

## Устойчивость реактора с дискретной стохастической управляющей системой

О. Б. РОНЖИН, Е. Ф. САБАЕВ

Устойчивость реактора на тепловых нейтронах с дискретной системой управления рассмотрена в работе [1] при следующих предположениях: 1) шаг регулирования постоянный; 2) временные процессы учитываются только в цепи обратной связи по отравлению ксеноном; 3) алгоритм управления состоит в том, что в конце каждого шага регулирования проводится полная и мгновенная компенсация отклонения мощности от равновесного значения. При этих предположениях величина критического шага регулирования оказалась в пределах нескольких часов, что указывает на возможность ручного управления. Однако при ручном управлении неизбежны флюктуации шага регулирования. В связи с этим представляет интерес изучить поведение системы при случайном шаге. Эта задача рассмотрена ниже при тех же предположениях, что и в работе [1].

Исходную систему уравнений запишем в более общем, чем в работе [1], виде:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + r, \quad (1)$$

где  $x$  — вектор состояния;  $r$  — вектор управляющих воздействий;  $A$  — заданная постоянная  $N \times N$ -матрица. Для случая, рассмотренного в работе [1],  $A$  —  $2 \times 2$ -матрица.

Пусть вектор  $r$  является ступенчатой функцией времени, который определенным образом связан с состоянием системы в дискретные моменты времени  $t_k$  ( $t_k$  — момент введения управляющего воздействия;  $k$  — номер шага):

$$r = Cx(t_k), \quad (2)$$

где  $C$  — некоторая заданная действительная  $N \times N$ -матрица.

Предположим, что шаг регулирования  $\tau$  является стационарной случайной величиной с заданным распределением плотности вероятности  $f(\tau)$ ,  $\tau \in T$ .

Перейдем от системы (1), (2) к соответствующей системе разностных стохастических уравнений. Для этого найдем решение уравнений (1), (2) на одном шаге

$$\begin{aligned} t_k \leq t < t_{k+1} \\ \text{при начальных условиях} \\ x(t_k) = x_k. \end{aligned} \quad (3)$$

Такое решение можно представить в виде

$$x_{k+1} = [D'(E + A^{-1}C) - A^{-1}C] x_k = Dx_k, \quad (4)$$

где  $D'$  — нормированная фундаментальная  $N \times N$ -матрица решений;  $D$  —  $N \times N$ -матрица с элементами  $d_{ij}$ ,

зависящими от  $\tau$ ;  $\tau$  обозначена одна из реализаций области  $T$ .

В дальнейшем будем рассматривать только экспоненциальную устойчивость в среднем решения  $x = 0$  системы (4). Приведем определение этого понятия, данное в работе [2].

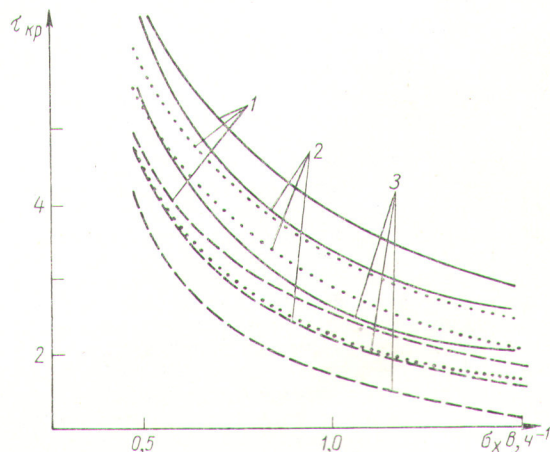
Если при любых начальных значениях из области  $\tau \in T$ ,  $t_k \geq t_0 \geq 0$ ,  $-\infty < x^{(j)} < \infty$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), существуют такие постоянные числа  $R > 0$ ,  $\beta \geq 0$ , что при всех  $t_k \geq t_0$  справедливо неравенство

$$M[\|x_k(x_0)\|^2/x_0] \leq R \|x_0\|^2 e^{-\beta(t_k - t_0)},$$

то решение  $x = 0$  системы (4) будем называть экспоненциально устойчивым в среднем.

Как следует из результатов этой же работы, тривиальное решение системы (4) будет экспоненциально устойчиво в среднем, если существует скалярная функция  $v(x, \tau)$ , знакоопределенная при  $-\infty < x^{(j)} < \infty$ ,  $\tau \in T$ ,  $t_k \geq t_0 \geq 0$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) и удовлетворяющая оценкам

$$\left. \begin{aligned} c_1 \|x\|^2 \leq v(x, \tau) \leq c_2 \|x\|^2; \\ \Delta M[v] \leq -c_3 \|x\|^2, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$



Зависимость  $\bar{\tau}_{кр}$  от  $\sigma_x b$  при  $\sigma_x \Phi_0$ , равном 0,0744; 0,1244 ( . . . ) и 0,3244  $u^{-1}$  ( — — — ):

1 — детерминированный случай; 2 —  $k_1 = 1/2$ ,  $k_2 = 3/2$ ; 3 —  $k_1 = 0$ ,  $k_2 = 2$ .

где  $c_1, c_2, c_3$  — некоторые положительные постоянные, а

$$\Delta M[v] = M[v(x_{k+1}, \tau_{k+1})/x_k = x, \tau_k = \tau] - v(x, \tau)$$

является первой разностью математического ожидания функции  $v$  вдоль решений системы (4).

Стационарность случайного процесса позволяет выбрать  $v$ , не зависящей от случайного параметра  $\tau$ , в виде квадратичной формы

$$v(x) = \tilde{x} B x. \quad (6)$$

Здесь  $B$  — действительная симметричная  $N \times N$ -матрица с элементами  $b_{ij}$ .

В силу (4) с учетом выражения (6) первая разность математического ожидания  $v$  запишется в виде

$$\Delta M[v] = \tilde{x} [M(\tilde{D} B D - B)] x.$$

Оценки (5) эквивалентны матричным неравенствам [3]:

$$\left. \begin{aligned} B > 0; \\ B - M(\tilde{D} B D) > 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Для примера остановимся более подробно на случае уравнений (1), рассмотренном в работе [1]. Числовые значения констант  $\lambda_i$  и  $\lambda_x$ , входящих в правую часть уравнения (1), возьмем из работы [4]. Область изменения параметров  $\sigma_x b$  и  $\sigma_x \Phi_0$  примем такой же, как и в работе [1]. Величину шага регулирования будем считать равновероятной в некотором интервале  $[k_1 \bar{\tau}, k_2 \bar{\tau}]$ . В этом случае для плотности вероятности спра-

ведлива формула

$$f(\tau) = \begin{cases} 0 & k_1 \bar{\tau} > \tau; \\ \frac{1}{(k_2 - k_1) \bar{\tau}} & k_1 \bar{\tau} \leq \tau \leq k_2 \bar{\tau}; \\ 0 & \tau > k_2 \bar{\tau}. \end{cases}$$

Удобно принять  $k_1 + k_2 = 2$ . Тогда  $\bar{\tau}$  будем иметь смысл среднего значения шага регулирования.

Исследование устойчивости проводилось с помощью ЭЦВМ М-20 для двух случаев: 1)  $k_1 = \frac{1}{2}, k_2 = \frac{3}{2}$ ; 2)  $k_1 = 0, k_2 = 2$ . При проведении расчетов параметры  $\sigma_x b$  и  $\sigma_x \Phi_0$  фиксировались и находилось максимально возможное значение шага регулирования  $\bar{\tau}_{кр}$ , при котором неравенства (7) еще выполняются. Критические значения параметра  $\tau$  в зависимости от  $\sigma_x b$  приведены на рисунке в сравнении с результатами, полученными в работе [1] для детерминированного случая.

Поступило в Редакцию 11/III 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. О. Б. Ронжин, Е. Ф. Сабаяев. «Атомная энергия», 24, 269 (1968).
2. Т. Ахметкалиев. «Дифференциальные уравнения», 1, 8, 1016 (1965).
3. D. Randall, D. John. Nucleonics, 16, No. 3, 82 (1958).
4. Ф. Р. Гантмахер. Теория матриц. М., Гостехиздат, 1953.

## Применение CO<sub>2</sub> в качестве теплоносителя и рабочего тела на АЭС

Д. П. ГОХШТЕЙН, Г. П. ВЕРХИВКЕР

УДК 621.039.534.34

Поскольку современные АЭС работают в основном на низких параметрах пара, проблема повышения единичной мощности турбоагрегатов АЭС является более сложной, чем на ТЭС.

Один из путей значительного повышения единичной мощности блока состоит в применении газожидкостного моноцикла на неводяных парах. В таком цикле обеспечивается высокая температура регенеративного подогрева, рабочее тело в турбине работает в состоянии перегрева и можно реализовать пониженные температуры охлаждающей воды, что более выгодно по сравнению с моноциклами на водяном паре. Моноцикл на неводянном паре может иметь более высокий к. п. д., чем какой-либо другой, а с конструктивной и эксплуатационной точек зрения он отличается наличием единого рабочего тела и простотой схемы. Предложения по использованию неводяных паров в энергетике были выдвинуты еще в 1940 г. [1], а с 1958—1960 гг. разрабатывается энергетическая установка на углекислоте в Одесском технологическом институте им. М. В. Ломоносова.

Рассмотрим эффективность применения рабочего тела на примере АЭС Великобритании «Данджнесс В» [2]. На этой АЭС реактор охлаждается углекислым газом, во втором контуре применяется водяной пар. Если применить схему, представленную на рисунке,

то на АЭС с таким реактором можно получить к. п. д. ~45,0% при тех же параметрах CO<sub>2</sub> на входе и выходе из реактора. В этой схеме теплоноситель используется в верхней ступени бинарного цикла. В нижней ступени этого цикла используется простой углекислотный цикл с конденсацией.

Расчет показанной схемы (см. рисунок) проведен при параметрах в узловых точках схемы, указанных в табл. 1. В расчете приняты следующие значения к. п. д.: для турбин  $\eta_{oi} = 0,9$ ; компрессора  $\eta_k = 0,88$ ; к. п. д. насоса  $\eta_n = 0,82$ ; механические к. п. д. турбомашин и генератора  $\eta_m = \eta_{ген} = 0,99$ ; теплового потока  $\eta_{т.п} = 0,995$ .

Недостатком рассматриваемой схемы являются большие поверхности нагрева. Ориентировочная оценка поверхностей нагрева схем АЭС «Данджнесс В» и АЭС со схемой, приведенной на рисунке, для блока мощностью 1200 Мвт дана в табл. 2. Однако в АЭС, выполненной по приведенной схеме, при мощности 1297 Мвт можно иметь четыре выхода в турбомашинах.

Учитывая небольшое число ступеней углекислотных турбин, можно считать, что длина основного вала установки без генератора составит менее 25 м. Представляется, что экономия, связанная с уменьшением габаритов турбомашин, перекроет рост стоимости поверхностей нагрева. Кроме того, значительно повышается