

О РЕШЕНИИ НА ЭВМ ОПРЕДЕЛЕННОГО КЛАССА ЗАДАЧ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ШАХТНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ

А. А. Волков, Э. А. Дедиков, А. Г. Евдокимов, Б. Д. Яловкин

Харьков

При решении ряда проблем, связанных с улучшением проветривания шахт, возникает необходимость в оптимальном управлении воздухораспределением в шахтных вентиляционных сетях при заданных значениях расходов воздуха (дебитов) [1]. Наибольший практический интерес эта задача представляет в том случае, когда значения дебитов заданы в независимых по расходу ветвях (связях) сети, число которых (l) меньше цикломатического числа сети (S). Как показано в литературе [1], задача оптимального управления воздухораспределением при заданных дебитах в l связях сети формулируется как задача нелинейного программирования и в общем виде трудноразрешима. В некоторых практически важных случаях ее можно свести к более простой.

Рассмотрим комбинированный способ регулирования, осуществляемый регулируемым в широких пределах поверхностным вентилятором и l дросселирующими устройствами, расположенными в связях сети (не обязательно с требуемыми значениями дебитов). При этом, связи с требуемыми значениями дебитов позволяют выбрать основную систему контуров таким образом, что каждый контур, образованный ими, содержит ветвь с вентилятором и одно дросселирующее устройство.

Произведем кодировку сети в соответствии с методом контуроразделения [1, 2]. Выберем главное дерево сети таким образом, чтобы ветви с требуемыми дебитами стали связями, а ветви с дросселирующими устройствами, но без требуемых дебитов, и ветвь с вентилятором — ветвями дерева. Связи с требуемыми дебитами и дросселирующими устройствами занумеруем от 1 до l_1 ; связи с требуемыми дебитами, но без дросселирующих устройств — от $l_1 + 1$ до l ; остальные связи — от $l + 1$ до S . Ветвям дерева с дросселирующими устройствами присвоим номера от $S + 1$ до $S + \theta$; остальным ветвям дерева от $S + \theta + 1$ до m . Ветви с вентилятором главного проветривания присвоим номер m . Нумерация связей с требуемыми значениями дебитов, но без регулирующих органов, и ветвей дерева сети с дросселирующими устройствами должна быть взаимосвязана, т. е. $(S + k)$ -ый номер присваивается дросселирующему устройству, принадлежащему $(l_1 + k)$ -му контуру (контуру, образованному $(l_1 + k)$ -й связью).

Учитывая произведенную кодировку сети, сформулируем рассматриваемую задачу математически.

Определить значения h_m^b , q_m и r_{pi} ($i = 1, 2, \dots, l_1, S + 1, \dots, S + \theta$) которые обращают в минимум функцию

$$N = \frac{1}{102} h_m^b q_m \quad (1)$$

и удовлетворяют следующим ограничениям:

$$a) q_r = C_r, (r = 1, 2, \dots, l);$$

$$б) q_i = \sum_{r=1}^S k_{2ri} q_r; (i = S + 1, \dots, m);$$

$$в) H_r^{(e)} + \text{sign } q_r r_{pr} |q_r|^{n_{pr}} - h_m^{(b)} = 0; (r = 1, 2, \dots, l_1);$$

$$г) H_r^{(e)} + \text{sign } q_{(r+s-l_1)} r_{p(r+s-l_1)} |q_{(r+s-l_1)}|^{n_{p(r+s-l_1)}} - h_m^{(b)} = 0; \\ (r = l_1 + 1, \dots, l);$$

$$д) H_r^{(e)} + \sum_{i=S+1}^{s+\theta} k_{2ri} \text{sign } q_i r_{pi} |q_i|^{n_{pi}} - k_{2rm} h_m^{(b)} = 0; \\ (r = l + 1, \dots, s);$$

$$е) r_{pi} \geq 0; (i = 1, \dots, l_1, S + 1, \dots, S + \theta).$$

Здесь m — количество ветвей сети; k_2 — матрица контуров для ветвей дерева сети при использовании метода контуроразделения; q_i — дебит i -й ветви сети; r_i и r_{pi} — аэродинамические сопротивления i -й выработки сети и дросселирующего устройства этой сети соответственно; n_i и n_{pi} — коэффициенты турбулентности выработки и дросселирующего устройства i -ой ветви; $\text{sign } q_i$ — знак q_i ; $h_m^{(b)}$ — депрессия вентилятора m -й ветви; $H_r^{(e)}$ — естественная депрессия r -го контура при воздухораспределении, определяемом формулами (2а, б).

$$H_r^{(e)} = \text{sign } q_r \cdot r_r |q_r|^{n_r} + \sum_{i=S+1}^m k_{2ri} \text{sign } q_i |q_i|^{n_i} \quad (r = 1, 2, \dots, S). \quad (3)$$

Оптимальное по энергозатратам воздухораспределение в сети, описываемое математической моделью (1) — (3), достигается при полностью открытом дросселирующем устройстве в связи контура с максимальной естественной депрессией, равной депрессии, развиваемой вентилятором. Воздухораспределение, устанавливающееся в остальных $S - l$ связях, будет определяться системой уравнений (2д) при условии, что

$$h_m^{(b)} = H_k^{(e)} \max, \quad (4)$$

где $H_k^{(e)} \max$ — максимальная естественная депрессия среди естественных депрессий l контуров.

Учитывая это, решение сформулированной задачи нелинейного программирования можно свести к определению контура с максимальной естественной депрессией и вычислению сопротивлений дросселирующих устройств в совокупности с решением системы уравнений (2д).

Вследствие нелинейности системы уравнений (2д) решение нашей задачи при $l < S$ может быть получено только итерационными методами. Решение системы уравнений (2д) при условии (4) эквивалентно решению задачи дискретного моделирования для системы $(S - l)$ независимых контуров, методы решения которой изложены в работе [3]. Рассмотрим последовательность математических и логических операций на k -й итерации решения рассматриваемой задачи оптимального управления, используя метод Ньютона решения системы уравнений (2д) при условии (4), известных значениях дебитов в l связях сети и дебитах в остальных $(S - l)$ связях, полученных на $(k - 1)$ -й итерации.

1. По формуле (2б) определяем дебиты при k -м приближении в ветвях дерева сети

$$q_i^{(k)} = \sum_{r=1}^l k_{2ri} q_r + \sum_{r=l+1}^S k_{2ri} q_r^{(k)}. \quad (5)$$

2. Из (3) определяем естественные депрессии S контуров при воздухо-распределении $q^{(k)}$

$$H_r^{(e)} = \text{sign } q_r^{(k)} r_r |q_r^{(k)}|^{n_r} + \sum_{i=S+1}^m k_{2ri} \text{sign } q_i^{(k)} \cdot r_i |q_i^{(k)}|^{n_i}; \quad (r = 1, \dots, S). \quad (6)$$

3. Методом сравнения выбираем максимальную естественную депрессию среди естественных депрессий l контуров и согласно (4) приравниваем ее $h_m^{(b)}$

$$h_m^{(b)(k)} = H_{k \max}^{(e)(k)}. \quad (7)$$

4. Определяем сопротивления дросселирующих устройств в ветвях дерева сети

$$r_{p(r+S-l_1)} = \frac{H_{k \max}^{(e)(k)} - H_r^{(e)(k)}}{\text{sign } q_{(r+S-l_1)} |q_{(r+S-l_1)}|^{n_{(r+S-l_1)}}}; \quad (r = l_1 + 1, \dots, l). \quad (8)$$

5. Подставляем в уравнение (2д) значения дебитов и $h_m^{(b)}$ на k -м приближении. Полученную, отличную от нуля, правую часть этих уравнений обозначим $f_r^{(k)}$.

$$f_r^{(k)} = H_r^{(e)(k)} + \sum_{i=S+1}^{S+\theta} k_{2ri} \text{sign } q_i^{(k)} r_{pi} |q_i^{(k)}|^{n_i} \quad (r = l + 1, \dots, S). \quad (9)$$

6. Сравним полученные $f_r^{(k)}$ по модулю с некоторой положительной наперед заданной величиной ϵ , определяющей точность решения задачи. Если $|f_r^{(k)}| - \epsilon \leq 0$ при всех r ($r = l + 1, \dots, S$), то воздухо-распределение $q^{(k)}$ соответствует требуемому при минимальной затрате мощности на проветривание сети и достигается при $h_m^{(b)} = H_{k \max}^{(e)(k)}$, $q_m = q_m^{(k)}$ и величинах сопротивлений дросселирующих устройств, определяемых по формулам (8) и

$$r_{pr} = \frac{H_{k \max}^{(e)(k)} - H_r^{(e)(k)}}{\text{sign } q_r^{(k)} |q_r^{(k)}|^{n_{pr}}}; \quad (r = 1, 2, \dots, l_1). \quad (10)$$

Если $|f_r^{(k)}| - \epsilon > 0$, хотя бы при одном r ($r = l + 1, \dots, S$), то переходим к операции 7.

7. Определяем матрицу Якоби (ω) [3] системы функций (2д) при k -м приближении и обращаем ее

$$\begin{aligned} \text{а) } [\omega_{(r-l)(k-l)}]_{r=k}^{(k)} &= \left(\frac{\partial f_r}{\partial q_k} \right)_{r=k}^{(k)} = n_r \text{sign } q_r^{(k)} r_r |q_r^{(k)}|^{n_r-1} + \sum_{i=S+1}^{S+\theta} n_{pi} \text{sign } q_i^{(k)} \times \\ &\times r_{pi} |q_i^{(k)}|^{n_{pi}-1} (k_{2ki}) + \sum_{i=S+1}^m n_i \text{sign } q_i^{(k)} r_i |q_i^{(k)}|^{n_i-1} (k_{2ri})^2, \quad (r, k = l + 1, \dots, S); \\ \text{б) } [\omega_{(r-l)(k-l)}]_{r \neq k}^{(k)} &= \sum_{i=S+1}^{S+\theta} n_{pi} \text{sign } q_r^{(k)} \cdot r_{pi} |q_i^{(k)}|^{n_{pi}-1} \times k_{2ri} \cdot k_{2ki} + \\ &+ \sum_{i=S+1}^m n_i \text{sign } q_i \times r_i |q_i|^{n_i-1} k_{2ri} k_{2ki}, \quad (r, k = l + 1, \dots, S). \end{aligned} \quad (11)$$

8. Находим дебиты $(k+1)$ -го приближения в связях сети $|(l+1) \div S|$ и переходим к повторному циклу вычислений

$$\bar{q}_1^{xx(k+1)} = \bar{q}_1^{xx(k)} - \omega^{-1} (\bar{q}^{(k)}) \bar{f}^{xx} (\bar{q}^{(k)}). \quad (12)$$

Здесь $q_1^{xx} = (q_{l+1}, \dots, q_S)$; $\bar{f}^{xx} = (f_{l+1}, \dots, f_S)$.

Блок-схема программы, реализующая эту последовательность вычислений на ЭВМ, приведена на рис. 1.

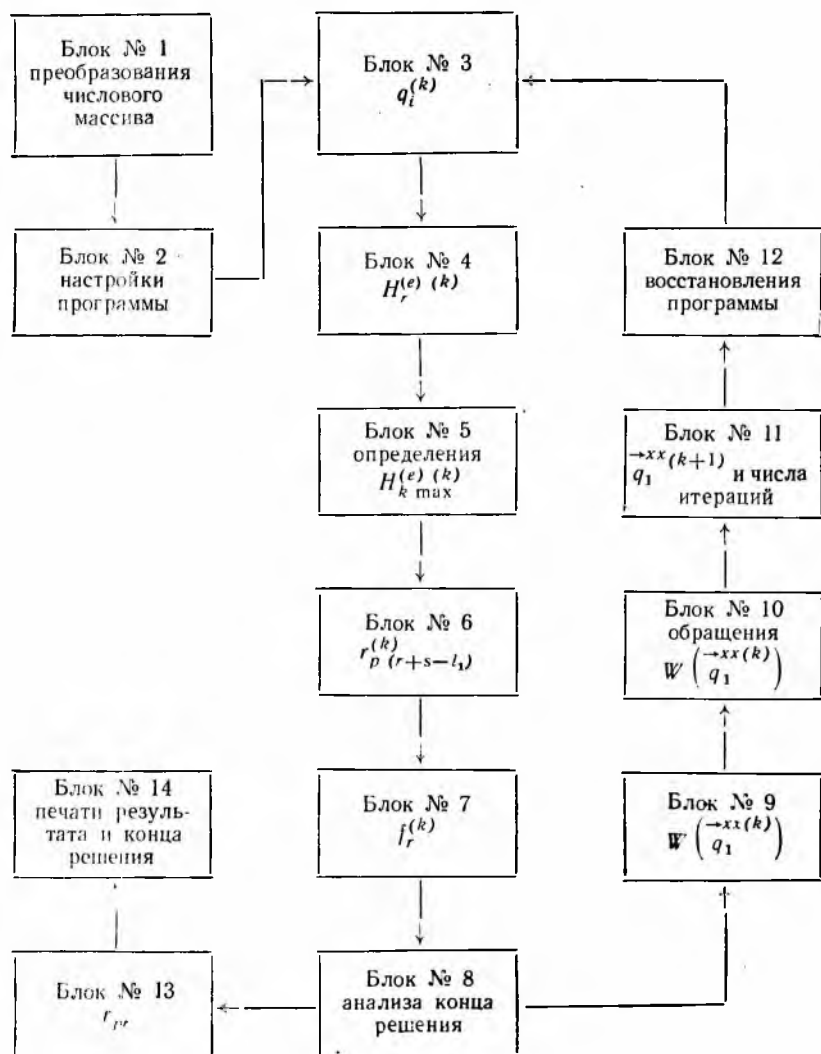


Рис. 1.

Блок преобразования числового массива осуществляет перевод числового материала из одной системы счисления в другую; блок настройки программы настраивает программу на сеть новой топологии и требуемую точность расчета; блоки $q_i^{(k)}$, $H_r^{(e)}$, $H_{k \max}^{(e)}$, $r_p^{(k)}(r+s-l_1)$, $f_r^{(k)}$, $W^{-1}(\bar{q}_1^{xx(k)})$, $\bar{q}_1^{xx(k+1)}$ осуществляют вычисления соответственно по формулам (5), (6), (7), (8), (9), (11), (12), (10); блок $W^{-1}(\bar{q}_1^{xx(k)})$ производит обращение матрицы Якоби; блок восстановления программы восстанавливает программу в исходное состояние для следующей итерации; блок анализа конца решения проверяет выполнение пункта 6 и в зависимости от результата проверки передает управление или блоку r_{pr} , или блоку $W^{-1}(\bar{q}_1^{xx(k)})$; блок печати результата и конца решения производит печать результата, фиксируя окончание решения задачи.

По данной блок-схеме была составлена универсальная программа решения рассматриваемой задачи на ЭВМ М-20 и исследованы процессы оптимального регулирования воздухораспределения в ряде конкретных шахтных вентиляционных сетей.

На рис. 2 приведена шахтная вентиляционная сеть шахты № 19 треста Рутченковуголь. Эта сеть (по данным депрессионных съемок МакНИИ) состоит из 76 ветвей и 49 узлов. Цикломатическое число сети $S = 28$. В восьми ветвях сети необходимо держать требуемое воздухо-распределение с помощью регулируемого поверхностного вентилятора и восьми дросселирующих устройств. На рис. 2 произведена кодировка этой сети в соответствии с методом контуроразделения и правилами,

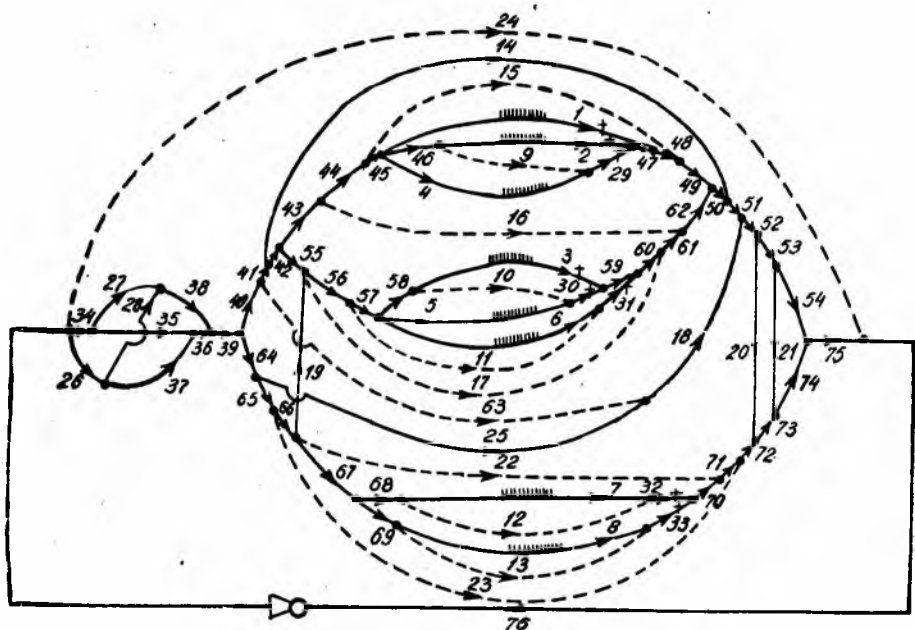


Рис. 2.

изложенными в настоящей статье. Первые три ветви являются связями с заданными дебитами и дросселирующими устройствами. Ветви (4—8) — связи с заданными дебитами. В ветвях дерева сети 29—33 расположены дросселирующие устройства. Коэффициенты турбулентности сети одинаковы и равны двум. Величины аэродинамических сопротивлений ветвей и начальные значения дебитов в нерегулируемых связях сети (согласно депрессионным съемкам МакНИИ) приведены в табл. 1. Матрица контуров для ветвей дерева сети приведена на рис. 3.

Необходимо определить параметры регулирующих органов $h_{70}^{(b)}$, $q_{76}^{(b)}$ и $r_{p1} \div r_{p3}$, $r_{p29} \div r_{p33}$, при которых в ветвях сети (1—8) установится соответственно воздухо-распределение (4; 4; 3,5; 4; 5; 5,5; 7; 7) при минимальной затрате мощности на проветривания сети. Точность решения $\epsilon = 0,01$. На решение этой задачи на ЭВМ М—20 было затрачено 15 минут машинного времени. Требуемая точность была достигнута на 50-ой итерации. Результаты решения приведены в табл. 1.

Алгоритм оптимального управления установившимся воздухо-распределением в шахтной вентиляционной сети позволяет решать некоторые задачи синтеза регулирующих органов. Рассмотрим одну из этих задач.

Имеется сеть определенной конфигурации. Способ регулирования и расположение регулирующих органов известны. В ряде ветвей сети заданы требуемые дебиты, причем известно, что в процессе регулирования значения этих дебитов могут изменяться в пределах $\bar{q}_{l \min}^* \div \bar{q}_{l \max}^*$, определяемых требованиями техники безопасности и правилами технической эксплуатации.

$$\bar{q}_{l \min}^* = (q_{l \min}, \dots, q_{l \min}).$$

$$\bar{q}_{l \max}^* = (q_{l \max}, \dots, q_{l \max}).$$

Необходимо определить диапазон изменения координат регулирующих органов (области изменения рабочих режимов вентиляторов и аэродинамических сопротивлений дросселирующих устройств), позволяющий осуществить регулирование в указанном диапазоне изменения требуемых дебитов.

Для комбинированного способа регулирования, приведенного в настоящей статье, решение этой задачи сводится к расчету ряда вариантов по полученному алгоритму при заданном воздухораспределении, определяемом некоторыми комбинациями из компонент векторов $\bar{q}_{l \min}^*$ и $\bar{q}_{l \max}^*$.

Нижняя граница рабочей области вентилятора ($h_{m \min}^{(b)}, q_{m \min}$) определяется путем решения задачи оптимального управления воздухораспределением при заданном векторе $\bar{q}_{l \min}^*$, а верхняя ($h_{m \max}^{(b)}, q_{m \max}$) — при заданном векторе $\bar{q}_{l \max}^*$.

Решение этой же задачи при воздухораспределении $\bar{q}_l = (q_{l \max}, \dots, q_{(r-1) \max}, q_{r \min}, q_{(r+1) \max}, \dots, q_{l \max})$ позволяет определить верхний диапазон изменения сопротивления дросселирующего устройства, входящего в контур, образованный r -й связью с требуемым расходом воздуха.

Таким образом, для определения требуемого диапазона изменения координат регулирующих органов при рассматриваемом комбинированном способе регулирования необходимо решить $(l+2)$ варианта задачи оптимального управления воздухораспределением при заданных значениях дебитов в l связях сети.

Решение задачи синтеза регулирующих органов для сети, приведенной на рис. 2, показало, что при регулировании воздухораспределения в пределах от $\bar{q}_{l \min}^* = (2,9; 2,7; 2,9; 2,7; 4; 4; 6,2; 6,6)$ до $\bar{q}_{l \max}^* = (3,66; 3,36; 3,62; 3,39; 4,96; 5,1; 7,7; 8,28)$ координаты регулирующих органов должны изменяться в следующем диапазоне: $h_{76 \min}^{(b)} = 228,7$; $q_{76 \min} = 59,07$; $h_{76 \max}^{(b)} = 368,57$; $q_{76 \max} = 73,83$; $r_{pi} = (1,677; 1,576, 1,923)$ ($i = 1 \div 3$), $r_{pi} = (0,949; 0,775; 0,922; 0,642; 0,639)$ ($i = 29 - 33$).

Для обеспечения регулирования воздухораспределения в этой сети в пределах от $\bar{q}_{l \min}^* = (2,9; 2,7; 2,9; 2,7; 4; 4; 6,2; 6,6)$ до $\bar{q}_{l \max}^* = (4,3; 4; 4,3; 4; 6,6; 6; 9,1; 9,8)$ область изменения рабочих режимов вентилятора главного проветривания должна лежать в пределах от $h_{76 \min}^{(b)} = 228,7$ и $q_{76 \min} = 59,07$ до $h_{76 \max}^{(b)} = 500,1$ и $q_{76 \max} = 87,75$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Алгоритмы оптимального управления распределением воздуха в шахтных вентиляционных сетях. ГОСИНТИ, 1965.
2. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Математическое описание и дискретное моделирование на ЭВМ установившихся процессов потокораспределения в гидравлических сетях. ГОСИНТИ, 1964.