

УДК 236.24

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Барабанов А.Т., Конева С.А.

Преобразованием Лапласа уравнений конвективного теплообмена (в частных производных) определено изображение температуры теплоносителя на выходе теплообменного аппарата в виде некоторой трансцендентной функции. Это позволяет решить задачу построения переходного процесса в системе автоматического регулирования температуры подогрева частотным методом.

Рассматривается система автоматического регулирования температуры в устройстве подогрева топлива пароэнергетической установки. Подогрев производится в цилиндрическом теплообменном аппарате (ТОА). Внутри цилиндра находится труба, по которой подается греющий пар (тепловыделяющий элемент - ТВ), а в межтрубном пространстве – мазут (теплоноситель - ТН), подводимый в ТОА из расходной цистерны. Теплопередача происходит за счет конвекции. За счет регулируемого подогрева поддерживается необходимый уровень вязкости топлива, обеспечивающий его хорошее распыление форсунками и, как следствие, более полное сгорание.

Регулирование осуществляется с целью поддержания температуры мазута (теплоносителя) на выходе аппарата в заданных пределах (например, $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$) и происходит за счет изменения подачи греющего пара $G_T(t)$.

Пусть $T(x, t)$ - температура холодного теплоносителя; x - относительная координата ($0 \leq x \leq 1$); t - время; $T(0, t)$ - температура теплоносителя на входе ТОА; $T(1, t)$ - температура на выходе; $T_T(x, t)$ - температура

тепловыделяющего пара: $T_T(0,t)$ - на входе, $T(1,t)$ - на выходе; расход теплоносителя $G(t)$.

При равномерной по длине ТОА теплоотдаче уравнения динамики теплообмена имеют вид [1]:

$$v \frac{\partial T_T(x,t)}{\partial t} + T_T(x,t) = a_2 q(t) + T(x,t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + b_1 \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} + b_2 T(x,t) = b_3 T_T(x,t) - b_4 G(t). \quad (2)$$

Начальные и граничные условия принимаются нулевыми

$$T(x,0) = 0, \quad T_T(x,0) = 0;$$

$$T(0,t) = T_0(t) = 0.$$

В данной задаче теплообмена основной интерес представляет процесс изменения температуры теплоносителя на выходе ТОА $T(1,t)$.

Возмущающими воздействиями являются температура топлива на входе $T(0,t)$ и расход топлива $G(t)$, управляющим воздействием - расход тепловыделяющего пара $G_T(t)$.

Преобразование Лапласа уравнений (1), (2) по t с изображениями $T_T(x,p)$, $T(x,p)$ дает с учетом начальных условий после исключения $T_T(x,p)$ соотношение

$$\frac{dT(x,p)}{dx} + \left(b_1 p + b_2 - \frac{b_3}{vp+1} \right) T(x,p) = \frac{a_2 b_3}{vp+1} G_T(p) - b_4 G(p).$$

Решение этого дифференциального уравнения с учетом граничного условия позволяет определить $T(x,p)$ в виде

$$T(x,p) = T_0(p) e^{-A(p)x} + \frac{a_2 b_3}{(vp+1)A(p)} \left[1 - e^{-A(p)x} \right] G_T(p) - \frac{b_4}{A(p)} \left[1 - e^{-A(p)x} \right] G(p),$$

где $A(p) = b_1 p + b_2 - \frac{b_3}{vp+1}$, $B(p) = \frac{a_2 b_3}{(vp+1)}$.

При $x = 1$ полученное выражение определяет изображение температуры теплоносителя на выходе ТОА. Соответствующие возмущениям компоненты изображения имеют вид (индексы опускаем):

$$T(1,p) = \frac{B(p)}{A(p)} \left[1 - e^{-A(p)} \right] G_T(p), \quad T(1,p) = e^{-A(p)} T_0(p), \quad (3)$$

$$T(1,p) = \frac{b_4(p)}{A(p)} \left[e^{-A(p)} - 1 \right] G(p).$$

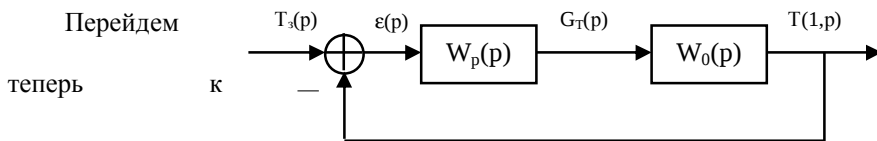


Рисунок 1- Структурная схема САР теплообмена

системы автоматического регулирования (САР) конвективного теплообмена. Без потери общности рассматриваемого метода (в силу принципа суперпозиции) будем рассматривать динамику САР, определяемую задающим воздействием на входе замкнутой системы с отрицательной единичной обратной связью. Определяя ошибку управления как $\varepsilon(t) = T_3(t) - T(1,t)$, где $T_3(t)$ – заданная температура на выходе ТОА, представим САР структурной схемой, изображенной на рисунке 1.

В соответствии с (3) передаточная функция объекта управления имеет вид:

$$W_O(p) = \frac{B(p)}{A(p)} [1 - e^{-A(p)}].$$

Передаточную функцию регулятора будем рассматривать в виде

$$W_p(p) = \frac{k_p(\tau_2 p + 1)}{\tau_1 p + 1},$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора, τ_1, τ_2 – постоянные времени.

Определяя теперь передаточную функцию прямой цепи как

$$W(p) = W_p(p)W_O(p) = \frac{k_p a_2 b_3 (\tau_2 p + 1)}{(\tau_1 p + 1)(vp + 1)} \frac{(1 - e^{-A(p)})}{A(p)}, \quad (4)$$

а передаточную функцию замкнутой системы как

$$\Phi(p) = \frac{W(p)}{1 + W(p)}, \quad (5)$$

будем иметь для изображения выхода системы $T(1,p)$

$$T(1, p) = \Phi(p)T_3(p) \quad (6)$$

с соотношениями (4), (5) для $\Phi(p)$.

Будем рассматривать далее основную динамическую характеристику САР ТОА – единичную переходную характеристику. В этом случае

$$T_3(t) = \frac{1}{p}.$$

Основные возможности применения полученных представлений для $\Phi(p)$ определяются частотным методом построения переходной функции. Это вытекает из сложной природы функции $\Phi(p)$. Она не является рациональной функцией и имеет сложный характер особенностей.

В частности, заметим, что точка $p = -\frac{1}{v}$ является существенно особой

точкой для $W_0(p)$ и таковой она может оставаться для функции $\Phi(p)$. Последняя, кроме того, может иметь бесконечное число полюсов, анализ распределения которых является весьма сложной задачей.

Здесь эта задача не рассматривается. Отметим только, что при определенных условиях (по существу они являются условиями устойчивости) все особые точки изображения (6) располагаются в левой полуплоскости. В этом случае справедлива вещественная форма интеграла обращения для единичной переходной функции

$$T(1, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P(\omega) \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega, \quad (7)$$

где $P(\omega) = \operatorname{Re} \Phi(j\omega)$ – вещественная частотная характеристика замкнутой системы. Приведем основные соотношения для ее расчета. Пусть

$$W(j\omega) = u(\omega) + jv(\omega).$$

Тогда нетрудно получить

$$P(\omega) = \frac{(u(\omega) + u(\omega)^2 + v(\omega)^2)}{(1 + u(\omega))^2 + v(\omega)^2}, \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} u(\omega) &= \operatorname{Re} W(j\omega) = \frac{k[H(\tau_1 \tau_2 \omega^2 + 1) + S\omega(\tau_1 - \tau_2)]}{1 + \tau_1^2 \omega^2}, \\ v(\omega) &= \operatorname{Im} W(j\omega) = \frac{k[H\omega(\tau_2 - \tau_1) + S(1 + \tau_1 \tau_2 \omega^2)]}{1 + \tau_1^2 \omega^2}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

и далее

$$\left. \begin{aligned} H(\omega) &= \frac{a_2 b_3}{(v^2 \omega^2 + 1)(M^2 + N^2)} \left[(M - v\omega N)(1 - e^{-M} \cos N) + (N + v\omega M)e^{-M} \sin N \right] \\ S(\omega) &= \left[(M - v\omega N)e^{-M} \sin N - (N + v\omega M)(1 + e^{-M} \cos N) \right] \\ M(\omega) &= \frac{b_2 v^2 \omega^2 + (b_2 - b_3)}{1 + v^2 \omega^2}, \quad N(\omega) = \omega \left(b_1 + \frac{b_3 v}{1 + v^2 \omega^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

После построения частотной характеристики $P(\omega)$ по указанным соотношениям переходный процесс может быть построен по соотношению (7) с помощью характерных для частотных методов трапецидальных частотных характеристик [2].

Для иллюстрации методики обратимся к примеру.

Пример. Пусть $v=1,859$, $b_1=0,632$, $b_2=3,027$, $b_3=2,95$, $a_2=0,236$, $\tau_1=1,75$, $\tau_2=0,15$.

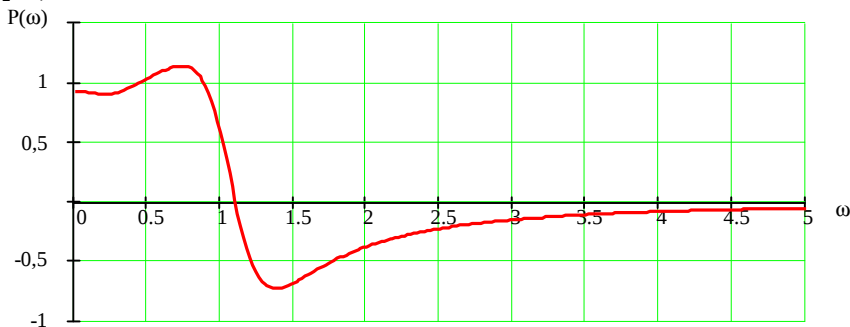
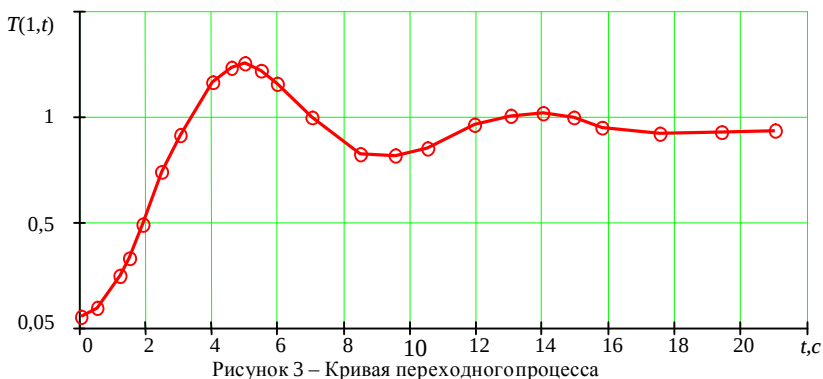


Рисунок 2 – Вещественная частотная характеристика замкнутой САУ

По выражениям (8)–(10) строим вещественную частотную характеристику замкнутой системы (рисунок 2).

Построенная вещественная частотная характеристика системы достаточно точно может быть представлена суммой трех–четырех трапецидальных.

Определяя для трапецидальных компонент соответствующие h -функции и суммируя их, получаем кривую переходного процесса (рисунок 3).



В заключение отметим, что построение переходного процесса в рассматриваемой САР может быть осуществлено и каким-либо другим численным методом вычисления несобственного интеграла (7) (на основе общих квадратурных схем).

Предложенный метод анализа САР теплообменного аппарата (системы с распределенными параметрами) сравним с методом анализа обыкновенных систем с сосредоточенными параметрами. Разумеется, речь идет только о задаче построения переходной характеристики системы, решение которой указанным методом значительно проще прямого численного интегрирования уравнений (1),(2) совместно с обыкновенным дифференциальным уравнением регулятора

Библиография

- 1 Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе — М.: Атомиздат 1979. — 415 с.
- 2 Солодовников В.В. Теория автоматического регулирования / В.В. Солодовников — М.: Машиностроение, 1967. — 763 с.

Поступила в редакцию 13.12.2001 г.