

К ВОПРОСУ СИНТЕЗА АНАЛИТИЧЕСКОЙ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ШАХТ

А. А. Волков

Харьков

Задача оптимального управления проветриванием шахт в соответствии с ее общей постановкой [1] может быть решена как путем построения аналитических (вычислительных) самонастраивающихся систем управления, использующих управляющие вычислительные машины (УВМ), так и путем построения многосвязных самооптимизирующихся систем со специализированными логическими устройствами. Принципы построения аналитических самонастраивающихся систем управления проветриванием шахт могут быть положены в основу функционирования систем диспетчерского контроля и управления, использующих информационно-логические машины — советчики диспетчера.

Общие вопросы теории приспособляющихся систем и их частного случая — аналитических самонастраивающихся систем — изложены в работах [2, 3]. В данной статье рассматриваются некоторые специфические вопросы построения аналитических самонастраивающихся систем оптимального управления проветриванием шахт.

Система проветривания шахты представляет собой весьма сложную пространственную вентиляционную сеть с рассредоточенными в ней активными (вентиляторами) и пассивными (дресселирующими устройствами) регулирующими органами. Изменение координат регулирующих органов приводит к изменению потокораспределения в сети, т. е. к изменению дебитов (потоков) воздуха и депрессий (падений напоров) в отдельных ее ветвях. При этом заданное значение дебитов воздуха в сети достигается бесконечным множеством состояний координат ее регулирующих органов, что соответствует бесконечному множеству состояний потокораспределения в сети, отличающихся только значениями депрессий в ее ветвях.

На последнем множестве существует оптимальное по расходу мощности потокораспределение, при котором мощность, затрачиваемая на проветривание, минимальна. Отсюда возникает первая частная задача оптимального управления проветриванием шахт — оптимальное управление потокораспределением в сети.

Значения дебитов воздуха в ветвях сети, включающих добычные участки шахты, устанавливаются не произвольно, а в зависимости от статических и динамических свойств объектов проветривания и действующих в них возмущений таким образом, что состояние рудничной атмосферы на участке отвечает требованиям техники безопасности и технической эксплуатации для шахт. Следовательно, для отдельных объектов

проветривания (участков) шахт регулируемыми величинами являются параметры, определяющие состояние рудничной атмосферы участка, а регулирующими воздействиями — дебиты воздуха. Процесс регулирования состояния рудничной атмосферы характеризуется некоторым показателем качества, экстремальное значение которого соответствует оптимальному управлению объекта. Здесь возникает вторая частная задача оптимального управления проветриванием шахт — оптимальное управление состоянием рудничной атмосферы объектов проветривания.

Наконец, для решения вышеуказанных задач необходимо определить статические и динамические характеристики объектов проветривания (участков) шахты и элементов вентиляционной сети. Ввиду того, что указанные характеристики изменяются, они должны определяться в процессе нормальной эксплуатации системы. Таким образом, возникает третья частная задача — оптимальное определение характеристик управляемой системы.

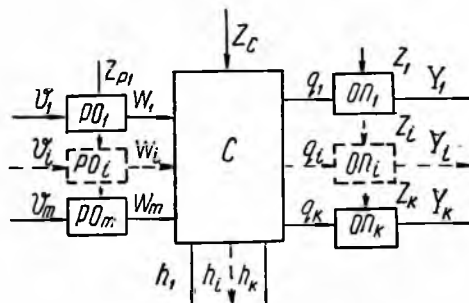


Рис. 1.

В аналитической самонастраивающейся системе оптимального управления проветриванием шахт все указанные задачи должны быть увязаны; решаются они управляющей системой автоматически.

Выясним математическую формулировку и пути решения первых двух частных задач оптимального управления проветриванием шахт. Представим систему проветривания шахты в виде структурной схемы (рис. 1), состоящей из конечного множества объектов проветривания ОП_i ($i = 1, \dots, k$), управляющие сигналы для которых q_i , $i \in k$ формируются в вентиляционной сети посредством изменения координат W_j , $j \in L$, сосредоточенных в сети регулирующих органов РО_j, ($j = 1, 2, \dots, l$).

Состояние вентиляционной сети определяется вектором входных переменных $\bar{W} = (W_1, W_2, \dots, W_m)$, характеризующим координаты регулирующих органов системы, и вектором выходных переменных $\bar{S} = (\bar{q}, \bar{h})$, характеризующим состояние воздушораспределения в сети. Последний состоит из двух составляющих: вектора $\bar{q} = (q_1, \dots, q_n)$, определяющего координаты дебитов воздуха в ветвях вентиляционной сети, и вектора $\bar{h} = (\bar{h}_1, \dots, \bar{h}_m)$, определяющего депрессии в этих ветвях. Входными регулирующими переменными объектов проветривания ОП_i ($i = 1, \dots, k$) являются дебиты воздуха q_i , а выходными регулируемыми переменными — элементы $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \dots$ множества $Y_i = \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \dots\}$, которые представляют собой векторы фазовых координат, определяющих состояние рудничной атмосферы данного объекта проветривания i -той ветви вентиляционной сети, например, значения концентраций различных газов в рудничной атмосфере и их производные, температуру воздуха и ее производные и т. п.

На практике из всего множества выходных переменных определяющую роль играют лишь некоторые из них, например, фазовые координаты, концентрации метана α_i , ($i = 1, 2, \dots, k$). В таких случаях можно считать, что выходными переменными объектов проветривания являются фазовые координаты одной переменной $\alpha_i = (\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots)$. Состояние рудничной атмосферы всех объектов проветривания шахты характеризуется

вектором $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_k)$. Состояние регулирующих органов PO_j , ($j = 1, 2, \dots, l$), пространственно рассредоточенных в ветвях вентиляционной сети, определяется их обобщенными выходными W_j координатами, которые могут представлять собой, например, значения аэродинамических сопротивлений, пассивных регулирующих устройств, скорость вращения или угол установки направляющего аппарата активных регулирующих органов и т. п. Входные переменные регулирующих органов V_j являются сигналами, например электрическими, определяющими требуемые значения выходных переменных W_j . Регулирующие органы систем проветривания могут представлять собой своего рода следящие системы замкнутого или разомкнутого типов.

Состояние проветривания шахты в общем случае определяется некоторым вектором $\bar{D} = (\bar{S}, \bar{Y})$, состоящим из векторных компонент $\bar{S}$, $\bar{Y}$. Вектор этот может изменяться под влиянием следующих факторов: а) «внешних» условий или возмущающих воздействий (внешние атмосферные условия, работа добычных машин, взрывные работы в шахте и т. п.); вся доступная информация о них выражается некоторым вектором $\bar{Z}$; б) «внутренних» условий, т. е. неконтролируемых или независящих от управляющей системы изменений динамических свойств объектов проветривания, параметров вентиляционной сети и регулирующих органов; в) управляющих воздействий $\bar{V}$, т. е. контролируемых изменений координат регулирующих органов системы проветривания.

Вследствие того, что «внешние» и «внутренние» условия работы системы во всей своей совокупности изменяются как случайные функции времени, а также вследствие турбулентного движения воздуха во многих ветвях сети, при котором вектор $\bar{S}$ может быть найден только статистически [4], состояние рудничной атмосферы определяется случайным вектором $\bar{Y}$. Система проветривания в общем случае является стохастической, что значительно усложняет синтез оптимального управления проветриванием. Эта задача намного упрощается, если рассматривать систему как детерминированную, т. е. оперировать с усредненными значениями координат системы, определяемыми обычно на практике.

Цель управления проветриванием состоит в оптимальном обеспечении требуемого состояния проветривания шахты. Понятие «требуемое состояние проветривания» — это наибольшее соответствие системы требованиям техники безопасности и технической эксплуатации, гигиеническим условиям работы в шахте. В соответствии с этими требованиями ограничиваются обычно изменения векторных переменных $\bar{Y}$ и $\bar{q}$ допустимыми для них областями $\Omega_1(\bar{Y})$, $\Omega_2(\bar{q})$ в соответствующих им векторных пространствах. Это можно записать так:

$$\bar{Y} \in \Omega_1(\bar{Y}); \bar{q} \in \Omega_2(\bar{q}). \quad (1)$$

Для отдельных составляющих фазовых координат векторных переменных эти ограничения выражаются зависимостями

$$q_i \min \leq q_i \leq q_i \max;$$

$$\alpha_{ij} \min \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{ij} \max.$$

Понятие «оптимальным образом» может конкретизироваться по-разному для различных структурных элементов (подсистем управляемой системы — рис. 1), допускающих необходимую автономию в построении их оптимальных управлений. Эта автономия выражается в возможности независимого выбора критериев оптимальности для каждой из этих подсистем, что обусловлено как отличиями в их назначении, так и несоизмеримостью

длительностей переходных процессов, возникающих в объектах проветривания ОП_i, $i \in k$ и в вентиляционной сети С. Пренебрегая инерционностью процессов потокораспределения в сети С, эту управляемую подсистему можно рассматривать как систему без памяти. Для такой подсистемы формулируется первая частная задача оптимального управления воздушораспределением в сети при заданных значениях дебитов воздуха. В качестве критерия оптимальности Q_0 принимается расход мощности на проветривание

$$Q_0 = Q_0(\bar{h}, \bar{q}). \quad (2)$$

Выражение (2) при полной информации о его векторных координатах $\bar{h}$ и $\bar{q}$ имеет вид:

$$Q_0 = \sum_{i=1}^m h_i q_i, \quad (3)$$

где h_i , q_i — средние значения депрессий и дебитов в отдельных ветвях сети.

Если заданы значения дебитов воздуха в сети, т. е. определен вектор $\bar{q} = \bar{q}^*$, то оптимальное состояние воздушораспределения достигается при минимизации функционалов (2) или (3) путем изменения вектора депрессий $\bar{h}$.

При этом

$$Q_{0 \min} = \min_{h \in \Omega_3(h)} Q_0(\bar{h}, \bar{q}^*), \quad (4)$$

где $\Omega_3(h)$ — допустимая область изменения вектора депрессий, обусловленная техническими возможностями регулирующих органов и параметрами сети, а также правилами технической эксплуатации шахт.

Вектор депрессий $\bar{h}$ при заданном векторе дебитов $\bar{q}^*$ является функцией вектора $\bar{W}$ координат регулирующих органов, т. е.

$$\bar{h} = \bar{h}(\bar{q}^*, \bar{W}), \quad (5)$$

причем изменение вектора $\bar{W}$ ограничено некоторой допустимой областью

$$\bar{W} \in \Omega_4(\bar{W}). \quad (6)$$

функционально связанной с допустимой областью $\Omega_3(\bar{h})$ вектора депрессий.

Используя (5) и (6), выражение (4) можно записать таким образом:

$$Q_{0 \min} = \min_{\bar{W} \in \Omega_4(\bar{W})} Q_0(\bar{h}, \bar{q}^*). \quad (7)$$

Таким образом, минимизируем функционал (2) путем изменения вектора координат регулирующих органов. При этом минимальному значению этого функционала будет соответствовать оптимальное управление или оптимальное значение вектора $\bar{W}^*$ координат регулирующих органов.

При минимизации функционалов (2) или (3) должны удовлетворяться как ограничения (1) и (6), накладываемые на изменения векторных координат, так и системы уравнений математического описания процессов воздушораспределения в сети. Для получения последних наиболее удобно воспользоваться методом моделирующих графов, позволяющим максимально формализовать этот процесс и эффективно использовать цифровые вычислительные машины, в частности, для выбора базиса независимых обобщенных узлов (или циклов) сети и для целенаправленной ее кодировки.

Математическое описание конечных состояний потокораспределения в вентиляционной сети определяется системой уравнений отдельных ее ветвей

$$h_i = h_i(q_i, W_i), \quad i \in M, \quad (8)$$

устанавливающих связь между депрессиями h_i и дебитами q_i в отдельных ветвях и системой матричных уравнений

$$\begin{aligned} \bar{q}_I &= -A_2 \bar{q}_{II}; \\ h_{II} &= A_2' \bar{h}_I, \end{aligned} \quad (9)$$

определяющих взаимосвязь между депрессиями и дебитами различных ветвей сети.

Здесь

$$\bar{q}_I = (q_1, \dots, q_n); \quad \bar{h}_I = (h_1, \dots, h_n);$$

n — мерные векторы дебитов и депрессий в ветвях, соответствующих некоторому дереву моделирующего графа сети:

$$\bar{q}_{II} = (q_{n+1}, \dots, q_m), \quad \bar{h}_{II} = (h_{n+1}, \dots, h_m);$$

$(m - n)$ — мерные векторы дебитов и депрессий в ветвях, соответствующих антидереву моделирующего графа сети, имеющего $(n + 1)$ вершин;

A_1 и A_2' — линейные операторы, зависящие от топологии сети, матричные выражения которых могут быть получены из матрицы инцидентий графа сети; при этом матрица A_2' получается транспонированием A_2 .

В работах [5]—[6] даются примеры математического описания конечных состояний потокораспределения в вентиляционных сетях.

Задача отыскания оптимального управления W^* путем минимизации функционала (2) при соблюдении ограничивающих условий (1), (2), (6) и удовлетворении систем уравнений потокораспределения в сети (8) и (9) в общем случае является задачей нелинейного программирования. В ряде практически важных случаев рассматриваемая задача сводится к линейному программированию.

Алгоритмы оптимального управления конечным состоянием потокораспределения в шахтных вентиляционных сетях для этих случаев получены в работе [7].

Подобные алгоритмы могут реализоваться на цифровых вычислительных машинах или специализированных блоках информационно-логических машин «советчик диспетчера».

Для определения требуемых значений дебитов воздуха $\bar{q}^*$ необходимо решить вторую частную задачу — задачу синтеза оптимального управления состоянием рудничной атмосферы объектов проветривания.

В качестве критерия оптимальности мы выбираем некоторый функционал Q_i , ($i = 1, 2, \dots, k$) характеризующий качество процесса регулирования состояния рудничной атмосферы, например, интегральный критерий качества

$$Q_i = \int_0^1 \varphi |x(t)| dt, \quad (10)$$

где $\varphi |x(t)|$ — определено положительно непрерывно-дифференцируемая на $x(t)$ функция;

при этом траектории $x_0(t)$ оптимальных газодинамических переходных процессов объектов проветривания должны удовлетворять уравнениям динамики этих объектов.

Уравнения динамики линейных моделей объектов могут быть определены по характеристикам их случайных процессов [8]—[11], а также вероятностными методами [2], [3].

В общем случае система уравнений i -того объекта имеет вид:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^l a_{ij}x_j + b_i U, \quad i = 1, \dots, l. \\ |U| \leq \delta \quad (11)$$

где x_j , ($j = 1, \dots, l$) — фазовые координаты i -того объекта проветривания;

a_{ij} , b_i — постоянные вещественные коэффициенты;

U — вещественная скалярная функция, называемая функцией управления (в качестве U может служить или одна из ее производных);

δ — предельно допустимое значение модуля функции управления.

Требуется определить управление $U_0(x)$, $|u| \leq \delta$ таким образом, чтобы соответствующее решение $x(t)$ уравнения (11) удовлетворяло граничным условиям

$$x(0) = x_0, \quad x_0 \in \Omega_0(x), \quad x(T) = 0 \quad (12)$$

и обращало в минимум функционал (10).

Как известно [12] решение поставленной задачи имеет вид:

$$U_0(x) = \delta \operatorname{sign} \Phi(x), \quad (13)$$

где $U_0(x)$ — оптимальное управление;

$\Phi(x)$ — функция переключения.

Из выражения (13) следует, что задача синтеза оптимального управления сводится к отысканию функции переключения $\Phi(x)$. Точные методы отыскания этой функции существуют лишь для случая, когда $\varphi(x) \equiv 1$, а корни характеристических уравнений системы (11) имеют вещественные неположительные значения [13].

В общем же случае точных приемов определения функции $\Phi(x)$ не существует, и она находится приближенными методами. В частности, приводятся методы, с помощью которых функция $\Phi(x)$ аппроксимируется алгебраическими многочленами. Для решения поставленной задачи наиболее эффективным является приближенный метод синтеза оптимального управления, основанный на методе наименьших квадратов. Согласно этому методу, составляются следующие уравнения [14]:

$$\sum_{i,j=1}^l a_{ij}x_j \frac{\partial z_{ik}}{\partial x_i} - \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n b_i \frac{\partial z_{ik}}{\partial x_i}\right)^2 + \frac{1}{k+m}} + \varphi = 0, \quad (14)$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$; m — положительное конечное число, которое выбирается из условия улучшения сходимости.

При каждом фиксированном k уравнение (14) решается приближенно при помощи метода наименьших квадратов [15]

$$z_{kl} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot \psi_i,$$

где d_i — вещественные коэффициенты, подлежащие определению методами, изложенными в [15];

ψ_i — координатные функции, представляющие собой совокупности степеней $x_1^{i_1} \dots x_n^{i_n}$ переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$; при этом $i_1 + i_2 + \dots + i_n = 0, 1, 2, \dots$

Приближенное оптимальное управление находим по формуле

$$U_0(x) \approx -\delta \operatorname{sign} \sum_{j=1}^l b_j \frac{\partial z_k}{\partial x_j}. \quad (15)$$

В случае, когда степень приближения такова, что z_{kl} является алгебраическим многочленом второй степени, функция переключения аппроксимируется линейной формой, и приближенное оптимальное управление имеет вид

$$U_0(x) \approx -\delta \operatorname{sign} \sum_{j=1}^l C_j x_j. \quad (16)$$

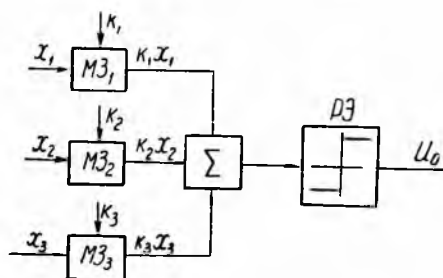


Рис. 2.

Полученный алгоритм оптимального управления легко реализуется на простейших вычислительных устройствах.

Это можно проиллюстрировать на примере объекта проветривания, описываемого следующей системой

уравнений, полученной статистическими методами:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11}x_1; \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + b_2U; \\ \dot{x}_3 &= b_3U; \quad |U| \leq 1; \quad \delta = 1, \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1; \quad a_{21} = -1; \quad a_{22} = -2,36; \quad a_{23} = -1,3; \\ b_2 &= 5,77; \quad b_3 = 1; \quad \lambda_1 = -1,8; \quad \lambda_2 = -0,56; \quad \lambda_3 = 0. \end{aligned}$$

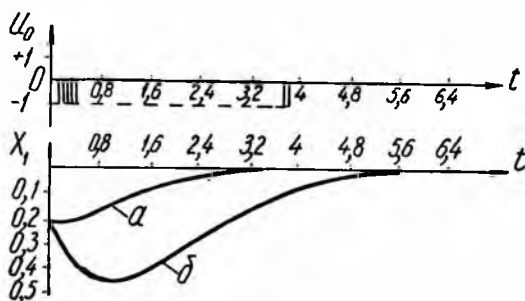


Рис. 3.

Здесь $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — корни характеристического уравнений системы (17).

Пусть фазовые координаты имеют следующие начальные значения:

$$x_1(0) = 0,2; \quad x_2(0) = 0; \quad x_3(0) = 0,75. \quad (18)$$

При этих условиях, решив уравнения (14), получим приближенно оптимальное управление вида

$$U_0(x) = \operatorname{sign}(10,2x_1 + 8,73x_2 + 169,4x_3). \quad (19)$$

Непосредственной подстановкой (18) в (19) устанавливаем — отрицательный ли знак управления на первом интервале, т. е. $U_0(x) = -1$.

На рис. 2 приведена структурная схема управляющей части, реализующей алгоритм (19), а на рис. 3 — графики переходных процессов по управляемой координате x_1 в приближенно оптимальной (кривая а) и неоптимальной (кривая б) системах. Сравнивая эти кривые, видим, что время переходного газодинамического процесса уменьшается примерно в два раза по сравнению с временем переходного процесса неоптимальной системы.

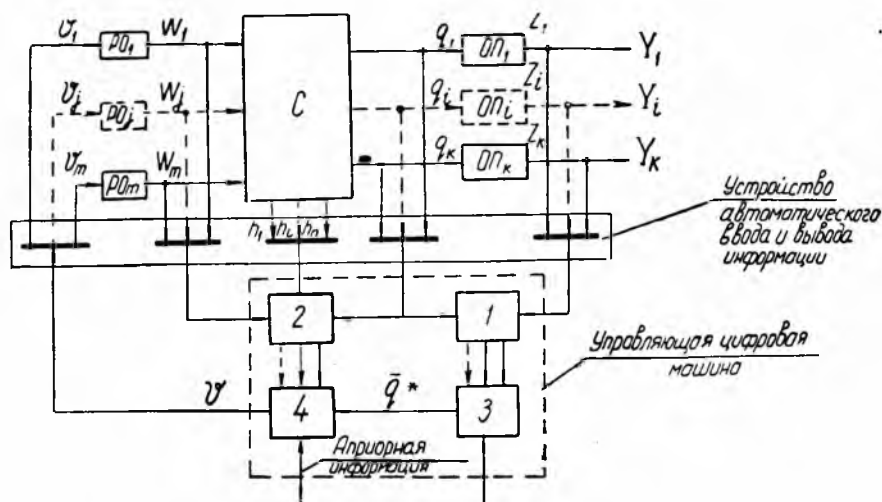


Рис. 4.

Рассмотренные общие принципы оптимального управления проветриванием шахт можно реализовать построением аналитической самонастраивающейся системы управления, структурная схема которой представлена на рис. 4.

Связь между управляемой и управляющей системами осуществляется здесь при помощи устройства автоматического ввода и вывода информации, включающего в себя преобразователи типов «аналог-код» и «код-аналог» и блоки автоматической коммутации.

Управляющая система состоит из блоков 1 и 2, служащих соответственно для оценки фазовых координат и определения динамических характеристик объектов проветривания параметров и характеристик вентиляционной сети и блоков 3 и 4, служащих для получения оптимального управления состоянием рудничной атмосферы объектов проветриванием и потокораспределением в вентиляционной сети соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Волков. Постановка задач оптимального управления проветривания шахт. В кн. «Механизация и автоматизация проветривания шахт», под ред. акад. АН УССР А. Н. Щербаня. Госуд. комитет СМУССР по координации научн.-исслед. работ., Ин-т техн. информации, Киев, 1965.
2. Приспосабливающиеся автоматические системы, под ред. Э. Мишкина и Л. Брауна. Изд-во иностр. лит-ры, 1963.
3. Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления, под ред. В. В. Солодовникова. Изд-во «Машиностроение», 1963.
4. А. С. Монин, А. М. Яглом. Статистическая гидромеханика, ч. I. Изд-во «Наука», 1965.
5. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Математическое описание установившихся процессов воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт. «Изв. вузов», «Горный журнал», 1965, № 2.

6. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Математическое описание и дискретное моделирование на ЭВМ установившихся процессов потокораспределения в гидравлических сетях, № 5-64-1130/31. ГОСИНТИ, 1964.

7. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Алгоритмы оптимального управления распределением воздуха в шахтных вентиляционных сетях № 5-65-328/8, ГОСИНТИ, М., 1965.

8. А. А. Волков, В. П. Чуберкис. Характеристики случайных процессов, определяющих проветривание участка «Технология и экономика угледобычи», 1965, № 2.

9. А. А. Волков, В. П. Чуберкис, К. К. Бусыгин. Характеристики метановыделения как случайного процесса. «Горная электромеханика и автоматика», вып. 3. Изд-во ХГУ, Харьков, 1965.

10. А. А. Волков, В. П. Чуберкис. Стационарность случайных процессов, определяющих проветривание добычного участка, «Технология и экономика угледобычи». ЦНИИТЭИ угля, № 7, 1955.

11. А. А. Волков, В. П. Чуберкис. Вероятностные методы анализа газодинамических процессов в системах оптимального управления проветриванием шахт. Сб. «Приборы и средства автоматизации и телемеханики», вып. 1. Изд-во ХГУ, Харьков, 1965.

12. Л. С. Понтрягин и др. Математическая теория оптимальных процессов. Физматгиз, 1961.

13. А. А. Фельдбаум. Основы теории и оптимальных автоматических систем. Физматгиз, 1963.

14. А. А. Волня, И. П. Лыткин, Ю. Н. Соколов. Построение приближенных алгоритмов оптимального управления проветриванием добычных участков шахт. Горные машины и автоматика. изд. «Недра», № 2, 1967 г.

15. С. Г. Михлин. Вариационные методы в математической физике. Гостехиздат, 1957.
