

УДК 621.311:681.5

Полищук И.А., Мовчан А.П.

НТУУ “Киевский Политехнический Институт”

## САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Розглянуто алгоритм адаптивного керування квазістаціонарними енергетичними об'єктами, що полягає у підстроюванні загального коефіцієнта підсилення замкнутої АСР по модулю помилки і її похідної, а також часу досягнення максимуму похідної, з корекцією постійної інтегрування за оцінками прямих показників якості. Наведено результати моделювання у середовищі MATLAB. Показана його придатність в широких межах зміни параметрів об'єкту.

Рассмотрен алгоритм адаптивного управления квазистационарными энергетическими объектами, заключающийся в подстройке общего коэффициента усиления замкнутой АСР по модулю ошибки и её производной, а также времени достижения максимума производной, с коррекцией постоянной интегрирования по оценкам прямых показателей качества. Приведены результаты моделирования в среде MATLAB. Показана его пригодность в широких пределах изменения параметров объекта.

The technique for building the self-tuned regulators of power engineering quasi-stationary objects is proposed. It consists in tuning of the total amplification coefficient for closed automatic regulation system with respect to its error absolute value and derivative as well as correction of the integration constant with the use of the estimation of direct quality factors. The results of modeling are presented. The operability of self-tuned regulator within wide range of the object parameters change is shown.

$k_{об}$  – коэффициент передачи объекта;  
 $k_{\partial}$  – время дифференцирования;  
 $k_u$  – коэффициент, учитывающий время интегрирования;  
 $k_p$  – общий коэффициент усиления объекта;  
 $K_p^n$  – значение общего коэффициента усиления регулятора перед адаптацией;  
 $K_p^{n+1}$  – новое значение общего коэффициента усиления регулятора;  
 $n, m$  – номер шагов адаптации;  
 $t_1$  – момент времени, в который первая производная сигнала ошибки принимает максимальное значение  $\dot{\varepsilon}(t)|_{t_1} = \max \dot{\varepsilon}(t)$ , а вторая производная  $\ddot{\varepsilon}(t)|_{t_1} = \ddot{\varepsilon}(t_1) = 0$ ;

$T$  – заданное время идентификации;  
 $T_u^m$  – значение времени интегрирования на  $m$ -ом шаге;  
 $T_u^{m+1}$  – значение времени интегрирования на  $(m + 1)$ -ом шаге;  
 $T_{об}$  – постоянная времени объекта;  
 $U_{\min}$  – минимальное значение  $u$  за время  $T$ ;  
 $U_{зад}$  – заданное значение выходной величины;  
 $\alpha, \beta, \gamma$  – весовые коэффициенты;  
 $\varepsilon(t)$  – сигнал ошибки регулирования;  
 $\varepsilon(t_1)$  – сигнал ошибки регулирования в момент времени  $t_1$ ;  
 $\dot{\varepsilon}(t_1)$  – производная от сигнала ошибки в момент времени  $t_1$ ;  
 $\tau$  – запаздывание объекта.

### Введение

Алгоритмы функционирования систем управления, полученные на стадии проектирования по математической модели объекта обычно в значительной степени отличаются от оптимальных в части численных значений их параметров, что объясняется несовершенством априорной модели объекта. Практически трудно получить математическую модель экспериментальным путём,

которая с высокой точностью описывала бы работу объекта управления, из-за нестационарности возмущений и неформализуемого вмешательства обслуживающего персонала. Кроме того, динамические свойства объекта управления меняются во времени при изменении режимов работы, что может потребовать подстройки АСР в процессе эксплуатации.

Так, для прямоточного котла ТГМП по каналу “подача топлива – температура за потолочным

экраном” коэффициент передачи в диапазоне рабочих нагрузок изменяется в 3...4 раза [1].

В системе автоматического регулирования процесса кондиционирования коэффициент передачи за счёт нелинейности характеристик изменяется в 2...3 раза.

В передаточной функции участка регулирования температуры перегретого пара за парогенератором постоянные времени и коэффициент передачи изменяются в 2...3 раза в зависимости от нагрузки.

Поскольку работы по настройке АСР при пуске объекта, а также во время эксплуатации, в частности, после выполнения ремонтных работ оказываются неизбежными, возникают организационные проблемы при их выполнении. Большое число настраиваемых контуров, которое на современном объекте может достигать нескольких десятков или сотен, высокие требования к профессиональной подготовке наладочного персонала существенно усложняют быстрое и высококачественное выполнение этих работ.

Возникает необходимость применения систем управления, обладающих способностью к самонастройке или адаптивных САУ.

### **Цели исследования**

Известные методы адаптивного управления отличаются сложностью математического обеспечения, технической реализации и потому не нашли широкого распространения.

Авторами был предложен адаптивный пропорционально-интегрально- дифференциальный (ПИД) закон регулирования, в основу которого положена процедура коррекции настроек регулятора по информации о параметрах переходной характеристики замкнутого контура [3].

Предложенный алгоритм прост в реализации и позволяет обеспечить требуемые показатели качества регулирования объектами с переменными параметрами. Однако при введении в действие регулятора необходимы начальные значения динамических параметров объекта, так как в противном случае потребуются значительное количество шагов адаптации, а в некоторых случаях результат не будет достигнут.

В связи с этим необходимо проведение исследований указанного выше алгоритма с целью оп-

ределения пределов изменения параметров объекта, в которых могут быть достигнуты требуемые качественные показатели, а также метода оценки динамических параметров объекта для вычисления начального значения времени интегрирования ПИД регулятора.

Поскольку для всех объектов с самовывравниванием порядка выше первого возможно получение упрощённой модели в виде апериодического звена первого порядка с запаздыванием, то в качестве математической модели исследования выбрана передаточная функция

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об} \cdot p + 1} \cdot e^{-\tau \cdot p}, \quad (1)$$

с помощью которой описывается динамика теплоэнергетических объектов. В качестве объектов исследования выбраны: независимая система отопления с параметрами  $k_{об} = 0,7$ ,  $T_{об} = 100$  с,  $\tau = 65$  с и зависимая система отопления с параметрами  $k_{об} = 0,3$ ,  $T_{об} = 2600$  с,  $\tau = 2000$  с

Для исследования работы алгоритма в условиях изменения характеристик рассмотрен канал “температура пара за потолочным экраном – подача топлива” энергоблока, мощностью 800 МВт, динамические параметры которого изменяются в пределах:  $k_{об} = 1,46...4$ ,  $T_{об} = 120...290$  с,  $\tau = 20...45$  с [4].

### **Описание алгоритма самонастройки**

Среди большого количества самонастраивающихся систем автоматического регулирования (СНС АР) наиболее простыми в реализации являются системы, использующие информацию только о регулируемой координате и об оценке её производной.

Известно [1, 2], что для объекта порядка выше первого по времени  $t_1$  достижения максимума первой производной выходной величины  $y(t)$  можно судить о статических и динамических свойствах объекта. Для построения СНС АР используются результаты анализа начального участка переходной характеристики разомкнутой АСР, получаемой путём подачи ступенчатого управляющего воздействия. Однако, предложенный способ коррекции настроек не всегда при-

меним, так как требует размыкания АСР при подаче идентифицирующего воздействия. В статье рассматривается метод построения СНС АР стабилизации в классе типовых ПИД законов регулирования, основанный на коррекции коэффициента усиления регулятора  $K_p$  по результатам анализа реакции замкнутой АСР на ступенчатое изменение выхода объекта.

Экспериментально установлено наличие зависимости коэффициента передачи регулятора от величины  $A(t, |\varepsilon(t_1)|, |\dot{\varepsilon}(t_1)|)$ , где

$$A = \frac{|\varepsilon(t_1)|}{t_1 \cdot |\dot{\varepsilon}(t_1)|}, \quad \varepsilon(t) = y(t) - y_{зад} \quad (2)$$

Рекомендуемый адаптивный ПИД закон регулирования имеет следующий вид [3]:

$$u(t) = K_p^{(n+1)} \cdot (\varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \cdot \int \varepsilon(t) dt + T_d \cdot \dot{\varepsilon}(t)),$$

$$K_p^{(n+1)} = K_p^{(n)} \cdot \alpha \cdot A, \quad (3)$$

где соотношение времени дифференцирования  $T_d$  ко времени интегрирования  $T_u$  постоянное и равно  $\frac{T_d}{T_u} = 0,6$ . С помощью коэффициента  $\alpha$  задаются показатели качества регулирования.

### Исследования работы алгоритма

Исследование алгоритма выполнено путём математического моделирования СНС АР в среде Matlab 6.5.

Период дискретизации выбран равным  $\Delta t \cong 0,01 \cdot T_{об}$ . В качестве критерия останова процесса поиска оптимального значения  $K_p$  выбран критерий:  $|K_p^{(n+1)} - K_p^{(n)}| < 0,01$ .

Результирующими показателями качества переходных процессов будем считать попадание величины динамической ошибки в область  $0 < \delta < 0,2$ , а  $t_p < 3 \cdot (T_{об} + \tau)$ .

Возмущение, наносимое по выходной величине в процессе работы СНС АР, выберем равным

1% от максимального значения выходной величины.

В дальнейшем будем рассматривать только адаптивный ПИ закон регулирования, то есть  $T_d = 0$ .

Проведём исследование влияния коэффициента  $\alpha$  на конечный вид переходного процесса. На рис. 1 показаны переходные характеристики для объекта с параметрами  $k_{об} = 1,5$ ,  $T_{об} = 120$  с,  $\tau = 20$  с и при начальных настройках  $K_p^{(0)} = 0,62$ ,  $T_u^{(0)} = 84$ , определённых по инженерным формулам [4] в конце процесса адаптации при различных значениях  $\alpha$  и достижении динамической ошибки заданного значения  $0 < \delta < 0,2$ .

Оптимальным значением  $\alpha$  с точки зрения качества переходного процесса является  $\alpha = 1,44$ , поскольку при изменении параметров объекта в пределах  $\pm 50\%$  сохраняются заданные показатели качества.

### Исследование влияния начальных настроек на работу СНС АР

Рассмотрим работу контура самонастройки при начальном включении регулятора.

Для независимой системы отопления по априорным данным известно, что параметры объекта находятся в пределах:  $T_{об} = 50...150$  с,  $\tau = 40...90$  с  $k_{об} = 0,4...1$ . При некоторых средних значениях  $T_{об} = 100$  с,  $\tau = 65$  с  $k_{об} = 0,7$ , по инженерным формулам [4] рассчитаем  $K_p^{(0)} = 1,54$ ,  $T_u = 70$ . Переходные процессы, характеризующие работу контура самонастройки, приведены на рис. 2.

При средних значениях параметров объекта  $k_{об} = 0,3$ ,  $T_{об} = 2600$  с,  $\tau = 2000$  с для зависимой системы отопления при  $K_p^{(0)} = 3,03$ ,  $T_u = 1820$ , определённых по инженерным формулам [4], переходные процессы при самонастройке представлены на рис.3.

Рассмотрим работу СНС АР по каналу “температура пара за потолочным экраном – подача топлива” энергоблока мощностью 800 МВт при различных параметрах объекта. Допустим, что в начальный момент времени параметры объекта были следующими:

$k_{об} = 1,46$ ,  $T_{об} = 120$  с,  $\tau = 20$  с. Определим начальные настройки регулятора по априорным данным об объекте по инженерной методике [4]  $K_p^{(0)} = 2,88$ ,  $T_u = 84$ . Переходные характеристики

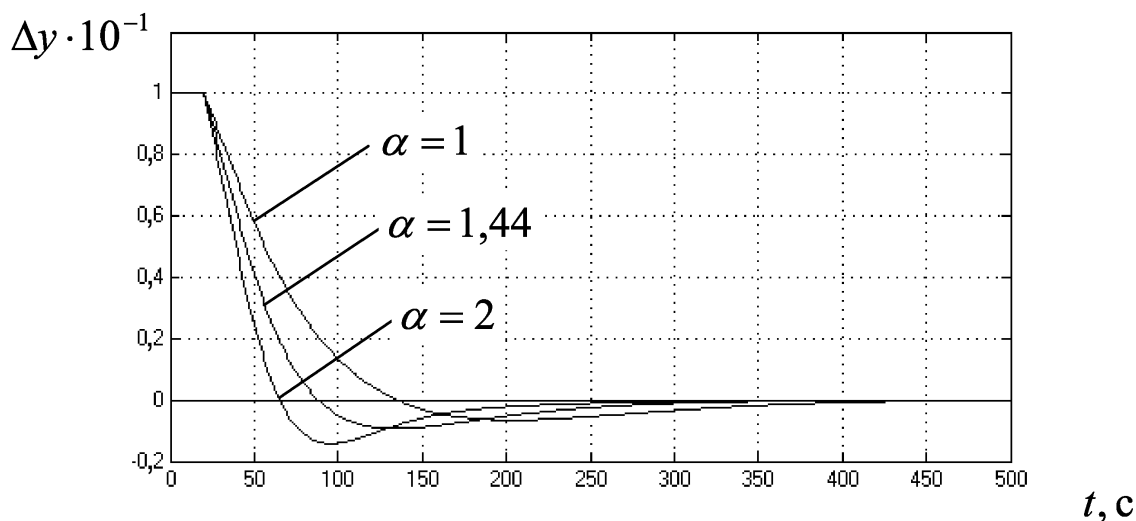


Рис. 1. Переходные характеристики при различных значениях  $\alpha$ .

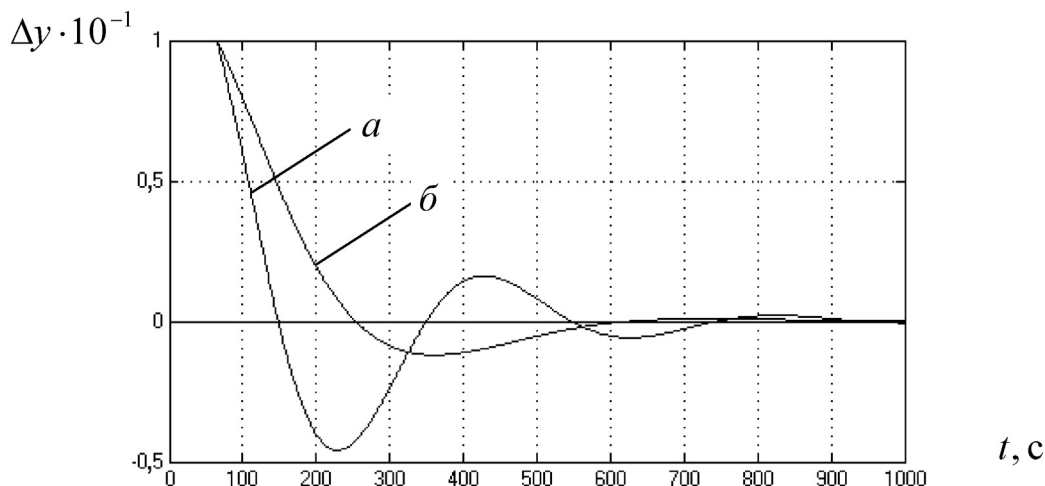


Рис. 2. Переходные характеристики в замкнутой АСР для независимой системы отопления: а – переходная характеристика при начальных настройках регулятора, б – переходная характеристика при  $n = 4$ ,  $K_p^{(4)} = 0,794$ .

в САР до и после самонастройки представлены на рис. 4.

Допустим теперь, что через определённый промежуток времени произошла смена нагрузки и параметры объекта существенно изменились:  $k_{об} = 1,46$ ,  $T_{об} = 290$  с,  $\tau = 20$  с.

Переходные процессы до и после самонастройки в этом случае представлены на рис. 5, при  $K_p^{(0)} = 1,58$ ,  $T_u = 84$ .

Начальный переходный процесс и полученный на четвёртом шаге адаптации, не соответствует требуемым показателям качества,  $0 < \delta < 0,2$ , а  $t_p < 3 \cdot (T_{об} + \tau)$ . Это объясняется отклонением па-

раметров объекта от базовых при расчёте начальных значений настроек СНС регулятора. Анализ выполненных исследований, представленных на рис. 2 – 5, показывает, что погрешности в оценке  $T_{об}$ , а следовательно, и в определении  $T_u^{(0)}$  в ряде случаев не позволяет получить настройки регулятора, обеспечивающие требуемые показатели качества, в то же время изменение коэффициента передачи объекта несущественно влияет на конечный результат самонастройки. Для улучшения функционирования адаптивного регулятора необходимо предусмотреть процедуру автоматической оценки  $k_{об}$ ,  $T_{об}$ ,  $\tau$  при первичном

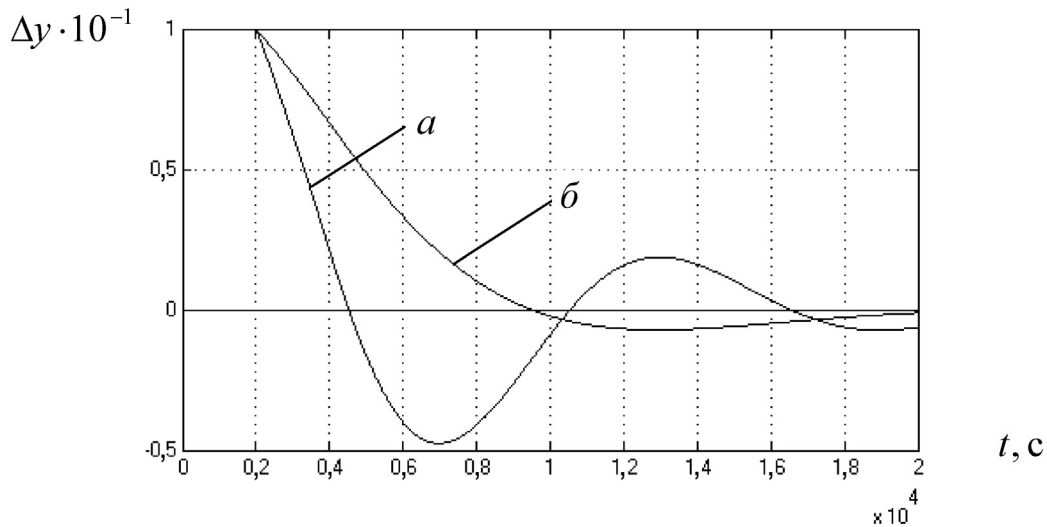


Рис. 3. Переходные характеристики в замкнутой АСР для зависимой системы отопления: а – переходная характеристика при начальных настройках регулятора, б – переходная характеристика при  $n = 3$ ,  $K_p^{(3)} = 1,29$ .

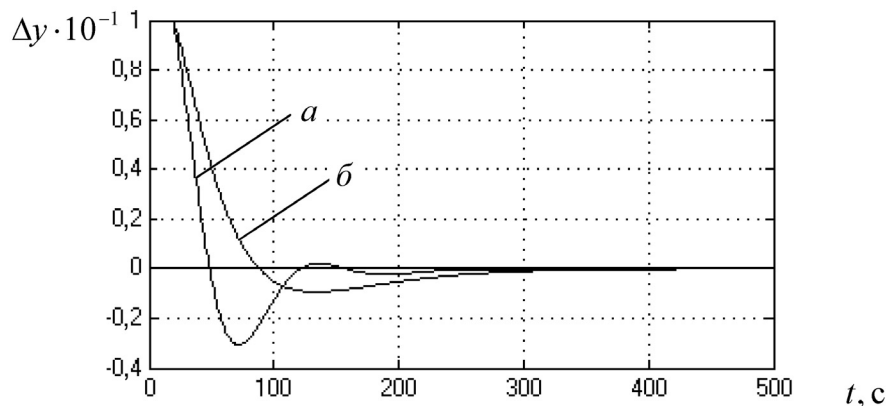


Рис. 4. Переходные характеристики в замкнутой АСР для энергоблока с параметрами  $k_{об} = 1,46$ ,  $T_{об} = 120$  с,  $\tau = 20$  с: а – переходная характеристика при начальных настройках регулятора, б – переходная характеристика при  $n = 3$ ,  $K_p^{(3)} = 1,58$ .

включения, а также коррекцию величины  $T_u$ , если в процессе работы возможно существенное изменение постоянной времени.

### Обсуждение результатов

Результаты моделирования показали, что начальные настройки влияют на качество переходного процесса, но не являются определяющими. Для получения высоких показателей качества при первичном включении контура самонастройки разработан алгоритм определения начальных настроек регулятора. Для определения этих настроек необходимо подать тестовое возмущение на вход

объекта в разомкнутой системе для определения параметров объекта. В результате анализа кривой переходной характеристики на выходе объекта в момент  $t_1$  (см. рис. 6) получим значения производной выходной величины в момент  $t = t_1 - y(t_1)$  и коэффициент усиления объекта  $k_0$  (см. рис. 6). По полученным значениям  $k_0$  и  $y(t_1)$  определяем  $K_p^{(0)}$ ,  $T_u^{(0)}$ ,  $T_D^{(0)}$  по зависимостям:

$$K_p^{(0)} = \frac{0,5}{k_0}, T_u^{(0)} = 0,8 \cdot T_{об} = 0,8 \cdot \frac{k_0}{|\dot{y}(t_1)|},$$

$$T_D^{(0)} = 0,6 \cdot T_u^{(0)} . \tag{4}$$

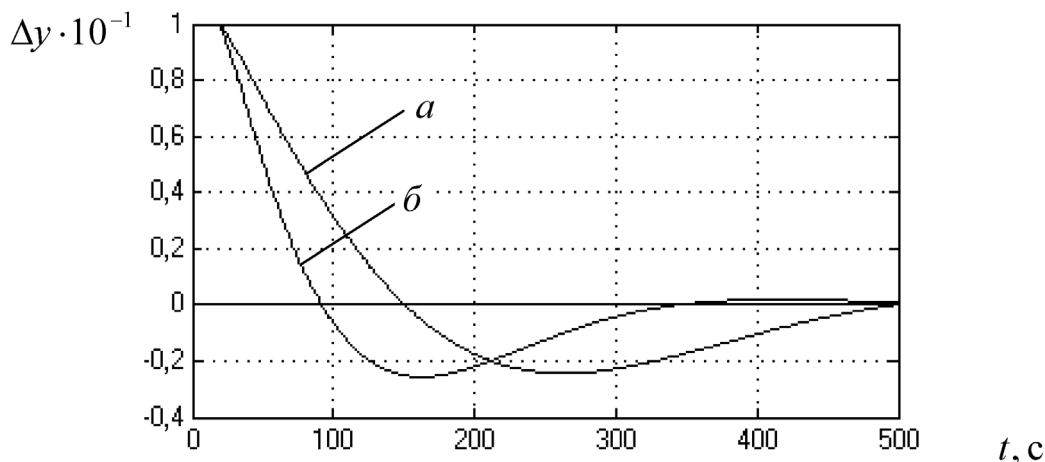


Рис. 5. Переходные характеристики в замкнутой АСР для энергоблока с параметрами  $k_{об} = 1,46$ ,  $T_{об} = 290$  с,  $\tau = 20$  с: а – переходная характеристика при начальных настройках регулятора, б – переходная характеристика при  $n = 4$ ,  $K_p^{(4)} = 2,94$ .

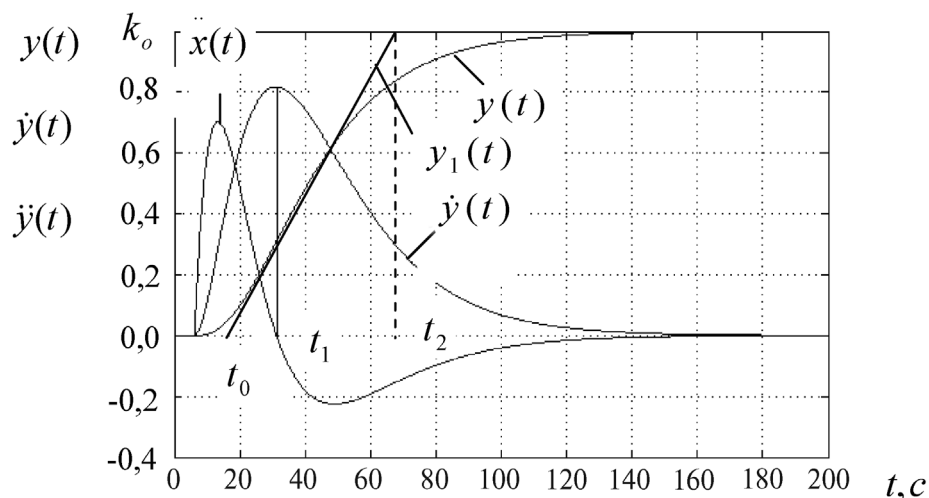


Рис. 6. Переходная характеристика, производная и вторая производная от неё.

Рассмотрим теоретическое обоснование зависимостей (4). Для определения  $T_{об}$  необходимо провести касательную в точке перегиба переходной характеристики (см. рис. 6). Запишем уравнение прямой проходящей через точку перегиба:

$$y_1(t) - y(t_1) = k(t - t_1), \quad (5)$$

где  $k$  – угловой коэффициент прямой.

Тогда получим следующее уравнение прямой:

$$y_1(t) = \dot{y}(t_1) \cdot (t - t_1) + y(t_1). \quad (6)$$

Поскольку согласно рис. 6  $T_{об} = t_2 - t_0$ , то для нахождения  $T_{об}$  необходимо определить моменты времени  $t_2$  и  $t_0$ . Для определения  $t_0$  необходимо

$y_1(t)$  приравнять к 0. Получим:

$$0 = \dot{y}(t_1) \cdot (t_0 - t_1) + y(t_1) \rightarrow t_0 = -\frac{y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} + t_1. \quad (7)$$

Для определения  $t_2$  необходимо  $y_1(t)$  приравнять к  $k_0$ . Отсюда:

$$k_0 = \dot{y}(t_1) \cdot (t_2 - t_1) + y(t_1) \rightarrow t_2 = \frac{k_0 - y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} + t_1. \quad (8)$$

$$\text{Тогда } T_{об} = t_2 - t_0 = \frac{k_0 - y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} + t_1 + \frac{y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} - t_1 = \frac{k_0}{\dot{y}(t_1)}. \quad (9)$$

Рекомендуемое тестовое возмущение должно составлять 1...5 % от максимального значения

Табл.

Инженерные формулы [4]		Метод, предложенный авторами	
$k_p^{(0)}$	$T_u^{(0)}$	$k_p^{(0)}$	$T_u^{(0)}$
0,62	84	0,75	82,5

выходной величины. Это обусловлено наличием помех при работе объекта управления и влиянием на ход технологического процесса в результате подачи тестового возмущения.

В качестве примера определения начальных настроек выберем передаточную функцию с параметрами  $k_{об} = 1,5$ ,  $T_{об} = 120$  с,  $\tau = 20$  с. В табл. приведены начальные настройки регулятора, определённые по инженерным формулам [4] и с помощью алгоритма, предложенного выше.

Как видно из полученных результатов, начальные настройки, определённые разными методами, практически не отличаются. Это свидетельствует о возможности применения алгоритма, предложенного авторами.

Также результаты исследований показали, что существенным является влияние начального значения постоянной времени объекта. Поскольку в процессе работы системы, с изменением нагрузки, постоянная времени объекта может изменяться, то начальное значение  $T_u^{(0)}$  может существенно отличаться от оптимального значения. Это соответствует ситуации, когда объект квазистационарный либо нелинейный и его параметры могут существенно изменяться в процессе функционирования. Предложенная стратегия коррекции  $T_u$  основана на использовании упорядоченных правил регулирования, которые действительны для выбранных характеристик и подобно нечёткому регулятору представляют базу знаний.

Введём переменные:

$$H(t) = \begin{cases} \varepsilon, & \text{если } \varepsilon(t) < 0, \\ 0, & \text{если } \varepsilon(t) \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta_{дин} = \begin{cases} y_{зад} - y_{min}, & \text{если } \varepsilon(t) > 0, \forall t \in (0; T), \\ 0, & \text{если } y(t) \geq y_{зад}, \varepsilon(t) \leq 0, \forall t \in (0; T). \end{cases} \quad (11)$$

$$t_{рег} = t, \text{ если } |\varepsilon(t)| \leq 0,05, \forall t > t_{рег}. \quad (12)$$

Где  $y_{min}$  – минимальное значение  $y$  за время  $T$ ,  $y_{зад}$  – заданное значение выходной величины.

Правила, описывающие стратегию коррекции, имеют вид:

если  $H(t) > 0, \Delta \leq 0 \quad \forall t \in (0; T)$ , то

$$T_u^{m+1} = T_u^m - \beta \cdot H(T), \quad (13)$$

если  $H(t) \leq 0, \Delta > 0 \quad \forall t \in (0; T)$ , то

$$T_u^{m+1} = T_u^m + \gamma \cdot \Delta_{дин}. \quad (14)$$

Величины  $\beta, \gamma, T$  определяются экспериментально для выделенного класса объектов и могут уточняться в процессе наладки. Критерием окончания итерационного процесса является выполнение неравенств:

$$|k_p^{(n+1)} - k_p^{(n)}| \leq \varepsilon_1; \quad |T_u^{(m+1)} - T_u^{(m)}| \leq \varepsilon_2,$$

В результате выполнения коррекции  $T_u$  для ситуации, рассмотренной на рис. 5 получены переходные процессы представленные на рис. 7.

За счёт введенной подстройки  $T_u$  результирующий переходный процесс, кривая б, характеризуется показателями качества, которые существенно превосходят представленные на рис. 5б и удовлетворяют условиям  $0 < \delta < 0,02, t_p < 1,5 \cdot T_{об}$ .

### Выводы

1. Разработан алгоритм адаптации коэффициента усиления ПИ(ПИД) регулятора по информации о модуле ошибки и её производной в момент. Установлено, что постоянный коэффициент алгоритма  $\alpha$  определяет показатели качества

регулирования. Для достижения  $\frac{\Delta y_{max}}{y_{зад}} < 20\%$ ,

$t_p < 3 \cdot (T_{об} + \tau)$  рекомендуется величина  $\alpha = 1,44$ .

2. Предложены и теоретически обоснованы расчётные формулы (4), с помощью которых производится начальная настройка СНС регулятора.

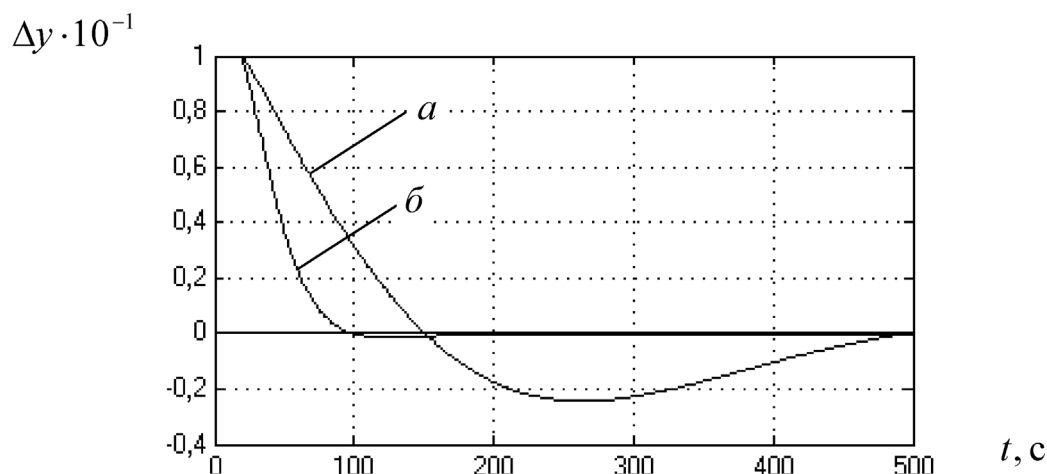


Рис. 7. Переходные характеристики в замкнутой АСР для энергоблока с параметрами  $k_{об} = 1,46$ ,  $T_{об} = 290$  с,  $\tau = 20$  с: а – переходная характеристика при начальных настройках регулятора, б – переходная характеристика при  $n = 4$ ,  $m = 1$ ,  $K_p^{(4)} = 4,31$ ,  $T_u^{(1)} = 275,3$ .

3. Разработан алгоритм коррекции  $T_u$ , который существенно повышает показатели качества

переходного процесса:  $\frac{\Delta y_{\max}}{y_{\text{зад}}} < 2\%$ ,  $t_p < 1,5 \cdot T_{об}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шубладзе А.М., Уланов А.Г., Ткачев В.П., Гулзев В.С., Ланченко Н.П. “Адаптивные промышленные регуляторы” – Приборы и системы управления, 1981, №7, с.15-16.

2. Загарий Г.И., Шубладзе А.М. “Синтез систем управления на основе критерия максималь-

ной степени устойчивости”. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.

3. Адаптивный регулятор с идентификацией в замкнутом контуре/ И.А. Полищук, Ю.М. Ковриго, А.П. Мовчан // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2004. – №2. – С. 16-22.

4. Плетнёв Г.П. “Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок электростанций”: учебник для техникумов. – 3-е издание, перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.

Получено 20.09.2005 г.