



плохое качественное и количественное соответствие. Небольшие отклонения расчетных и экспериментальных данных наблюдаются в области малых толщин МСМ-структуры, что может быть связано с влиянием контактных явлений. Более корректное определение величины термоэлектрической ЭДС требует точных экспериментальных значений ρ' и ρ исследуемых образцов. Полученные результаты могут быть использованы для установления механизма образования источника ЭДС в МСМ-структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В.* Термоэдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов //Изв. вузов, сер. физ. 2001. №1. С. 96-97.
2. *Ицковский М.А., Щедрина Л.В.* Термостимулированные токи в системе металл – диэлектрик – металл // Физика твердого тела. 1979. Т.21. № 12. С. 3567-3575.
3. *Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В.* Термостимулированная эдс в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов. Препринт № 19. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000.
4. *Barkan I.B., Baskin E.M., Entin M.V.* Mechanism of Conductivity of a Fe-Doped LiNbO₃ Crystal //Phys. stat. sol. 1980. V.59(a). P. 97-102.
5. *Ахмадуллин И.Ш., Голенищев-Кутузов В.А., Мигачев С.А., Миронов С.П.* Низкотемпературная электропроводность кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава // Физика твердого тела. 1998. Т.40. № 7. С. 1307-1309.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.С. Астаповой.

УДК 621.391

© 2005 г. **А.Н. Рыбалев**, канд. техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В работе предложена упрощенная методика моделирования теплообменного аппарата как объекта регулирования температуры при воздействии на расход теплоносителя. Приведена структура модели, в большей степени отражающей «физику» процесса, чем традиционно применяемые. Параметры модели легко определяются экспериментально по кривой разгона.

Введение

В промышленности широко применяются поверхностные теплообменные аппараты, теплоносителем в которых является водяной пар. В

большинстве случаев в таких аппаратах передача тепла сопровождается конденсацией пара. В качестве примеров можно привести подогреватели сетевой воды на теплоэлектроцентралях, пастеризаторы и т.д. Регулирование температуры нагреваемой среды на выходе осуществляется изменением подачи пара.

В задачах проектирования системы регулирования динамические характеристики теплообменного аппарата чаще всего определяются экспериментально, причем традиционно принимаются простые модели в виде инерционных звеньев первого, реже второго порядка с запаздыванием [1]. Такие модели совершенно не отражают физических аспектов процесса передачи тепла и поэтому адекватно описывают динамику аппарата только в очень небольшом диапазоне изменения регулируемой и управляющей величин. С другой стороны, «точные» модели динамики [2] теплообмена являются сложными и непригодными с практической точки зрения. Поэтому перспективным представляется применение комбинированного способа построения модели, при котором ее структура учитывала бы основные физические особенности процесса, а параметры определялись бы экспериментально.

Разработка модели

На рис. 1а приведена кривая разгона по температуре пастеризатора молока, используемого на Благовещенском молочном комбинате при возмущении расходом пара $\mu_{\max} = 5\%$. На рис. 1б показаны результаты аппроксимации разгонной характеристики характеристиками звеньев первого (цифра 1) и второго (цифра 2) порядка с запаздыванием, параметры которых найдены из условия максимального приближения (путем минимизации суммы квадратов отклонений в расчетных точках).

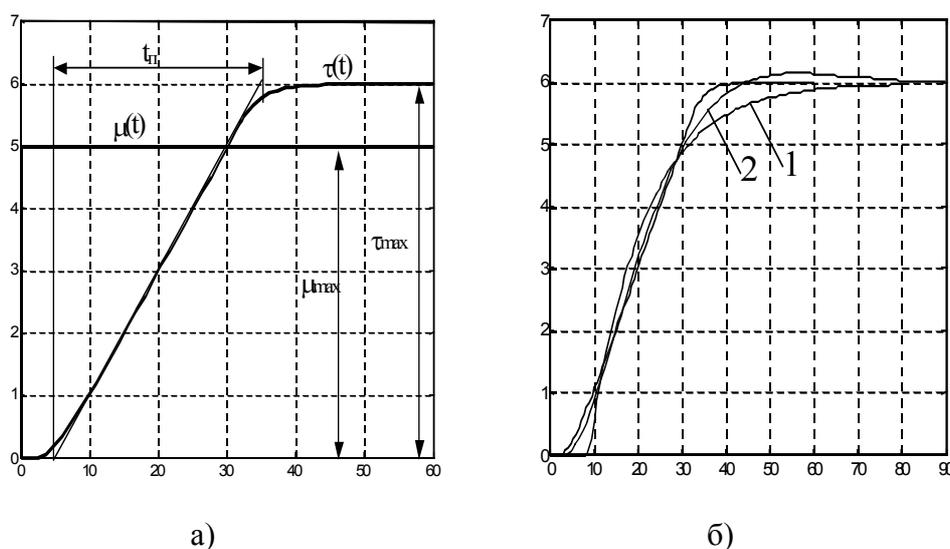


Рис. 1. Кривая разгона и ее аппроксимации динамическими звеньями.

Программа аппроксимации приведена в приложении. Она написана

на языке Matlab с использованием библиотечных функций пакета Control и функции `fminsearch`, выполняющей оптимизационную процедуру.

В результате получены следующие передаточные функции объекта:

$$W_o(p) = \frac{1,2}{12,8p + 1} e^{-8,6p}, \quad (1)$$

$$W_o(p) = \frac{1,2}{123,3p^2 + 16,8p + 1} e^{-2,8p}. \quad (2)$$

Из рис. 1б видно, что аппроксимирующие кривые в значительной степени не отражают характера разгонной кривой. На практике, когда ее обработка производится графическими методами, качество аппроксимации будет еще хуже.

На рис. 1а хорошо виден участок, на котором температура растет практически с постоянной скоростью. Ясно, что наличие этого участка связано с процессом движения нагреваемой среды (в данном случае молока) по змеевику аппарата. Предположим, что при изменении подачи пара в аппарат его параметры (давление, плотность, температура) внутри аппарата изменяются достаточно быстро и одинаково вдоль всего змеевика. Скорость изменения параметров пара при его расширении намного выше скорости движения нагреваемой среды, поэтому этот процесс будем считать безынерционным. Кроме того, пока не будем принимать в рассмотрение инерционность процесса теплопередачи через металл змеевика.

Количество тепла, переданное элементарной порции нагреваемой среды за время ее прохождения через змеевик, определяется: 1) параметрами пара в аппарате, 2) скоростью движения порции и 3) ее температурой на входе в аппарат. Так как регулирование температуры на выходе из аппарата осуществляется воздействием на подачу пара, будем считать последние две величины постоянными. Приняв параметры пара в падающем паропроводе также постоянными, можно предположить, что количество тепла, отданного паром элементарной порции нагреваемой среды в единицу времени, пропорционально его массовому расходу. В таком случае количество тепла, полученного порцией в теплообменном аппарате, можно выразить с помощью следующей качественной зависимости:

$$Q_i(t) = k_1 \int_{t_0}^t M(t) dt, \quad (3)$$

где t_0 – время входа порции нагреваемой среды в аппарат; $M(t)$ – массовый расход пара; k_1 – коэффициент пропорциональности.

Поделив Q_i на массу порции и теплоемкость нагреваемой среды, получим аналогичную зависимость для разницы температур среды на выходе и входе в аппарат:

$$\Delta T(t) = k_2 \int_{t_0}^t M(t) dt. \quad (4)$$

Очевидно, что данная зависимость останется справедливой и для отклонений температуры и расхода пара от их номинальных значений:

$$\tau(t) = k_2 \int_{t_0}^t \mu(t) dt. \quad (5)$$

Перепишем последнее уравнение в виде

$$\begin{aligned} \tau(t) &= k_2 \left(\int_0^t \mu(t) dt - \int_0^{t_0} \mu(t) dt \right) = k_2 \left(\int_0^t \mu(t) dt - \int_0^{t-t_n} \mu(t) dt \right) = \\ &= k_2 \int_0^t (\mu(t) - \mu(t-t_n)) dt, \end{aligned} \quad (6)$$

где $t_n = t - t_0$ – длительность промежутка времени, в течение которого элементарная порция нагреваемой среды проходит через аппарат. При постоянной скорости среды это постоянная величина, которая может быть вычислена аналитически или определена по разгонной кривой (рис. 1а).

Коэффициент k_2 определяется с помощью кривой разгона по следующей формуле:

$$k_2 = \frac{\tau_{\max}}{\mu_{\max} t_n}. \quad (7)$$

В операторном виде уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$\tau(p) = k_2 \frac{1 - e^{-t_n p}}{p} \mu(p). \quad (8)$$

Выражение (8) не учитывает влияния многих факторов, вносящих дополнительную инерционность в процесс теплообмена: запаздывание, связанное с подачей пара и его расширением, аккумуляцию тепла металлом труб и стенками аппарата и т.д. Как видно из рис. 1а, влияние этих факторов сказывается в основном в начале и в конце переходного процесса. Повысить адекватность модели можно, введя в ее структуру дополнительные звенья (инерционные и запаздывания).

Моделирование

Модель аппарата была выбрана в виде передаточной функции:

$$W(p) = k_2 \frac{1 - e^{-t_n p}}{p} \frac{e^{-t_1 p}}{Tp + 1}. \quad (9)$$

По кривой разгона были определены $t_n = 30$ с, $k_2 = 0,04$. С помощью программы, приведенной в приложении, найдены оптимальные, с точки зрения наилучшего приближения запаздывание, $t_1 = 2$ сек. и постоянная времени $T = 3$ сек.

С помощью Simulink-модели (рис. 2) рассчитана кривая переходного процесса при возмущении $\mu_{\max} = 5\%$. Кривая практически полностью повторяет экспериментальную кривую разгона (расхождение не более $0,05^\circ$),

поэтому отдельно не приводится.

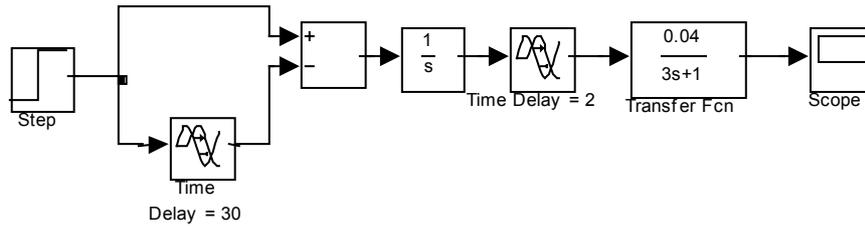


Рис. 3. Simulink-модель теплообменного аппарата.

Построены Simulink-модели системы автоматического регулирования температуры с ПИ-регулятором, включающие модели объекта управления (1), (2) и (9). С их помощью методом незатухающих колебаний, широко применяемым на практике, определены настройки регуляторов, обеспечивающие перерегулирование около 20% и число колебаний 2 – 3. Для моделей объекта (1) и (2) получен регулятор с передаточной функцией

$$W_{рег}(p) = 1,5 \left(1 + \frac{1}{30p} \right), \quad (10)$$

для модели (9) – с передаточной функцией

$$W_{рег}(p) = 1 \left(1 + \frac{1}{20p} \right). \quad (11)$$

Для трех моделей на рис. 3 приведены переходные процессы по заданию и по возмущению (расходом пара – 5%) в системе регулирования с ПИ-регуляторами, рассчитанными для объектов: 1 – (1), 2 – (2), 3 – (9). Показатели их качества достаточно близки.

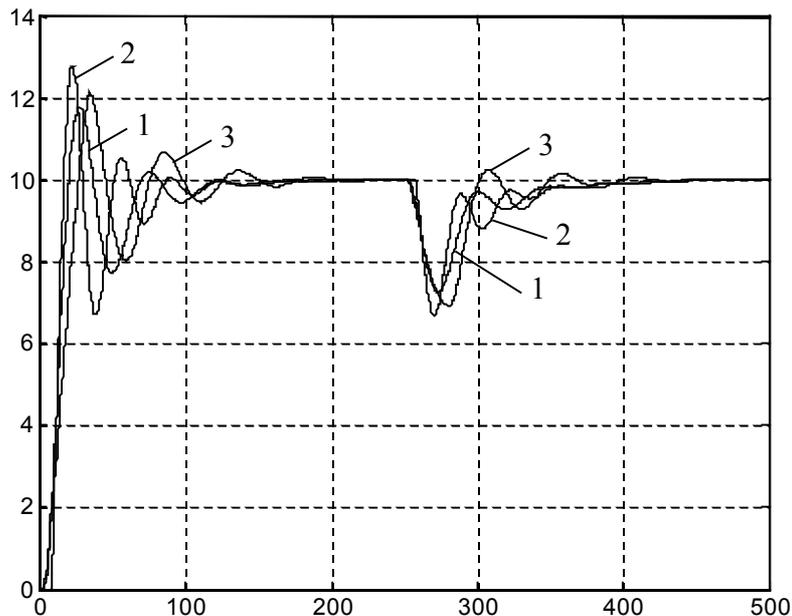


Рис. 3. Переходные процессы по заданию и возмущению в системе с ПИ-регуляторами.

Полученные значения настроек регуляторов испытывались на модели объекта (9). Переходные процессы по заданию и по возмущению расходом пара (5%) в системе регулирования с объектом (9) и регулятором 1 – (10), 2 – (11) приведены на рис. 4.

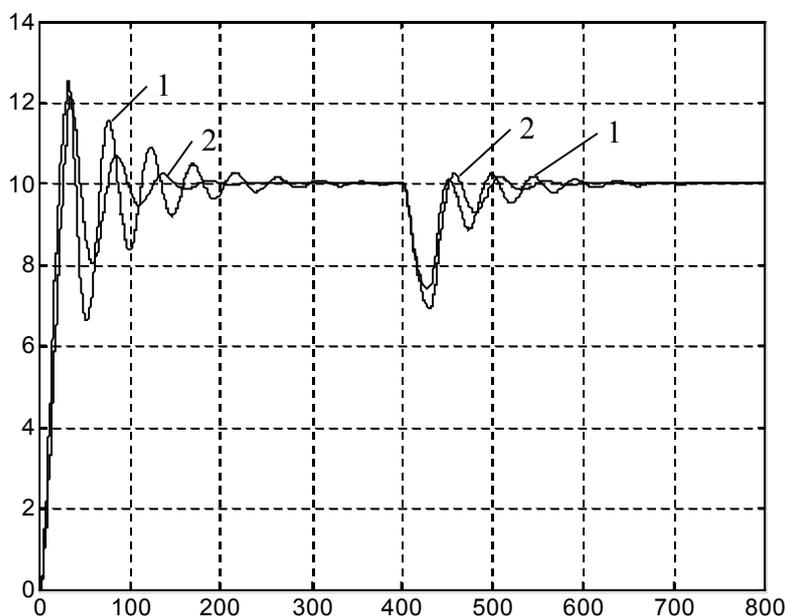


Рис. 4. Переходные процессы в системе регулирования с объектом (9).

Таким образом, использование формальных моделей (1), (2) объекта управления при расчете регулятора приводит к повышению колебательности переходных процессов по сравнению с моделью (9).

Заключение

На основании качественного рассмотрения процесса теплообмена в поверхностном теплообменном аппарате с конденсацией пара предложен подход к построению модели аппарата как объекта регулирования температуры при воздействии со стороны подачи пара. Его достоинством является учет основного физического аспекта процесса в структуре модели и простота получения параметров модели непосредственно по разгонной характеристике объекта.

ПРИЛОЖЕНИЕ

```
% Программа аппроксимации разгонной характеристики
% Стартовый файл
global t temp
% Задание кривой разгона
t = [0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60]';
temp = [0 0.22 1.04 2.01 3.00 4.00 5.00 5.78 5.96 5.99 6.00 6.00 6.00]';
% Аппроксимация звеном первого порядка (1)
x = fminsearch('errfirst',[5,30]);
tau1 = x(1), T1 = x(2)
W1 = tf(6/5, [T1 1]); W1.InputDelay = tau1;
```

```

% Аппроксимация звеном второго порядка (2)
x = fminsearch('errsecond',[5,100,20]);
tau2 = x(1), a1 = x(2), a2 = x(3)
W2 = tf(6/5, [a1 a2 1]); W2.InputDelay = tau2;
[temp2,t2] = step(W2); temp2 = temp2*5;
% Построение графика (рис. 1а)
figure(1)
plot(t,temp,t1,temp1,t2,temp2), grid
% Аппроксимация звеном вида (9)
x = fminsearch('errnew',[0,1]);
tau3 = x(1), T3 = x(2)
W3 = tf(.04, [T3 1 0]); W3.InputDelay = tau3;
W4 = tf(.04, [T3 1 0]); W4.InputDelay = 30+tau3;
[temp3,t3] = step(W3,60);
temp3 = (temp3-step(W4,t3))*5;
% Построение графика (не показан)
figure(2)
plot(t,temp,'o', t3,temp3), grid
% Файл-функция errfirst.m
% Вычисляет ошибку аппроксимации для модели (1)
function error = errfirst(x)
global t temp
tau = x(1); T = x(2);
W = tf(6/5, [T 1]); W.InputDelay = tau;
temp1 = step(W,t)*5;
error = sum((temp-temp1).^2);
% Файл-функция errsecond.m
% Вычисляет ошибку аппроксимации для модели (2)
function error = errsecond(x)
global t temp
tau = x(1); a1 = x(2); a2 = x(3);
W = tf(6/5, [a1 a2 1]); W.InputDelay = tau;
temp1 = step(W,t)*5;
error = sum((temp-temp1).^2);
% Файл-функция errnew.m
% Вычисляет ошибку аппроксимации для модели (9)
function error = errnew(x)
global t temp
tau = x(1); T = x(2);
W1 = tf(.04, [T 1 0]); W1.InputDelay = tau;
W2 = tf(.04, [T 1 0]); W2.InputDelay = 30+tau;
temp1 = (step(W1,t)-step(W2,t))*5;
error = sum((temp-temp1).^2);

```

ЛИТЕРАТУРА

1. *Плетнев Г.П.* Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 1995.
2. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / *С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.*; Под ред. *А.И. Леонтьева*. М.: Высшая школа, 1979.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.