

Член-корреспондент АН СССР В. В. КАФАРОВ, В. Л. ПЕРОВ,
Г. И. МАНДРУСЕНКО

ОБ УПРАВЛЯЕМОСТИ В ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Химические производства и отдельные технологические цехи представляют собой сложные химико-технологические системы (х.т.с.). Аналитические методы исследования х.т.с., основанные на анализе физико-химических закономерностей процессов с использованием фундаментальных законов вещества и энергии, а также быстрое развитие математической теории оптимальных систем предопределило начало исследований с целью разработки оптимальных схем х.т.с. Характер и особенности технологических связей х.т.с., т.е. способ соединения технологических операторов (элементов), определяют структуру х.т.с. Выбор структуры оптимальной х.т.с. — это наиболее важный этап ее проектирования, поэтому основным этапом исследования х.т.с. является синтез, который осуществляют с целью определения структуры, связей между входными и выходными переменными, оценки эффективности функционирования данной х.т.с. как при изменении типов и конструкций аппаратов, так и при изменениях параметров технологических режимов. Одним из основных этапов оптимизации х.т.с. является выбор оптимизирующих или управляемых переменных и анализ их влияния на критерий оптимизации, поэтому главная задача синтеза оптимальной х.т.с. — определение внутренних свойств (состояний), характеризующих х.т.с. с точки зрения управления, а также выбор минимального необходимого и достаточного количества управляющих воздействий для получения управления заданного качества.

Известно ⁽¹⁾, что управляемость непосредственно связана с выявлением возможности воздействовать на состояние системы, выявлением возможности управляющих воздействий изменять вектор состояний системы.

Рассмотрим х.т.с. вида

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bq(t); \quad (1)$$

$$|x^i| \leq K^i; \quad |q^j| \leq G^j; \quad i=1, \dots, n; \quad j=1, \dots, m,$$

где $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ — вектор состояний; $q = \{q_1, \dots, q_m\}$ — вектор входов; A, B — матрицы размера $n \times n$; $n \times m$, которую называют управляемой (по Калману вполне управляемой), если для каждого начального состояния $x_0 = x(0)$ найдется кусочно-непрерывное управление $q(t)$ ($t \geq 0$) и момент $t_1 < +\infty$ такие, что траектория $x(t)$ системы (1), соответствующая этому управлению $q(t)$ и начальному состоянию x_0 , удовлетворяет условию $x(t_1) = 0$.

Необходимо провести синтез структуры х.т.с. (уравнение (1)), оптимальной в смысле функционала

$$J = \min_{t_0} \int_{t_0}^T F(x, u, t) dt, \quad (2)$$

где F — заданная функция $u = \{u_1, \dots, u_l\}$ — вектор управлений $l \leq m$; $u_r = q_r$; $r=1, \dots, l$, с целью определения минимального необходимого и до-

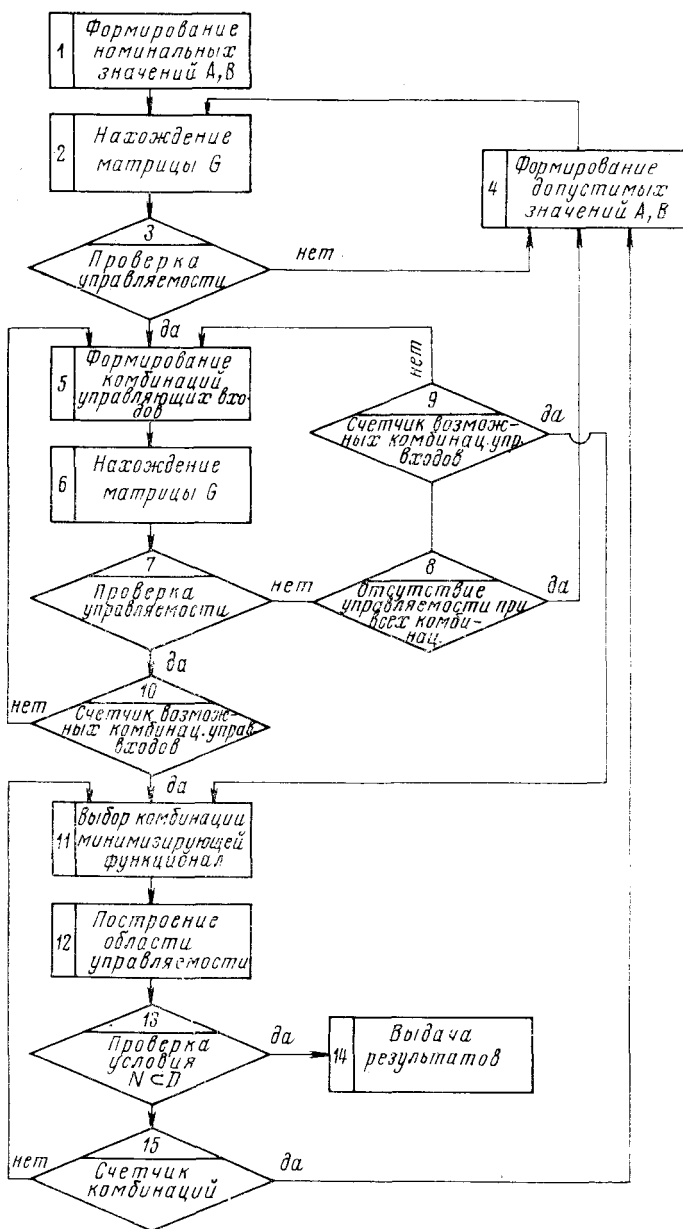


Рис. 1. Блок-схема алгоритма структурного синтеза оптимальных х.т.с.

статочного количества управлений (u_i). В результате синтеза нужно получить х.т.с., например, вида:

$$\dot{x}(t) = \hat{A}x(t) + Ru(t) + H\lambda(t), \quad (3)$$

где $\hat{A}$, R , H — матрицы размера $n \times n$, $n \times p$, $n \times v$, $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_p\}$ — вектор возмущений.

Алгоритм структурного синтеза оптимальной х.т.с., описываемой уравнением (3), заключается в следующем:

1. Проверяется полная управляемость х.т.с.

$$\text{rang } G = \text{rang } [B, AB, \dots, A^{n-1}B] = n, \quad (4)$$

при этом считается, что все q (уравнение (1)) являются управляющими входами. Управляемость проверяется для всей х.т.с. в целом, поскольку управляемость каждой подсистемы (при декомпозиции х.т.с.) не является достаточным условием управляемости всей х.т.с.

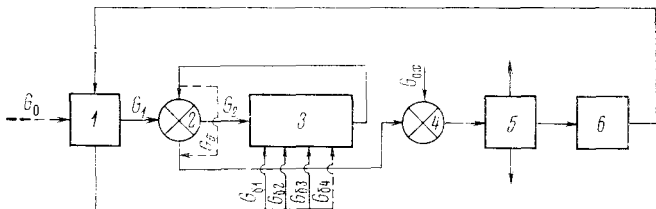


Рис. 2. Структурная схема отделения синтеза метанола. 1 — смеситель, 2 — теплообменник, 3 — реактор, 4 — холодильник, 5 — сепаратор, 6 — компрессор. G_0 — нагрузка по свежему синтез-газу, G_5 — количество смеси, проходящей по байпасу теплообменника. G_{61} , G_{62} , G_{63} , G_{64} — количество циркуляционного синтез-газа, поступающего по байпасам 1, 2, 3, 4 соответственно в реактор. G_{ox} — количество охлаждающей воды, поступающей в холодильник

образом, по виду матрицы G можно определить структурную управляемость (неуправляемость) системы. Однако структурная управляемость является (как видно из уравнения (4)) только необходимым, но недостаточным условием полной управляемости. Структурная управляемость показывает возможность воздействия управляющих входов на все состояния системы и обусловлена топологией х.т.с. Х.т.с. структурно управляемая, если каждый из элементов системы управляем. Система (1) может быть структурно управляемая (отсутствие нулевых строк в матрице G), но $\text{rang } G \neq n$.

а) Если в матрице G отсутствуют нулевые строки, то система структурно управляемая, в противном случае требуется изменение структуры системы (например, ввод дополнительных входов);

в) если система аппаратурно управляемая ($\text{rang } G=n$), то требуется определить необходимое и достаточное количество управляющих входов (u_i), доставляющих минимум функционалу (2), путем уменьшения размерности вектора q .

а) Если найденная область (D) охватывает заданную область управления $N(|x^i| \leq K^i)$, т.е. $N \subset D$, то, следовательно, с помощью управляющих входов u_i можно из любой точки области N попасть в любую другую точку этой области. В противном случае необходимо добиться $N \subset D$ путем выполнения пункта 1в.

Блок-схема приведенного алгоритма представлена на рис. 1.

В качестве примера была рассмотрена х.т.с. (отделение синтеза метанола) рис. 2, описываемая системой дифференциальных уравнений (1), где A — матрица 35×35 , B — матрица 35×7 .

Х.т.с. имеет 7 входов и характеризуется 13-ю параметрами. Управляемость исследуемой х.т.с. проверялась при условии, что управляющими входами являются следующие комбинации: G_0 , G_0G_6 , $G_0G_{64}G_5$, G_0G_{64} , G_{0x} , G_{64} , G_6 , G_0G_{0x} . Анализ результатов вычислений показывает, что система неуправляема в случае, если управляющими входами являются G_{0x} и $G_{0x}G_0$. Оставшиеся комбинации входов были проверены на условие удов-

летворения заданному критерию качества ($J = \min_{t_0} \int_{t_0}^T F(x, u, t) dt$), а также условию удовлетворения заданной области управляемости. На рис. 2 пунктиром показаны управляющие воздействия х.т.с., полученные в результате синтеза.

Таким образом, решение задачи синтеза х.т.с. на основе исследования управляемости системы позволяет получить оптимальную структуру х.т.с., выбрать минимальное количество управляющих воздействий, достаточное для построения оптимальной системы автоматического управления.

Московский химико-технологический институт
им. Д. И. Менделеева

Поступило
3 III 1975

Северодонецкий филиал опытно-конструкторского
бюро автоматики

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Р. Калман, Об общей теории систем управления. Тр. I Конгресса ИФАК, т. 2, Изд-во АН СССР, 1961.