

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕМ ПРОМЕЖУТОЧНОГО СИГНАЛА

Докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т., канд. техн. наук, доц. КУЛАКОВ А. Т.,  
инж. КОРЗУН М. Л., студ. БАСАЛАЙ Д. В.\*

*Белорусский национальный технический университет*

Двухконтурные системы автоматического регулирования (САР) с дифференцированием промежуточного сигнала получили максимальное распространение в области автоматизации технологических процессов и производств в теплоэнергетике. Так, регулирование температуры перегретого пара барабанных и прямоточных котлов осуществляется двухимпульсной схемой: с основным сигналом по отклонению температуры перегретого пара на выходе котла и дополнительным исчезающим сигналом по температуре пара после охладителя [1].

Методы расчета параметров оптимальной динамической настройки типовых САР с дифференциатором подробно изложены в [2–4]. При этом качество регулирования технологических параметров определяет экономичность, надежность и долговечность работы теплоэнергетического оборудования. Вместе с тем планируемый ввод в Белорусскую энергосистему двух блоков АЭС ужесточает требования к качеству регулирования энергоблоков, которые будут работать в полупиковой и пиковых частях графика электрической нагрузки энергосистемы.

Таким образом, актуальной становится проблема структурно-параметрической оптимизации САР энергетических процессов энергоблоков, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок и режимов, обеспечивающей существенное улучшение качества регулирования технологических параметров по сравнению с типовой САР с дифференциатором.

Структурная схема моделирования типовой САР с дифференциатором приведена на рис. 1.

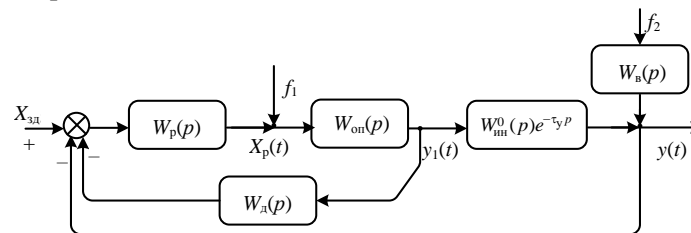


Рис. 1. Структурная схема САР с дифференциатором:  $y(t)$  – основная регулируемая величина;  $y_1(t)$  – промежуточная регулируемая величина;  $X_p(t)$  – регулирующее воздействие;  $X_{зд}$  – заданное значение регулируемого параметра;  $f_1$  и  $f_2$  – внутреннее и внешнее возмущения;  $W_{on}(p)$  – передаточная функция опережающего участка объекта регулирования;  $W_{ин}(p) = W_{ин}^0(p)e^{-\tau_y p}$  – передаточная функция инерционного участка ( $W_{ин}^0(p)$  – та часть передаточной функции инерционного участка, которая не содержит запаздывания;  $\tau_y$  – запаздывание по каналу регулирующего воздействия);  $W_b(p)$  – передаточная функция крайнего внешнего возмущения;  $W_p(p)$  – передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора;  $W_d(p)$  – передаточная функция дифференциатора промежуточной регулируемой величины

\* Работа выполнена при содействии Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Передаточные функции объектов регулирования можно определить расчетным путем по конструктивным и режимным характеристикам объектов либо получить экспериментальным или экспериментально-расчетным путем, что значительно точнее и проще с использованием экспериментальных переходных характеристик. Вместе с тем экспериментальное определение переходных характеристик опережающего участка трудностей не вызывает, так как на вход этого участка подается скачок регулирующего воздействия. Если при этом записать график переходной характеристики по основной регулируемой величине, то аппроксимация последней позволяет определить передаточную функцию последовательно соединенных опережающего и инерционного участков объектов регулирования, т. е. передаточную функцию главного участка.

Для расчета параметров оптимальной динамической настройки дифференциатора необходимо знать передаточную функцию инерционного участка объекта регулирования  $W_{ин}(p)$ , которую можно определить графоаналитическим путем по методике, приведенной в [2], на основе экспериментальных переходных характеристик опережающего и главного участков объекта регулирования. Однако такой способ определения динамики инерционного участка трудоемок и приводит к увеличению погрешности аппроксимации. Для устранения этих недостатков предложено использовать при экспериментальном определении переходной характеристики инерционного участка разомкнуто-замкнутую систему: замкнутую – по промежуточной регулируемой величине и разомкнутую – по основной [5]. В этом случае приходится также экспериментально определять динамику как опережающего, так и инерционного участков объекта регулирования для трех уровней нагрузок энергоблока.

Экспериментальные графики переходных процессов аппроксимируют по методике, приведенной в [6], для опережающего участка в виде передаточной функции инерционного звена второго порядка

$$W_{оп}(p) = \frac{k_{оп}}{(T_{оп}p + 1)(\sigma_{оп}p + 1)}, \quad (1)$$

где  $k_{оп}$ ,  $T_{оп}$ ,  $\sigma_{оп}$  – соответственно коэффициент усиления, большая и меньшая постоянные времени опережающего участка.

Для инерционного участка в виде передаточной функции инерционного звена второго порядка с запаздыванием

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y p}}{(T_{ин}p + 1)(\sigma_{ин}p + 1)}, \quad (2)$$

где  $k_{ин}$ ,  $T_{ин}$ ,  $\sigma_{ин}$ ,  $\tau_y$  – соответственно коэффициент усиления, большая и меньшая постоянные времени инерционного участка, условное запаздывание по каналу регулирующего воздействия.

При этом для расчета параметров оптимальной динамической настройки дифференциатора передаточную функцию (2) приводят к виду инерционного звена первого порядка с запаздыванием

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y p}}{T_k p + 1}, \quad (3)$$

где  $T_k$  – интегральная постоянная времени, равная

$$T_k = T_{ин} + \sigma_{ин}. \quad (4)$$

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения имеет вид инерционного звена первого порядка

$$W_B(p) = \frac{k_B}{T_B p + 1}, \quad (5)$$

где  $k_B, T_B$  – коэффициент передачи и время разгона экспоненты.

Для обоснования предлагаемой структуры и параметров оптимальной динамической настройки САР, обеспечивающей существенное улучшение качества регулирования при основных возмущениях, использовались данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные динамики объекта регулирования для структурно-параметрической оптимизации САР**

Параметры передаточных функций								
Опережающего участка			Инерционного участка				Крайнего внешнего возмущения	
$k_{оп}, ^\circ\text{C}/\text{T}/\text{ч}$	$T_{оп}, \text{с}$	$\sigma_{оп}, \text{с}$	$k_{ин}$	$T_{ин}, \text{с}$	$\sigma_{ин}, \text{с}$	$\tau_y, \text{с}$	$k_B$	$T_B, \text{с}$
4,8	18,0	1,8	1,0	261,0	47,9	141,1	5,0	30,0

Наиболее опасным для энергоблоков, работающих в широком диапазоне изменения нагрузок и режимов, является крайнее внешнее возмущение (нагрузкой), эквивалентное скачку задающего воздействия.

Для существенного улучшения качества отработки скачка задания для объектов с большим запаздыванием целесообразно использовать линейный упредитель Смита, который охватывает основной регулятор полной моделью объекта регулирования с запаздыванием с помощью положительной обратной связи, а также неполной моделью (та часть передаточной функции объекта, которая не содержит запаздывания) с использованием отрицательной обратной связи на входе в регулятор [7]. Основным недостатком такого упредителя является плохая отработка внутреннего возмущения, так как регулятор узнает о его появлении после времени запаздывания по каналу регулирующего воздействия. Для устранения этого недостатка точку отбора входа неполной и полной моделей необходимо перенести с выхода регулятора в точку промежуточной регулируемой величины (рис. 2), т. е. использовать модифицированный линейный упредитель Смита [4].

Вместе с тем в этом случае отработка внутреннего возмущения хотя и будет лучше по сравнению с упредителем Смита, но хуже, чем в типовой двухконтурной САР с дифференциатором и основным ПИ-регулятором. При этом основной регулятор типовой САР настраивают по методу полной компенсации на оптимальную отработку крайнего внешнего возмущения по передаточной функции инерционного участка объекта: основной регулятор – по методу частичной компенсации (МЧК) на отработку внутреннего возмущения по передаточной функции опережающего участка объекта регулирования с учетом найденного значения коэффициента передачи

дифференциатора [8]. Для устранения этого недостатка используем принцип инвариантности, дополнительно измеряя наиболее опасное внутреннее возмущение и подавая этот сигнал на устройство компенсации внутреннего возмущения, подаваемого со входа основного регулятора. При этом передаточная функция устройства компенсации имеет передаточную функцию, обратную передаточной функции основного регулятора [6].

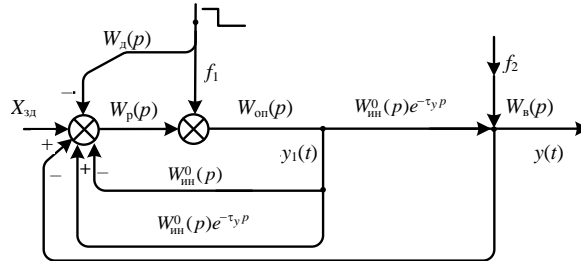


Рис. 2. Структурная схема моделирования предлагаемой САР при основных возмущениях:

$W_{ин}^0(p)$  – передаточная функция неполной модели инерционного участка объекта;

$W_{ин}^0(p)e^{-\tau_y p}$  – передаточная функция полной модели инерционного участка;

$W_д(p)$  – передаточная функция устройства компенсации внутреннего возмущения

В типовой схеме САР с дифференциатором используется пропорционально-интегральный закон регулирования (ПИ-регулятор). Вместе с тем после появления микропроцессоров в 1980-е гг. к наиболее распространенному типу регуляторов относится ПИД-регулятор, обеспечивающий повышение быстродействия по сравнению с ПИ-регулятором в 1,8 раза. Около 90–95 % регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм [9]. Среди ПИД-регуляторов одноконтурные системы занимают 64 %, многоконтурные – 34 % [10]. При этом в ПИД-регуляторах используются автоматическая настройка параметров, адаптивные и генетические алгоритмы, методы нечеткой логики, встроенные модели и т. д.

Структурная схема моделирования предлагаемой САР с учетом вышесказанного приведена на рис. 2. Здесь передаточная функция ПИД-регулятора имеет следующий вид:

$$W_p(p) = \frac{k_p(T_n p + 1)(T_d p + 1)}{T_n p}, \quad (6)$$

где  $k_p$ ,  $T_n$ ,  $T_d$  – соответственно коэффициент передачи регулятора, время интегрирования, время дифференцирования.

Передаточная функция устройства компенсации внутреннего возмущения представлена реальным дифференцирующим звеном второго порядка инерционности

$$W_д(p) = \frac{1}{W_p(p)} = \frac{k_d^* T_d^* p}{(T_d^* p + 1)(T_1 p + 1)}, \quad (7)$$

где

$$k_d^* = 1/k_p; T_d^* = T_i; T_l = T_d; \quad (8)$$

$k_d^*$  – коэффициент передачи;  $T_d^*$  – время дифференцирования;  $T_l$  – меньшая постоянная времени.

Для внутреннего контура системы регулирования (ПИД-регулятор – опережающий участок – неполная модель инерционного участка ОР) эквивалентным объектом регулирования является следующая передаточная функция:

$$W_{об}^{эkv}(p) = W_{ин}^0(p)W_{оп}(p) = \frac{k_{ин}k_{оп}}{(T_{ин}p + 1)(\sigma_{ин}p + 1)(T_{оп}^*p + 1)}, \quad (9)$$

где

$$T_{оп}^* = T_{оп} + \sigma_{оп}. \quad (10)$$

Используя метод полной компенсации в частном виде (МПК в ЧВ) для ПИД-регулятора, динамику внутреннего контура превратим в колебательное звено с коэффициентом демпфирования  $\xi = 0,707$ , рассчитав параметры динамической настройки регулятора на основе параметров передаточной функции опережающего и инерционных участков объекта регулирования по следующим формулам:

$$T_i = T_{ин} = 261 \text{ с}; \quad (11)$$

$$T_d = \sigma_{ин} = 47,9 \text{ с}; \quad (12)$$

$$T_{оп}^* = T_{оп} + \sigma_{оп} = 18 + 1,8 = 19,8 \text{ с}; \quad (13)$$

$$k_p = \frac{T_{ин}}{4\xi^2 k_{ин} k_{оп} T_{оп}^*} = \frac{261}{4 \cdot 0,5 \cdot 4,8 \cdot 1 \cdot 19,8} = 1,36 \text{ Т/ч/}^\circ\text{С}. \quad (14)$$

Если в качестве основного регулятора используют ПИ-регулятор, то его параметры оптимальной динамической настройки определяют по формулам МПК в ЧВ [6]:

$$T_i = T_k = T_{ин} + \sigma_{ин} = 261 + 47,9 = 308,9 \text{ с}; \quad (15)$$

$$k_p = \frac{T_{ин} + \sigma_{ин}}{2k_{ин} k_{оп} T_{оп}^*} = \frac{308,9}{2 \cdot 4,8 \cdot 1 \cdot 19,8} = 1,625 \text{ Т/ч/}^\circ\text{С}. \quad (16)$$

Определить структуру и рассчитать параметры оптимальной динамической настройки основного регулятора можно на основе экспериментальной переходной характеристики главного участка объекта регулирования (вход – скачок регулирующего воздействия; выход – основная регулируемая величина), что существенно сокращает трудозатраты на проведение эксперимента. При этом экспериментальная переходная характеристика аппроксимируется в виде инерционного звена второго порядка с условным запаздыванием по методике, приведенной в [6]

$$W_{об}^{эКВ}(p) = \frac{k_{ин} k_{оп} e^{-\tau_y p}}{(T_{ин}^{эКВ} p + 1)(\sigma_{ин}^{эКВ} p + 1)}, \quad (17)$$

где  $T_{ин}^{эКВ}$  – большая постоянная времени эквивалентного объекта;  $\sigma_{ин}^{эКВ}$  – меньшая постоянная времени этого объекта.

В этом случае параметры динамической настройки ПИД-регулятора рассчитывают на основе той части передаточной функции (17), которая не содержит запаздывание  $\tau_y$ :

$$W_{об1}^{эКВ}(p) = \frac{k_{ин} k_{оп}}{(T_{ин}^{эКВ} p + 1)(\sigma_{ин}^{эКВ} p + 1)}. \quad (18)$$

Причем в данном случае используют метод полной компенсации в общем виде [4]:

$$T_i = T_{ин}^{эКВ}; \quad (19)$$

$$T_d = \frac{\sigma_{ин}^{эКВ}}{4}; \quad (20)$$

$$k_p = \frac{T_{ин}^{эКВ}}{2k_{ин} k_{оп} \sigma_{ин}^{эКВ}}. \quad (21)$$

Графики оптимальных переходных процессов, полученные с использованием стандартной программы моделирования [11] типовой и предлагаемой САР с основными ПИ- и ПИД-регуляторами при отработке скачка задания, приведены на рис. 3.

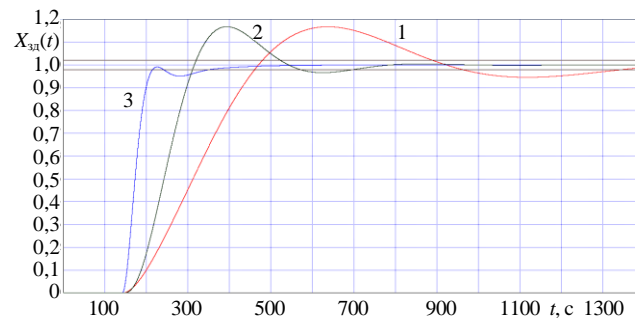


Рис. 3. Графики переходных процессов САР при отработке задающего воздействия  $X_{зд}$ :  
1 – типовая САР; 2 – предлагаемая САР с ПИ-регулятором;  
3 – предлагаемая САР с ПИД-регулятором

Из анализа графиков переходных процессов следует, что замена дифференциатора типовой САР на разницу неполной и полной моделей инерционного участка регулирования с применением основного ПИ-регулятора позволяет по сравнению с типовой САР (кривая 1) уменьшить время регулирования в 1,9 раза (кривая 2).

Использование ПИД-регулятора вместо ПИ-регулятора повышает быстродействие системы по сравнению с типовой САР в 3,8 раза (кривая 3). При этом существенное улучшение качества регулирования достигается

также при отработке скачка крайнего внешнего возмущения (рис. 4): полное время регулирования типовой САР – 1851 с при степени затухания переходного процесса  $\psi = 0,95$  (кривая 1); предлагаемой САР с ПИ-регулятором – 922 с и  $\psi = 0,97$  (кривая 2); предлагаемой САР с ПИД-регулятором – 541 с и  $\psi = 1,00$  (кривая 3).

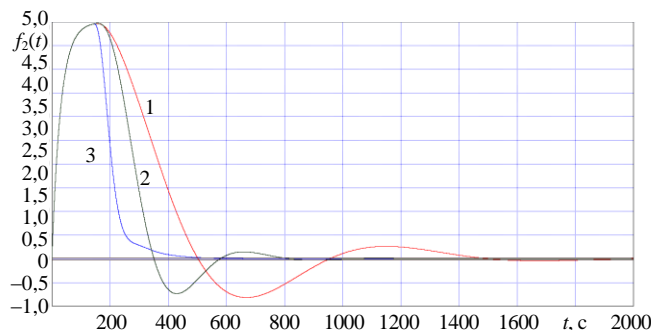


Рис. 4. Графики переходных процессов САР при отработке внешнего возмущения  $f_2$ :  
1 – типовая САР; 2 – предлагаемая САР с ПИ-регулятором;  
3 – предлагаемая САР с ПИД-регулятором

Таким образом, применение ПИД-регулятора уменьшает время отработки крайнего внешнего возмущения в 3,2 раза по сравнению с типовой САР, а минимальная интегральная ошибка регулирования уменьшается в 2,5 раза.

Отработка внутреннего возмущения  $f_1$  при настройке ПИД-регулятора по МПК в ЧВ с дифференциатором инвариантности осуществляется системой с максимальной динамической ошибкой регулирования, близкой к зоне нечувствительности регулятора.

## ВЫВОДЫ

1. Совершенствование типовой двухконтурной САР путем замены дифференциатора промежуточной регулируемой величины на разность неполной и полной моделей инерционного участка объекта регулирования с использованием основного ПИД-регулятора вместо ПИ-регулятора и дополнительного устройства компенсации внутреннего возмущения позволяет при несущественном увеличении максимальной величины регулирующего воздействия существенно улучшить качество регулирования при основных возмущениях;

повысить быстродействие системы по сравнению с ПИ-регулятором в 1,8 раза при отработке скачка задания и в 1,6 раза – при отработке внешнего возмущения; уменьшить трудоемкость процесса экспериментального определения динамики объекта регулирования, так как основной регулятор можно настроить по переходной характеристике главного участка регулирования.

2. Предложены методы структурно-параметрической оптимизации основного регулятора и устройства компенсации внутреннего возмущения, передаточная функция которого обратно пропорциональна передаточной функции основного регулятора, позволяющие значительно повысить качество регулирования при основных возмущениях.

3. Обоснована целесообразность использования ПИД-алгоритма вместо основного ПИ-регулятора типовой САР.

ЛИТЕРАТУРА

1. П л е т н е в, Г. П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учеб. для студентов вузов / Г. П. Плетнев. – 4-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 352 с.
2. С т е ф а н и, Е. П. Основы расчетов настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. – 2-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
3. Р о т а ч, В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 295 с.
4. К у з ь м и ц к и й, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» / И. Ф. Кузьмицкий, Г.Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2006. – 486 с.
5. К у л а к о в, Г. Т. Комплексная методика оптимизации параметров динамической настройки регуляторов впрысков / Г. Т. Кулаков, М. Л. Горельшева // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 2009. – № 3. – С. 59–66.
6. К у л а к о в, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: спр. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: Вышэйш. шк., 1984. – 192 с.
7. С м и т, О. Дж. Автоматическое регулирование: пер. с англ. / О. Дж. Смит; под ред. Е. П. Попова. – М.: Физматгиз, 1962. – 848 с.
8. К у л а к о в, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / Г. Т. Кулаков. – Минск: Технопринт, 2003. – 135 с.
9. Д е н и с е н к о, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009.
10. L i u, Ang K. H., Chong G. C. Y. Patents, SoftWare and HardWare for PID control. An overvieW and analysis of the current art // IEEE Control System Magazin. Feb. 2006. – P. 41–54.
11. С о в р е м е н н ы й анализ систем управления с применением MATLAB, Simulink, Control System / А. А. Краснопрошина [и др.]. – Киев: Корнійчук, 1999.