элемента r в условной подматрице B_2^* ;

Y_2 — останов машины в случае отсутствия элемента в B_2^* (сбой машины);

P_3 — выбор положительного элемента k в r -ой строке условной матрицы B_1^* ;

A_4 — запоминание содержимого регистра адреса;

F_5 — анализ условной матрицы B_1^* на конец;

P_6 — выделение признака у первых элементов строк;

P_7 — поиск элемента в условной матрице B_1^* , равного k ;

F_8 — анализ счетчика строк с признаком β , анализ счетчика α ;

Z_9 — очистка счетчика α ;

A_{10} — прибавление единицы в регистр адреса;

A_{11} — прибавление единицы в счетчик строк с признаком β ;

Z_{12} — засылка кода в счетчик α ;

F_{13} — сравнение счетчика β со счетчиком ограничений на ведущий элемент;

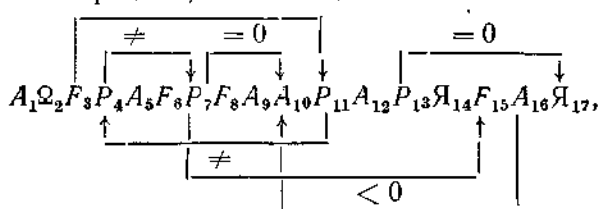
A_{14} — прибавление единицы в регистр адреса;

P_{15} — восстановление регистра адреса;

P_{16} — вызов подпрограммы k -ой итерации симплекс-процесса, когда ведущий элемент выбран.

Выбор ведущего элемента исключает искусственную переменную, заменив ее на выбранную новую. Машинное представление системы (1), (2) меняется. Преобразованию подлежат как левые (симплекс-таблица), так и правые части. Каждое такое преобразование представляет собой текущую k -ую итерацию симплекс-процесса.

Операторная схема алгоритма, определяющего машинное представление системы (1), (2), при выбранном новом элементе базиса (k -ая итерация симплекс-процесса) имеет вид



где A_1 — запоминание ведущего элемента, его строки из условной матрицы B^* и значение правой части этой строки;

Ω_2 — преобразование условной матрицы B^* по схеме Жордана — Гаусса, разработанной для условных матриц в работе [3];

F_3 — ввод новой базисной переменной в B^* ;

P_4 — анализ элемента правых частей на код неизвестной величины;

A_5 — прибавление единицы в регистр адреса;

F_6 — переадресация кодов вычисления ($-B^*h^{(e)}$);

P_7 — анализ элемента k на знак и ноль;

F_8 — формирование команд сложения;

A_9 — вычисление нового значения правой части;

A_{10} — прибавление единицы в регистр адреса;

P_{11} — анализ правых частей на конец;

A_{12} — вычитание единицы из счетчика искусственных переменных;

P_{13} — анализ счетчика искусственных переменных на ноль;

Y_{14} — вызов программы выбора ведущего элемента;

F_{15} — формирование команд сложения;

A_{16} — вычисление нового значения правой части ($b'_k = b_k - b_r$);

Y_{17} — вызов программы анализа правых частей на знак;

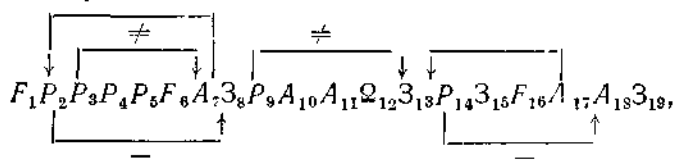
После исключения всех искусственных переменных изменяется условная подматрица B_2^* — старые базисные переменные, которые делали решение недопустимым, заменяются новыми. Допустимое базисное решение найдено. Согласно теореме 1, оно оптимально.

На последнем, третьем этапе программы определяются оптимальные координаты регулирующих органов в сети.

Проанализировав правые части на наличие в них неизвестных, отделяем все значения правых частей с неизвестными. Затем, используя информацию о ветвях сети, содержащих активные регулирующие органы, разделяем этот массив на подмассивы. Каждый из подмассивов представляет собой систему алгебраических уравнений с одной неизвестной (неизвестной является один из номеров ветви, содержащей вентилятор). Решая каждую систему определенным образом, находим в них оптимальные значения напоров вентиляторов $h_i^{(a)}$. Депрессии пассивных регулирующих органов ветвей-связей (базисов) определяются по формуле $h_i^{(n)} = h_{i_{\text{отп}}}^{(a)} - B^*h^{(e)}$ для циклов, содержащих активное регулирующее

устройство, или по значению правой части уравнения этого базиса, если в данном цикле нет активного регулирующего органа.

Операторная схема алгоритма определения оптимальных координат регулирующих органов в сети имеет вид



где F_1 — формирование единиц в счетчик строк условной матрицы B^* и счетчик строк правых частей;

P_2 — анализ строк на максимум;

P_3 — анализ строки массива правых частей на наличие кода, определяющего неизвестную;

P_4 — выбор номера ветви (i) в условной матрице с активным регулирующим органом;

P_5 — поиск значения $h_i^{(a)}$ в массиве правых частей;

F_6 — формирование массива печати;

A_7 — прибавление единиц в счетчик строк правых частей и условной матрицы B^* ;

Z_8 — восстановление единиц в счетчик строк правых частей и условной матрицы B^* ;

P_9 — анализ строк на максимум;

A_{10} — вычисление критерия оптимальности;

A_{11} — печать $h_i^{(a)}$, $h_i^{(n)}$ и значения критерия оптимальности;

Q_{12} — конец алгоритма;

Z_{13} — выбор базиса в строке условной матрицы B^* ;

P_{14} — анализ базиса на наличие активного регулирующего органа;

Z_{15} — выбор соответствующего значения в массиве правых частей;

F_{16} — формирование в массиве печати $h_i^{(a)}$;

A_{17} — прибавление единиц в массиве правых частей и условной матрицы B^* ;

A_{18} — прибавление единицы в счетчик строк условной матрицы и двойки в счетчик строк правых частей;

Z_{19} — засылка нуля в массив печати.

Рассматриваемый класс задач имеет не единственное решение. Для одной и той же сети существует конечное множество базисных допустимых решений. Понятие допустимого базиса здесь отождествляется со связями моделирующего графа сети, в которых следует разместить регулирующие органы. Данное потокораспределение можно получить при различных вариантах расположения регулирующих органов в сети. Окончательный выбор базиса расположения регулирующих органов в сети должен производиться по дополнительным критериям: по критерию соответствия базиса техническим требованиям к системе и по критерию области управляемости.

Небазисные допустимые решения, которых в условиях данной задачи существует бесчисленное множество, не представляют интереса, так как они приводят всегда к увеличению числа регулирующих органов в сети.

Программа решения задачи синтеза оптимального управления конечным состоянием воздухораспределения в шахтной вентиляционной сети рассчитана на работу с сетями, имеющими до 500 ветвей и 150 независимых циклов. Обработывались сети в 16, 30, 65, 76 и 250 ветвей.

В качестве примера рассмотрим сеть в 76 ветвей.

Пример

$$m = 76; \quad n = 49; \quad s = 28$$

N_b	q	r	N_b	q	r	N_b	q	r
1	3,66	0,00551	28	5,53	3,3	55	11,8	300
2	3,66	0,0128	29	5,78	0,00096	56	17,2	0,00112
3	3,62	0,0181	30	6,95	0,0011	57	15,6	0,00798
4	3,39	0,03	31	6,62	0,0054	58	5,62	0,015
5	4,95	0,77	32	10,6	0,0026	59	10,5	0,0295
6	5,10	0,606	33	11	0,00108	60	17,2	0,0165
7	7,7	1,421	34	52,3	0,029	61	19,4	0,0072
8	8,28	0,542	35	261	0,0022	62	20,1	0,00203
9	2,38	0,671	36	31,7	0,07	63	0,84	0,196
10	1,99	1,064	37	55,3	0,023	64	34,7	0,0303
11	1,52	0,904	38	31,7	0,0165	65	33	76,18
12	2,91	0,608	39	63,4	0,035	66	30,8	0,0663
13	2,75	1	40	28,6	0,059	67	21,6	0,0903
14	0,84	4	41	27,8	0,337	68	10,6	0,09096
15	1,54	17,3	42	26,9	0,0676	69	11	0,0341
16	0,79	6,3	43	15,1	0,0019	70	21,6	0,0548
17	2,19	5,5	44	14,3	0,0052	71	23,2	0,00711
18	2,51	295,3	45	12,8	0,0153	72	25,5	0,0854
19	7,57	10	46	5,75	0,0214	73	33,6	0,187
20	8,12	150	47	9,14	0,0514	74	35,7	0,0029
21	2,10	10	48	12,8	0,0103	75	63,4	0,0903
22	1,58	0,01	49	14,3	0,0512	76	73,8	0,0011
23	2,27	0,12	50	34,5	0,0165	в 76 ветви активный регулирующий орган		
24	10,4	0,111	51	25,3	0,079			
25	1,67	0,0036	52	37,9	0,0148			
26	11	32	53	29,7	0,105			
27	26	38,6	54	27,6	0,033			

Условная матрица B^* для оптимального решения.

В начале каждой строки элементы B_2^* , а затем элементы B_1^*

1. 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 49, 50, 51, 52, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
2. 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
3. 39, 50, 51, 52, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 75, 76, 19, 64, 65, 66, 20, 73, 74, 38, 27, 34;
4. 29, 30, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
5. 30, 39, 50, 51, 52, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 75, 76, 19, 64, 65, 66, 20, 73, 38, 34, 27;
6. 32, 57, 50, 51, 52, 56, 57, 60, 61, 62, 75, 76, 27, 64, 65, 66, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
7. 32, 39, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 67, 38, 34, 27;
8. 33, 57, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 38, 34, 27;
9. 29, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
10. 30, 39, 50, 51, 52, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 75, 76, 19, 64, 65, 66, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
11. 31, 39, 50, 51, 52, 56, 60, 61, 62, 75, 76, 19, 64, 65, 66, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
12. 32, 39, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 38, 34, 27;
13. 33, 34, 64, 65, 66, 67, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 38, 34, 27;
14. 39, 40, 41, 51, 52, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
15. 38, 40, 41, 42, 43, 44, 49, 50, 51, 52, 75, 76, 20, 73, 38, 34, 27;
16. 39, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 52, 62, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
17. 39, 50, 51, 52, 61, 62, 75, 76, 19, 64, 65, 66, 20, 73, 74, 38, 34, 27;
18. 39, 40, 52, 63, 75, 76, 20, 73, 74, 38, 34, 41;
55. 40, 41, 42, 19, 64, 65, 66;
53. 20, 73, 21;
54. 21, 74;
22. 39, 64, 65, 66, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 38, 34, 27;
23. 39, 64, 65, 72, 73, 74, 75, 76, 38, 34, 27;
24. 76;
25. 64, 63, 40;
26. 34, 28, 27;
35. 27, 36, 38;
37. 36, 28, 38.

$$h_{76}^{(a)} = 121130,34$$

i	h_i^n	i	h_i^n	i	h_i^n	i	h_i^n	i	h_i^n
1	83782,73	6	6,27	11	21,91	16	83793,8	24	121112,3
2	83777,64	7	10490,67	12	10569,9	17	3,04	25	11,7
3	18,28	8	10534,05	13	10563,6	18	82354,8	26	22513,9
4	83778,12	9	83773,9	14	83865,1	22	10601,33	35	26402,9
5	0	10	14,21	15	83745,8	23	10667,55	37	46,9
53	9988,7	54	22,92	55	41809,6				

значение координат регулирующих органов $r_i^{(n)}$

i	$r_i^{(n)}$	i	$r_i^{(n)}$	i	$r_i^{(n)}$	i	$r_i^{(n)}$	i	$r_i^{(n)}$
1	6254,496	6	0,241	11	9,484	16	134263,4	24	1119,85
2	7420,780	7	176,94	12	1248,2	17	0,634	25	4,195
3	1,395	8	153,65	13	1396,8	18	13071,9	26	186,06
4	8290,062	9	14789,5	14	118856,4	22	4246,6	35	38,758
5	0	10	3,588	15	35311,9	23	2070,2	37	1,533
53	1132,39	54	0,33	55	300,27				

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Математическое описание и дискретное моделирование на ЭВМ установившихся процессов потокораспределения в гидравлических сетях. ГОСИНТИ, № 5-64-1130/31, 1964.
2. А. А. Волков. Многочленное отображение множества дуг графа как метод изоморфного отображения топологии сети. Изд-во НТО радиотехн. и эл. связи, Харьков, 1966.
3. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов, Р. Т. Волколупова. Топологический анализ шахтных вентиляционных сетей. «Изв. вузов, Горный журнал», № 1, 1967.
4. А. А. Волков. Синтез оптимального управления потокораспределением в шахтной вентиляционной сети. Доклад на III Всесоюзном симпозиуме по экстремальным задачам. Изд-во Томского ун-та, 1967.
5. Дж. Данциг. Линейное программирование, его применение и обобщение. Изд-во «Прогресс», 1966.