

**В.Б. ЗВОРЫКИН**, к.т.н, доцент  
**А.И. МИХАЛЕВ**, д.т.н, профессор  
**Г.Ю. СТАНЧИЦ**, старший преподаватель,  
 Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр

### Математическая модель системы автоматического управления температурным режимом электрической нагревательной печи

Разработана структурная схема САУ температурным режимом электрической нагревательной печи. Описаны нелинейные характеристики ПИД-регулятора, фазового регулятора и тиристорного регулятора напряжения. Идентифицирована передаточная функция нагревательной печи и датчика температуры.

В [1] предложена система автоматического управления температурным режимом электрической нагревательной печи.

С точки зрения математического описания система представляет собой цепочку последовательно соединенных линейных и нелинейных звеньев. Структурная схема системы проведена на рис. 1.

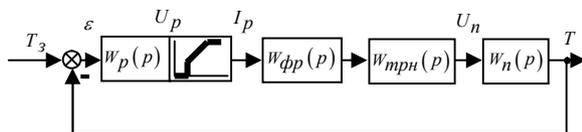


Рис. 1. Структурная схема исследуемой САУ температуры в печи

На рис. 1 обозначено:  $W_p(p)$  — передаточная функция ПИД-регулятора TZN4W [2];  $W_{фр}(p)$  — передаточная функция фазового регулятора RM1E [3];  $W_{трн}(p)$  — передаточная функция тиристорного регулятора напряжения;  $W_n(p)$  — передаточная функция печи "Электродело" и датчика температуры ТСП1-11;  $T_3$  — заданное значение температуры в печи;  $T$  — текущее значение температуры в печи;  $\varepsilon$  — рассогласование на входе регулятора.

В процессе регулирования температуры регулятор  $W_p(p)$  формирует управляющий сигнал  $U_p$ , действие которого направлено на уменьшение отклонения  $\varepsilon$  измеряемой температуры  $T$  от заданного значения  $T_3$ .

$$U_p = K_p \left[ 1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right] \varepsilon, \quad (1)$$

где  $K_p$  — коэффициент пропорциональности;  $T_d$  — постоянная времени дифференцирования;  $T_i$  — постоянная времени интегрирования;

Рассмотрим математическое описание передаточных звеньев системы.

#### Регулятор температуры

В процессе регулирования выходной сигнал регулятора температуры TZN4W  $W_p(p)$  изменяется в интервале  $I_p = 4 \div 20$  мА постоянного тока [2] (рис. 2).

Данный сигнал поступает на вход фазового регулятора RM1E  $W_{фр}(p)$ .

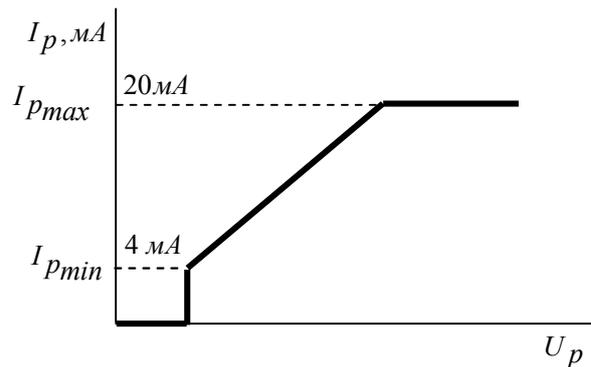


Рис. 2. Нелинейная характеристика регулятора температуры

#### Фазовый регулятор и тиристорный регулятор напряжения

Передаточная функция фазового регулятора и тиристорного регулятора напряжения:

$$W_{np}(p) = W_{фр}(p)W_{трн}(p) = \frac{U_n}{I_p}, \quad (2)$$

где  $I_p = 4 \div 20$  мА — выходной ток регулятора температуры TZN4W;  $U_n$  — напряжение на зажимах лабораторной печи.

В фазовом регуляторе RM1E [3] входному току 4 мА постоянного тока соответствует нулевое значение выходной мощности, в то время, как входному току 20 мА постоянного тока соответствует полная выходная мощность на выходе фазового регулятора  $W_{фр}(p)$ .

Особенностью тиристорного регулятора напряжения ТРН является наличие зоны нечувствительности (рис. 3):

- при изменении входного тока в пределах  $0 \div I_{pc}$  напряжение на выходе ТРН равно нулю,
- при достижении входным током значения  $I_{pc}$  напряжение на выходе ТРН скачком возрастает до  $U_{nc} = 40$  В и в дальнейшем изменяется по линейному закону.

Нижний порог зоны нечувствительности ТРН:

$$I_{pc} = \frac{U_{nc} I_{pmax}}{U_{nз}} = \frac{40 \times 20}{70} = 11,43, \quad (3)$$

где  $U_{nз} = 70$  В — заданное напряжение на зажимах лабораторной печи, при полностью открытом фазовом

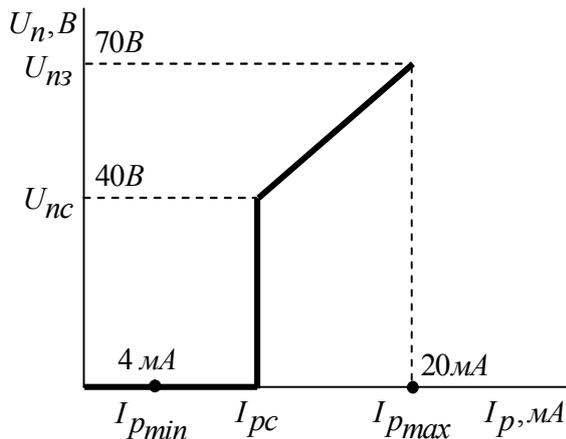


Рис. 3. Нелинейная характеристика фазового регулятора и тиристорного регулятора напряжения

регуляторе (ток на входе фазового регулятора  $I_{p_{max}} = 20$  мА).

Нижний порог зоны нечувствительности ТРН превышает нижний порог зоны нечувствительности регулятора температуры  $I_{pc} = 11,43$  мА  $>$   $I_{p_{min}} = 4$  мА. Поэтому нелинейная характеристика регулятора температуры может быть ограничена только сверху на величине  $I_{p_{max}} = 20$  мА.

С учетом ограничения выхода регулятора на величине  $I_{p_{max}} = 20$  мА и нелинейной характеристики, изображенной на рис. 3, структурная схема САР температуры в печи примет вид, показанный на рис. 4.

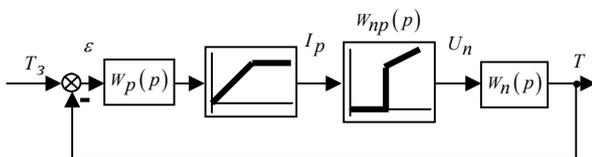


Рис. 4. Структурная схема САР температуры в печи с учетом структурных ограничений

### Объект регулирования

При моделировании тепловых агрегатов объект регулирования включает в себя печь и датчик температуры. Следовательно, передаточная функция объекта регулирования  $W_n(p)$  равна произведению передаточных функций печи и датчика температуры.

Для получения передаточной функции объекта управления, построим график изменения температуры в печи, подав на зажимы печи напряжение питания  $U_{nz} = 70$  В. Получим переходной процесс (кривая разгона печи), приведенный на рис. 5.

Так как начальная температура в печи соответствует температуре окружающей среды  $18$  °С, сместим ось ординат, и получим шкалу температур, сдвинутую относительно основной (рис. 6).

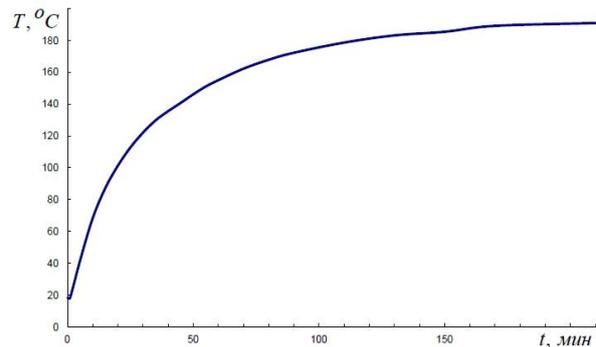


Рис. 5. Экспериментальная кривая разгона печи

На основании эксперимента установлено, что запаздывание составляет  $\tau = 30$  с.

Кривая переходного процесса изменения температуры в печи (рис. 6, кривая 1) похожа на переходную характеристику аperiodического звена первого порядка. Получим с помощью этой кривой коэффициенты передаточной функции объекта управления.

Как следует из кривой разгона печи (рис. 2), установившееся значение температуры составляет  $T_{уст} = 172$  °С.

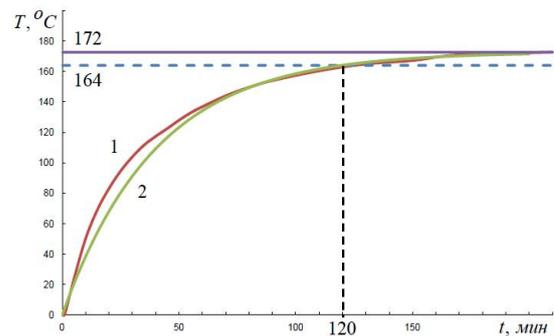


Рис. 6. Экспериментальная кривая разгона печи (1) со смещенной шкалой температур и расчетная кривая разгона печи (2)

Время регулирования  $t_p$  определим, как время достижения температуры  $0,95T_{уст}$  (вхождение переходного процесса в 5%-ную трубку). Для этого отложим на оси ординат значение температуры  $0,95T_{уст} = 164$  °С. Проведем горизонтальную пунктирную линию от ординаты  $164$  °С до пересечения с кривой разгона печи. Из точки пересечения опустим перпендикуляр на ось абсцисс, получив точку, соответствующую времени регулирования  $t_p = 120$  мин =  $7200$  с.

Постоянная времени печи:

$$T_n = \frac{t_p}{3} = \frac{7200}{3} = 2400 \text{ с.} \quad (4)$$

Коэффициент передачи  $K_n$  рассчитаем, как отношение установившегося значения температуры к напряжению питания.

$$K_n = \frac{T_{уст}}{U_{нз}} = \frac{172}{70} = 2.46, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{В}}. \quad (5)$$

Влиянием запаздывания на переходной процесс изменения температуры в печи пренебрежем ввиду его малости.

С учетом выражений (4), (5) передаточная функция печи и датчика температуры примет вид:

$$W_n(p) = \frac{K_n}{T_n p + 1} = \frac{2.46}{2400p + 1}. \quad (6)$$

Для проверки математической модели объекта управления (6) воспользуемся Simulink-моделью (рис. 7).

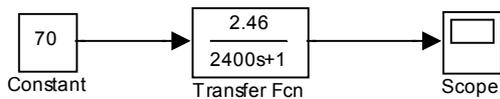


Рис. 7. Simulink-модель нагревательной печи и датчика температуры

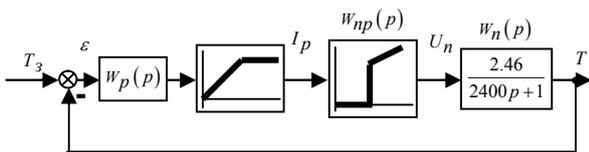


Рис. 8. Структурная схема САУ температуры в печи с учетом структурных ограничений

На вход печи и датчика температуры скачком подается сигнал равный напряжению на зажимах печи  $U_{нз} = 70$  В. Время моделирования принято равным  $t_m = 6T_n = 6 \times 2400 = 14400$  с.

Сравнение графика переходного процесса в аperiodическом звене вида (3), полученного посредством Simulink-модели (рис. 6, кривая 2) и графика, полученного в результате эксперимента (рис. 6, кривая 1), пока-

зывает их хорошее совпадение (среднеквадратичное значение ошибки составляет  $7.3^{\circ}\text{C}$ ).

С учетом передаточной функции печи и датчика температуры (6) структурная схема САУ температуры может быть представлена в виде:

**Выводы**

- САУ температурным режимом нагревательной печи состоит из линейных и нелинейных звеньев;
- нелинейность преобразователя обусловлена как фазовым регулятором, так и тиристорным регулятором напряжения;
- нижнее ограничение регулятора температуры можно не учитывать, поскольку оно меньше нижнего порога зоны нечувствительности ТНР.
- по экспериментальной кривой разгона печи определены постоянная времени и коэффициент передачи объекта управления;
- получено выражение для передаточной функции объекта управления;
- сопоставление результатов моделирования и эксперимента показывает соответствие передаточной функции печи и датчика температуры реальному объекту управления.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Зворыкин В.Б., Егоров А.П., Михалев А.И. Структурная идентификация системы автоматического управления тепловым агрегатом // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 6 (101). – Днепропетровск, 2015. с. 144-148.
2. Контроллер с двойной функцией автонастройки PID регулятора. Серия TZN/TZ. Техническое описание. Autonics. 22 с.
3. Solid state relays industrial, 1-phase analog switching type RM1E. Техническое описание. Carlo Gavazzi. 4 с.