

## К ВОПРОСУ ОБ АППРОКСИМАЦИИ ВРЕМЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ДЛЯ РАСЧЕТА НАСТРОЙКИ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

Для расчетов параметров оптимальных настроек регуляторов в практике автоматизации теплоэнергетических объектов широко используются экспериментальные кривые разгона.

Наиболее сложным в настройке среди типовых регуляторов непрерывного действия является ПИД-регулятор. Применять его целесообразно на многоемкостных объектах регулирования, которые обладают значительными емкостными запаздываниями и описываются дифференциальными уравнениями выше второго порядка. При расчете настройки ПИД-регуляторов аппроксимация передаточных функций объекта динамическими звеньями первого порядка с запаздыванием в большинстве случаев не дает удовлетворительных результатов [1].

Переходные характеристики подавляющего большинства встречающихся на практике объектов регулирования, имеющих неколебательный вид, аппроксимируются инерционной системой второго порядка с запаздыванием [1]:

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об} e^{-\tau p}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{k_{об} e^{-\tau p}}{1 + b_1 p + b_2 p^2}, \quad (1)$$

где  $W_{об}(p)$  — передаточная функция объекта по каналу регулирующего воздействия;  $k_{об}$  — коэффициент усиления;  $\tau$  — время запаздывания;  $T_1, T_2$  — постоянные времени аperiodических звеньев;  $b_1 = T_1 + T_2$ ;  $b_2 = T_1 T_2$ . Обычно определение численных значений  $T_1$  и  $T_2$  производится с использованием относительной координаты точки перегиба кривой разгона  $x(t_{п}/k_{об})$  и времени разгона  $ВД = T_g$ , как показано на рис. 1. Однако аппроксимация экспериментальной кривой разгона инерционным звеном второго порядка с запаздыванием возможна лишь при условии, если значение  $x(t_{п}/k_{об})$  не превышает 0,265 (в этом случае  $T_1 = T_2$ ). Положение точки перегиба нельзя определить с высокой точностью. Кроме того, для объектов, порядок которых выше второго, не существует однозначной зависимости между положением точки перегиба графика кривой разгона и постоянными времени ее передаточной функции, если не накладываются дополнительные ограничения.

Рассмотрим метод аппроксимации временной характеристики объекта для расчета настройки ПИД-регулятора. При этом методе не обязательно определять местоположение точки перегиба графика переходной функции. Из графика кривой разгона вначале выделяется время чистого запаздывания  $\tau_{ч} = OA$ . Затем делается предположение о том, что оставшаяся часть состоит из  $n$  аperiodических звеньев, соединенных последовательно и обладающих одинаковыми динамическими свойствами, т.е. имеющих одинаковые постоянные времени разгона  $T$ . Для определения численных значений  $n$  и  $T$  к кривой разгона

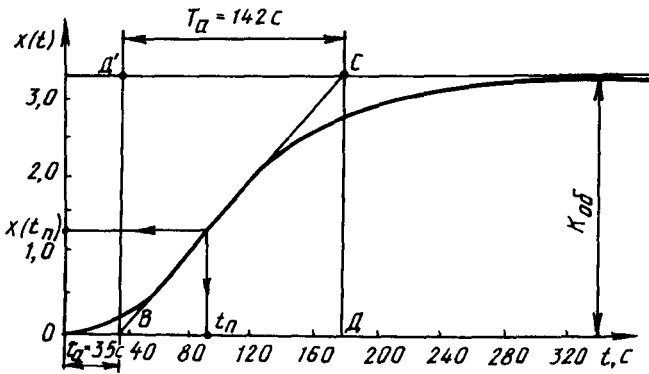


Рис. 1. Кривая разгона объекта с запаздыванием на скачкообразное воздействие.

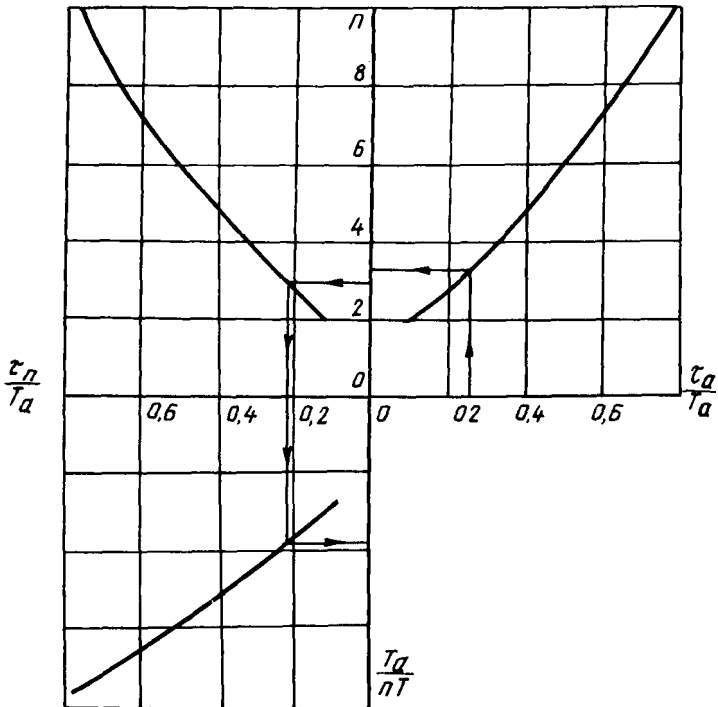


Рис. 2. Номограмма для определения численных значений промежуточной передаточной функции объекта ( $\tau_{эк}$ ,  $n$  и  $T$ ).

переходной функции проводится прямая ВС таким образом, чтобы как можно больше точек прямой ВС и временной характеристики объекта совпало. В качестве искомым выбирают интервалы времени, условно называемые "время запаздывания"  $\tau_a = OB$  и "время разгона"  $T_a$  (рис. 1). Далее определяется отношение  $\tau_a/T_a$ , на основании которого с помощью номограммы (рис. 2) находят порядок модели  $n$  и постоянную времени  $T$ . Причем, если найденное отношение  $\tau_a/T_a$  лежит между двумя целыми числами, то необходимо взять меньшее значение  $n$ . Вследствие этого для уменьшения погрешности аппроксимации необходимо ввести эквивалентное время запаздывания:  $\tau_{эк} = \tau_a - \tau_n$ , где  $\tau_n$  — запаздывание, соответствующее модели  $n$ -порядка. Номограмма (рис. 2) построена на основании данных таблицы, приведенной в [2].

Для иллюстрации рассмотрим пример аппроксимации кривой разгона, приведенной на рис. 1. Так как  $\tau_a/T_a = 35/142 = 0,25$ , то, полагая, что объект третьего порядка ( $n = 3$ ), из номограммы находим отношение  $\tau_n/T_a = 0,21$ , которое при  $T_a = 142$  с дает  $\tau_n = 29,8$  с. Следовательно, численное значение эквивалентного запаздывания будет равно  $\tau_{эк} = \tau_a - \tau_n = 35 - 29,8 = 5,2$  с. Далее из номограммы следует, что при  $n = 3$  постоянная времени объекта соответствует  $T = 39,4$  с. Таким образом, передаточная функция модели (1) примет следующий вид:

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об} e^{-\tau_{эк} p}}{(Tp + 1)^n} = \frac{3,32 e^{-5,2p}}{(39,4p + 1)^3} \quad (2)$$

Если объект имеет чистое запаздывание  $\tau_ч$ , то модель будет иметь суммарное запаздывание  $\tau_{эк} + \tau_ч$ .

Для расчета параметров динамической настройки ПИД-регулятора упрощенными методами передаточную функцию (2) преобразуем к виду (1) с использованием приближенного метода анализа, который приведен в [3], подстановкой необходимого дополнительного запаздывания  $t_{32}$ :

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об} e^{-\tau_y p}}{1 + b_1 p + b_2 p^2} \quad (3)$$

где  $\tau_y = \tau_ч + \tau_{эк} + t_{32}$  — время условного запаздывания;  $b_1$  и  $b_2$  — коэффициенты, определяемые численными значениями  $n$  и  $T$ .

Нормированные (относительно  $T$ ) выражения дополнительного запаздывания  $t_{32}$  и коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  передаточной функции (3) имеют вид [3] при  $n \geq 4$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{t_{32}}{T} &= \frac{n-1}{3} - \frac{4n(n-2)}{3(n-1)} - n; \\ \frac{b_1}{T} &= 2n - \frac{n-1}{3} - \frac{4n(n-2)}{3(n-1)}; \\ \frac{b_2}{T^2} &= \frac{n(n-1)}{2} - n \frac{t_{32}}{T} - 0,5 \left( \frac{t_{32}}{T} \right)^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

при  $n = 3$ :

$$\frac{t_{32}}{T} = 0,42; \quad \frac{b_1}{T} = 2,58; \quad \frac{b_2}{T^2} = 1,83; \quad (5)$$

при  $n = 2$ :

$$t_{32} = 0; \quad \frac{b_1}{T} = 2; \quad \frac{b_2}{T^2} = 1. \quad (6)$$

На основании уравнений (4)–(6) построена номограмма, приведенная на рис. 3. Она позволяет по найденному значению порядка модели  $n$  и постоянной времени  $T$  определять недостающие численные значения  $t_{32}$ ,  $b_1$  и  $b_2$  передаточной функции (3).

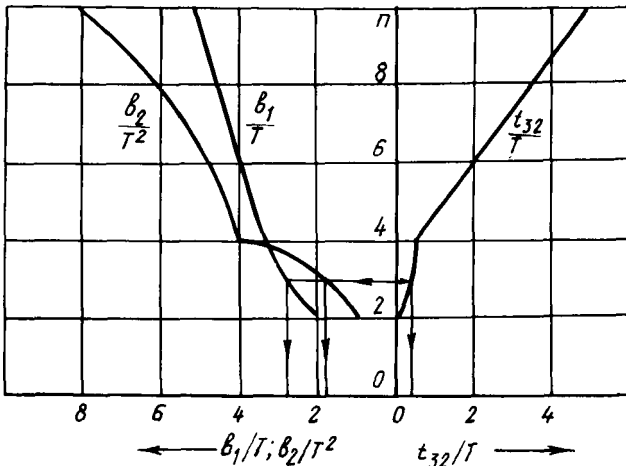


Рис. 3. Номограмма для определения численных значений расчетной передаточной функции объекта ( $t_{32}$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ).

Параметры динамической настройки ПИД-регулятора с передаточной функцией вида

$$W_p(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_n p} + T_d p \right), \quad (7)$$

где  $k_p$  — коэффициент передачи;  $T_n$  — постоянная интегрирования;  $T_d$  — постоянная дифференцирования регулятора, в соответствии с передаточной функцией объекта (3), могут быть рассчитаны по формулам:

$$k_p = \frac{\gamma b_1}{k_{об} \tau_y}; \quad T_n = b_1; \quad T_d = \frac{b_2}{b_1}. \quad (8)$$

Здесь  $\gamma = \frac{0,5}{1 - \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{M}}$  – коэффициент, определяемый принятым критери-

ем качества и зависящий от принятого показателя колебательности  $M$ . Так, например, при  $\gamma = 1$  формулы (8) приобретают вид, приведенный в [1].

В том случае, когда минимизируется не просто среднее значение квадрата ошибки регулирования, а ее более сложная функция, например взвешенная сумма квадратов и производной, то, применив методiku, приведенную в [4], применительно к передаточной функции (3), получим численное значение коэффициента  $\gamma = 0,5$ .

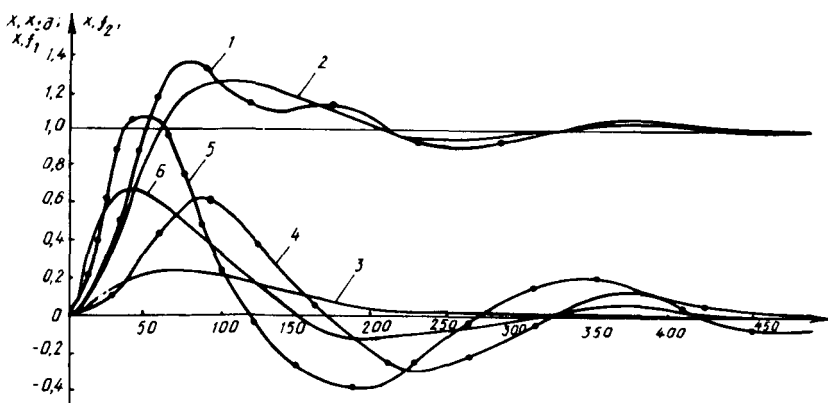


Рис. 4. Переходные процессы в системе регулирования с ПИД-регулятором и объектом с передаточной функцией (9) при отработке задания (кривые 5 и 6), крайнего внешнего возмущения (кривые 3 и 4) и внутреннего возмущения (кривые 1, 2) при настройках системы графоаналитическим методом [1] (кривые 6, 5, 4) и по формулам (8) (кривые 5, 6, 3).

В [5] приведены результаты сравнительного анализа различных методов расчета оптимальной динамической настройки ПИД-регуляторов для объектов с запаздыванием, имеющих передаточные функции (3). Рекомендуется при  $\gamma = 2/3$  определять настройки ПИД-регулятора (7) по формулам (8).

В качестве иллюстрации предложенного метода аппроксимации для расчета настроек ПИД-регулятора на рис. 4 приведены графики переходных процессов при основных возмущениях в системе регулирования для объекта с передаточной функцией

$$W_{об}(p) = \frac{3,32}{(55p + 1)(22p + 1)^3}, \quad ^\circ\text{C} / \text{т/г} \quad (9)$$

и параметрах динамической настройки ПИД-регулятора (7), рассчитанных по формулам (8). При  $M = 1,62$  расчетная передаточная функция модели объекта

$$W_{об}^p(p) = \frac{3,32e^{-21,8p}}{1 + 101p + 1910p^2} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{т/ч} . \quad (10)$$

Расчетная модель (10) получена предложенным методом из соответствующей кривой разгона, приведенной в [1] с использованием номограммы рис. 2 и 3. Отметим, что расчетная передаточная функция (10) может быть получена с применением методики [3] непосредственно из передаточной функции (9).

Анализ графиков переходных процессов, представленных на рис. 4, показывает, что предложенный метод аппроксимации позволяет определить параметры настройки ПИД-регулятора, обеспечивающие оптимальное качество регулирования при основных возмущениях, не хуже, чем традиционные методы расчета.

В результате проведенных исследований предложен новый метод аппроксимации кривых разгона теплоэнергетических объектов.

Предложенный метод имеет более широкую область применения, так как не требует определения координаты точки перегиба кривой разгона объекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ротач В.Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования. – М., 1961. – 344 с.
2. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. Изд- 2-е, перераб. – М., 1972, с. 298.
3. Ицхоки Я.С. Приближенный метод анализа переходных процессов в сложных линейных цепях. – М., 1969. – 171 с.
4. Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т. Определение оптимальных настроек регуляторов теплоэнергетических объектов при отработке задающего воздействия. – Изв. вузов СССР. Энергетика, 1980, № 4, с. 119–124.
5. P e m b e r t o n T.G. She logical Control Algorithm. Part II. Control Engineering. – lyly, 1972, p. 61–63.

УДК 621.181

Г.И.ЖИХАР, канд.техн.наук,  
И.Г.БОГДАНОВИЧ (БПИ), Д.М.МАЗЕНКОВ (ВТЭЦ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ МАЗУТА НА ВОДОГРЕЙНОМ КОТЛЕ ПТВМ-100

Потребление сернистых мазутов на тепловых электростанциях вызывает необходимость предотвращения загрязнения воздушного бассейна вредными выбросами, снижение низкотемпературной коррозии. Одним из путей защиты воздушного бассейна является метод внутрициклового газификации сернистых мазутов с низкотемпературной [1, 2] или высокотемпературной [3] очисткой получаемого при этом газа.

Вместе с тем значительный интерес представляет процесс газификации мазутов непосредственно в топочно-горелочных устройствах.

Преимуществами способа сжигания мазута с предварительной термopодготовкой являются сглаживание пиков тепловыделения в топке, а также существенное снижение выбросов в атмосферу окислов азота с дымовыми газами. При сжигании мазута с недостатком воздуха, содержащийся в радикалах