

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЯХ

А. А. Волков

Харьков

Современные достижения кибернетической техники передачи и переработки информации, а также ее важнейшего направления — автоматики, открывает возможность для создания сложных автоматических систем, состоящих из большого количества взаимосвязанных элементов (объектов). К подобным автоматическим системам могут быть отнесены системы автоматического управления распределением потоков в сложных сетях (вентиляционных, энергетических, газовых, водопроводных, транспортных и т. п.).

В теории и принципах построения подобных систем имеется много общего, что в ряде случаев позволяет производить широкое обобщение результатов разработки конкретных систем данного класса.

При разработке конкретных оптимальных автоматических систем возникают в первую очередь следующие задачи [1, 2]:

1. Математическое описание или моделирование управляемой системы, т. е. определение зависимостей между координатами системы.

2. Математическая формулировка требований, предъявляемых к поведению управляемой системы. К ним относится определение требуемого закона изменения регулируемых координат системы и накладываемых на них ограничений, установление критерия оптимальности, т. е. показателя эффективности достижения цели управления.

3. Определение алгоритма оптимального управления или стратегии управляющей системы, при которой критерий оптимальности приобретает экстремальное значение.

Одной из частных задач данного класса систем является разработка оптимальных алгоритмов управления распределением потоков в гидравлических сетях при заданных их значениях, например, распределение дебитов воздуха в вентиляционных сетях шахт.

Структурная схема системы управления потокораспределением в гидравлической сети представлена на рисунке.

Здесь A — управляющая система, которая может представлять собой управляющую машину дискретного действия; B — управляемая система (гидравлическая сеть).

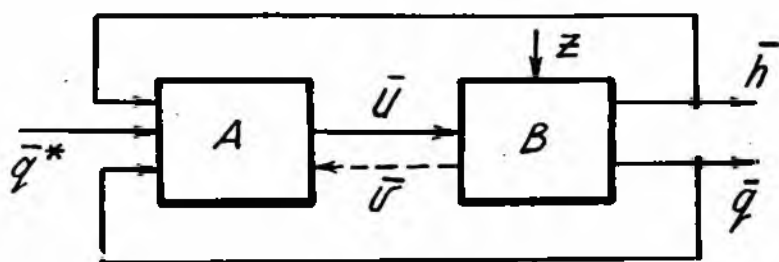
Между управляющей и управляемой системами происходит обмен информацией.

На вход управляющей системы A подается векторная переменная $\bar{q}^*$, представляющая собой информацию о заданных значениях дебитов. Составляющие вектора q_i^* относятся к отдельным ветвям сети и определяются в зависимости от задач, решаемых данной системой управления. В случае, например, системы управления проветриванием шахты

значения $\bar{q}^*$ будут определяться в зависимости от факторов, характеризующих состояние рудничной атмосферы с учетом требований, предъявляемых к ней Правилами безопасности ведения горных работ.

Управляющая система A должна содержать начальную (априорную) информацию об управляемой системе, вводимую в ее запоминающее устройство. К ней относится математическое описание управляемой системы или, по крайней мере, некоторые данные о ее характеристиках, входах и выходах, а также информация о цели управления.

В зависимости от характера рабочей и априорной информации в управляющей системе A об управляемой системе B системы управления могут быть подразделены на системы с полной и неполной информацией об управляемой системе [1]. Строго говоря, вследствие влияния на систему случайных возмущающих воздействий z , абсолютно полной информации об управляемой системе быть не может.



Управляющая система A должна содержать сведения об алгоритме управления, т. е. закономерности переработки априорной и рабочей информации о состоянии управляемой системы с целью получения управляющих сигналов $\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, воздействующих на регуляторы или регулирующие органы гидравлической сети.

Выясним некоторые особенности гидравлических сетей, как управляемых систем.

Гидравлические сети (например, вентиляционные), представляют собой сложные многомерные управляемые системы с распределенными параметрами, пространственно рассредоточенными в сети регулируемыми органами и взаимосвязанными переменными (координатами), которые характеризуют состояние системы.

Характеристики гидравлической сети, как управляемой системы, исчерпывающе определяются:

- а) параметрами ветвей сети;
- б) топологией сети.

Ветви гидравлической сети состоят из отдельных элементов — активных и пассивных. К активным элементам относятся вентиляторы, насосы, компрессоры и т. д., к пассивным — участки гидравлических сетей (трубопроводы, горные выработки и т. п.) и дросселирующие регулирующие органы.

Топология гидравлической сети не зависит от параметров отдельных ветвей, а определяется лишь геометрическим образом сети. Топология сети может быть однозначно определена некоторыми матрицами, позволяющими получить системы уравнений для всех узлов и независимых контуров сети.

Состояние потокораспределения гидравлической сети характеризуется:

- а) многомерной векторной переменной — потоком или дебитом $\bar{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, представляющим собой управляемую переменную;

б) многомерной векторной переменной — депрессией и т. падением напора

$$\bar{h} = (h_1, h_2, \dots, h_n).$$

Составляющие векторных переменных q_i и h_i представляют собой значения потоков и напоров в i -ой ветви сети. Они являются выходными переменными управляемых систем, причем вектор $\bar{q}$ является непосредственно управляемым.

Математическое описание [3] потокораспределения в гидравлической сети структурно определяется:

- а) системой уравнений, составленных для отдельных ветвей сети;
- б) системой уравнений, полученных из топологии сети.

В состав этих уравнений будут входить также координаты регулирующих органов, которые могут быть представлены в виде некоторого вектора $\bar{v}$. Составляющие v_i этого вектора $\bar{v} = (v_1, v_2, \dots, v_s)$ представляют собой координаты регулирующих органов, расположенных в различных ветвях сети.

В общем случае в ветвях гидравлической сети могут находиться как активные (насосы, вентиляторы и т. п.), так и пассивные (дросселирующие устройства) регулирующие органы.

Значительный практический интерес, в частности, представляет случай, когда потокораспределение производится пассивными регулируемыми органами в ветвях сети и одним или несколькими активными элементами (например, вентилятором главного проветривания в системе проветривания шахт), создающими необходимый напор во всей сети.

Регулирующие органы в ветвях сети могут управляться локальными регуляторами и непосредственно управляющей системой A . При этом управляющая система A должна вырабатывать управляющие переменные $\bar{u}$, представляющие в первом случае — требуемые значения выходных координат системы $\bar{q}$ и $\bar{h}$, а во втором — требуемые значения координат регулирующих органов $\bar{v}$. В обоих случаях управляющая система A должна получать рабочую информацию о состоянии потокораспределения в сети, т. е. о значениях векторов $\bar{q}$ и $\bar{h}$, а также о состоянии регулирующих органов или о значении вектора $\bar{v}$ (при определенных условиях последнее может не понадобиться). В дальнейшем будем рассматривать лишь второй тип системы управления.

На управляемую систему действует векторное возмущающее воздействие $\bar{z}$, влияющее на его выходные переменные $\bar{q}$ и $\bar{h}$.

Составляющие z_i вектора $\bar{z}$ относятся к различным элементам и ветвям сети. Эти возмущающие воздействия обычно являются случайными функциями времени. Непосредственное измерение таких возмущений невозможно, но их вероятностные характеристики могут быть определены управляющей системой по реакции управляемой системы, т. е. по флуктуациям векторных переменных $\bar{q}$ и $\bar{h}$, при условии, что координаты $\bar{v}$ регулирующих органов известны.

В общем случае математическое описание управляемой системы может быть условно представлено выражением

$$\bar{F}(\bar{q}, \bar{h}, \bar{v}, \bar{u}, \bar{z}) = 0. \quad (1)$$

Вектор возмущающих воздействий $\bar{z}$, входящий в данное выражение, может состоять из аддитивных и параметрических составляющих. Первые из них можно привести ко входам (регулирующим органам) управляемой системы B , а вторые изменяют параметры системы (т. е.

параметры элементов сети). Последние более характерны для данной системы.

Для получения алгоритма управления целесообразно считать возмущающие воздействия заранее известными (или определенными в процессе управления), поэтому их можно включить в состав оператора $\bar{F}$. Можно считать также, что координаты регулирующих органов $\bar{u}$ всегда соответствуют значениям управляющих воздействий $\bar{u}$. Тогда уравнение (1) может быть представлено в виде

$$\bar{F}(\bar{q}, \bar{h}, \bar{u}) = 0. \quad (2)$$

Наконец, если параметры системы не меняются, то ее состояние будет однозначно определяться лишь двумя векторными переменными $\bar{q}$ и $\bar{h}$, т. е. уравнение (2) получит вид:

$$\bar{F}(\bar{q}, \bar{u}) = 0. \quad (3)$$

Оператор $\bar{F}$ выражения (3) будет определяться топологией сети и параметрами отдельных ветвей сети.

Задача управления состоит в том, чтобы:

а) Обеспечить требуемый закон изменения управляемых переменных, т. е. зависимость

$$\bar{q} = \bar{q}^*. \quad (4)$$

При этом требуемые значения управляемых переменных $\bar{q}^*$ могут быть представлены некоторой допустимой областью их изменения $\Omega_1(\bar{q}^*)$.

Следовательно, в общем случае конец n -мерного вектора управляемой переменной $\bar{q}$ должен находиться в допустимой области $\Omega_1(\bar{q}^*)$ этого пространства, т. е.

$$\bar{q} \in \Omega_1(\bar{q}^*). \quad (5)$$

Область $\Omega_1(\bar{q}^*)$ определяется допустимой точностью поддержания управляемых переменных и конкретными особенностями управляемой системы.

Допустимая область изменения i -й составляющей вектора $\bar{q}$ определится выражением

$$q_{i \min}^* \leq q_i \leq q_{i \max}^*. \quad (6)$$

б) Соблюсти ограничения, накладываемые на изменения управляемых переменных $\bar{q}$ и координат регулирующих органов $\bar{u}$ или соответствующих им управляющих воздействий $\bar{u}$, т. е.

$$\bar{q} \in \Omega_2(\bar{q}); \quad (7)$$

$$\bar{u} \in \Omega_3(\bar{u}). \quad (8)$$

Допустимые области $\Omega_2(\bar{q})$ и $\Omega_3(\bar{u})$, которым должны принадлежать векторы $\bar{q}$ и $\bar{u}$, в данном случае определяются различными техническими условиями и специфическими требованиями к системе.

Например, в случае системы проветривания шахт составляющие q_i координат вектора $\bar{q}$ будут ограничены областью

$$q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max}. \quad (9)$$

При этом минимальное значение дебита воздуха $q_{i \min}$ будет определяться, исходя из требований Правил безопасности, в зависимости от коли-

чества людей на данном участке, работы машин и т. п. Максимальное значение составляющей $q_{i\max}$ будет ограничиваться предельно допустимым значением скорости движения воздуха по выработкам, определяемым Правилами безопасности.

Предельные значения $u_{i\min}$ и $u_{i\max}$ управляющих воздействий будут определяться техническими возможностями регулирующих органов, в частности, предельно возможными значениями их координат.

Из выражений (5) и (7) следует, что вектор $\bar{q}$ управляемой переменной должен одновременно принадлежать областям $\Omega_1(\bar{q}^*)$ и $\Omega_2(\bar{q})$.

Следовательно, значение его должно определяться пересечением этих областей:

$$\bar{q} \in \Omega(\bar{q}) = \Omega_1(\bar{q}^*) \cap \Omega_2(\bar{q}). \quad (10)$$

Выражение (10) определяет допустимую область изменения вектора управляемой переменной с учетом ограничений.

в) Обеспечить экстремальное (минимальное или максимальное) значение показателя эффективности системы управления или критерия ее оптимальности.

В общем случае этот критерий зависит от координат системы и времени и может относиться как к переходным, так и к установившимся процессам в системе.

При разработке оптимальных систем потокораспределения в сетях в качестве такого критерия может служить мощность, расходуемая на движение жидкости (или газа) в сети. Этот критерий может быть представлен, например, выражением

$$N = N(\bar{q}, \bar{h}). \quad (11)$$

Очевидно, что эффективность управления будет оптимальной, если мощность N , затрачиваемая на движение потоков в сети, будет минимальной, т. е.

$$N(\bar{q}, \bar{h}) = \min. \quad (12)$$

Это выражение в частном случае можно представить в виде

$$N = \sum_{i=1}^n q_i h_i = \min. \quad (13)$$

Поскольку значения дебитов q_i заданы, т. е. $q_i = q_i^*$, то минимальное $N_{\min}$ значение мощности N , очевидно, может быть достигнуто лишь путем обеспечения оптимальных значений депрессий h_i^* в каждой ветви сети при заданном потокораспределении $\bar{q}^*$ и соблюдении ограничивающих условий

$$N_{\min} = \sum_{i=1}^n q_i^* h_i^*, \quad (14)$$

где h_i^* — оптимальная депрессия в i -й ветви сети, обеспечивающая требуемое значение дебита $q_i = q_i^*$, и минимальный суммарный расход мощности на движение потоков в сети.

Таким образом, задачу оптимального управления потокораспределением в гидравлической сети можно сформулировать следующим образом. Дано математическое описание установившегося потокораспределения (1), требуемая область изменения управляемых переменных с учетом ограничивающих условий (10), ограничивающие условия (8) и критерий оптимальности (11).

Необходимо найти такое значение вектора управляющего воздействия

$$\bar{u} = \bar{u}(\bar{q}^*, \bar{q}, \bar{h}, \bar{v}, \bar{u}, \bar{z}), \quad (15)$$

при котором критерий оптимальности удовлетворяет условию (12) или (13), т. е. имеет минимальное значение. Данная задача в общем случае является задачей нелинейного программирования.

Зависимость (15), представленная как последовательность отдельных математических и логических операций, необходимых для такого целенаправленного преобразования начальной и рабочей информации о свойствах и состоянии управляемой системы, при котором бы соблюдались зависимости (7), условия (8) и (10) и достигался бы минимум критерия оптимальности (12), является алгоритмом оптимального управления потокораспределением в гидравлических сетях. Данный алгоритм может быть реализован на электронной цифровой управляющей машине, а при определенных условиях также на аналоговых управляющих машинах или устройствах.

Следует отметить, что алгоритмы оптимального управления (15), или оптимальные стратегии управляющей системы, при которых цель управления достигается с максимальным показателем эффективности, могут быть различными. Их структура и характер будут определяться типом оптимальной системы управления, а также математическими методами, применяемыми для получения указанных алгоритмов.

Оптимальные системы управления с неполной информацией об управляемой системе могут быть системами с пассивным и активным накоплением информации в процессе управления. Наконец, могут быть системы с минимальной информацией об управляемой системе. В подобных случаях алгоритм управления системы должен предусматривать также возможность автоматического определения характеристик и структуры управляемой системы, т. е. должен иметь дуальный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Фельдбаум. Основы теории оптимальных автоматических систем, М., 1963.
2. В. В. Солодовников. Кибернетика, автоматика, проблемы автоматического управления и управляющие машины. В книге «Применение вычислительной техники для автоматизации производства». Машгиз, М., 1961.
3. А. А. Волков, А. Г. Евдокимов. Математическое описание и дискретное моделирование на ЭВМ установившихся процессов потокораспределения в гидравлических сетях. ГосИНТИ, № 5—64—1130/31, М., 1964.