

# ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 681.51.01(075.8)

## МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАСКАДНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО УПРЕДИТЕЛЯ СМИТА\*

Док. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. КУЛАКОВ А. Т.<sup>1)</sup>, КРАВЧЕНКО В. В.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>Институт экономики НАН Беларуси

Каскадные системы автоматического регулирования (САР) получили широкое распространение в области автоматизации технологических процессов в теплоэнергетике.

Методы определения параметров динамической настройки регуляторов в двухконтурных каскадных системах регулирования, используемых для оптимизации теплоэнергетических процессов, приведены в работах [1–5]. Вместе с тем планируемый ввод в Белорусской энергетической системе двух энергоблоков АЭС, которые будут работать в базовой части графика электрических нагрузок, приведет к работе части парогазовых энергоблоков в резко переменных режимах. Это обстоятельство актуализирует разработку новых методов оптимизации каскадных систем автоматического регулирования, позволяющих существенно улучшить качество регулирования технологических параметров энергоблоков, работающих в переменных режимах по сравнению с традиционными методами с целью повышения экономичности, надежности, долговечности и безопасности работы энергетического оборудования, а также уменьшения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Одним из таких методов оптимизации каскадных САР является использование упредителя Смита [6].

Структурная схема каскадной САР на базе упредителя Смита приведена на рис. 1.

Каскадная система регулирования включает в себя внутренний (стабилизирующий регулятор – опережающий участок объекта регулирования с внутренней обратной связью) и внешний (корректирующий регулятор Смита – внутренний контур – инерционный участок объекта регулирования с главной обратной связью) контуры (рис. 1).

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

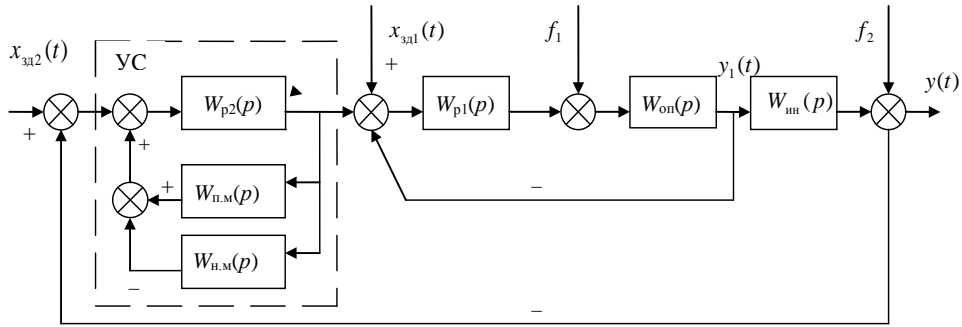


Рис. 1. Структурная схема каскадной САР на базе упредителя Смита:  $y(t)$ ,  $y_1(t)$  – соответственно основная и промежуточная регулируемые величины;  $x_{зд2}$ ,  $x_{зд1}$  – задающие воздействия для основной  $y(t)$  и промежуточной  $y_1(t)$  регулируемых величин;  $f_1$ ,  $f_2$  – соответственно внутреннее и внешнее возмущения; передаточные функции опережающего  $W_{оп}(p)$  и инерционного  $W_{ин}(p)$  участков объекта регулирования, стабилизирующего  $W_{р1}(p)$  и корректирующего  $W_{р2}(p)$  регуляторов, полной  $W_{п.м}(p)$  и неполной  $W_{н.м}(p)$  моделей инерционного участка объекта регулирования с запаздыванием; УС – упредитель Смита

Передаточная функция опережающего участка объекта регулирования обычно представлена в виде инерционного звена второго порядка [3–5]

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

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

Так как численное значение постоянной времени  $T_{оп}$  обычно много больше, чем –  $\sigma_{оп}$ , передаточную функцию (1) представим в виде инерционного звена первого порядка

$$W_{оп}^*(p) = \frac{k_{оп}}{T_{оп}^*p + 1}, \quad (2)$$

где

$$T_{оп}^* = T_{оп} + \sigma_{оп}, \quad (3)$$

а желаемую заданную передаточную функцию замкнутой САР внутреннего контура при обработке задающего сигнала  $x_{зд1}$  соответственно

$$W_{зд1}(p) = \frac{1}{T_{зд1}p + 1}, \quad (4)$$

где  $T_{зд1}$  – заданное время разгона экстремали оптимального переходного процесса внутреннего контура системы.

С учетом передаточных функций (2), (4) оптимальная передаточная функция стабилизирующего регулятора примет следующий вид:

$$W_{р1}(p) = \frac{1}{W_{оп}^*(p)} \frac{W_{зд1}(p)}{1 - W_{зд1}(p)} = \frac{T_{оп}^*p + 1}{k_{оп}T_{зд1}p} = \frac{k_p(T_{и}p + 1)}{T_{и}p}. \quad (5)$$

Здесь  $k_p$  – коэффициент передачи;  $T_{\text{и}}$  – время интегрирования пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора, численные значения которых определяют по следующим формулам:

$$T_{\text{и}} = T_{\text{оп}}^*; \quad (6)$$

$$k_p = \frac{T_{\text{оп}}^*}{k_{\text{оп}} T_{\text{зд1}}}. \quad (7)$$

Обозначив заданное время разгона  $T_{\text{зд1}} = \alpha T_{\text{оп}}^*$ , получим

$$k_p = \frac{1}{k_{\text{оп}} \alpha}, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий долю  $T_{\text{оп}}^*$  в заданном значении  $T_{\text{зд1}}$ , который целесообразно выбирать в соответствии с правилом золотого сечения из следующего ряда [7] с учетом максимальной величины регулирующего воздействия:

$$\alpha \in [1; 0,618; 0,56; 0,44; 0,382; 0,236; 0,146]. \quad (9)$$

Передаточная функция инерционного участка объекта регулирования с достаточной степенью точности может быть представлена инерционным звеном второго порядка с запаздыванием [3, 4]

$$W_{\text{ин}}(p) = \frac{k_{\text{ин}}}{(T_{\text{ин}} p + 1)(\sigma_{\text{ин}} p + 1)} e^{-\tau_y p}, \quad (10)$$

где  $k_{\text{ин}}$  – коэффициент передачи;  $T_{\text{ин}}$ ,  $\sigma_{\text{ин}}$  – большая и меньшая постоянные времени инерционного участка объекта регулирования;  $\tau_y$  – условное запаздывание по каналу регулирующего воздействия.

С учетом (4), (10) передаточная функция полной модели в упредителе Смита примет следующий вид:

$$W_{\text{п.м}}(p) = W_{\text{зд1}}(p) W_{\text{ин}}(p) = \frac{k_{\text{ин}} e^{-\tau_y p}}{(T_{\text{зд1}} p + 1)(T_{\text{ин}} p + 1)(\sigma_{\text{ин}} p + 1)}, \quad (11)$$

а неполной модели соответственно:

$$W_{\text{н.м}}(p) = \frac{k_{\text{ин}}}{(T_{\text{зд1}} p + 1)(T_{\text{ин}} p + 1)(\sigma_{\text{ин}} p + 1)}. \quad (12)$$

Однако так как численные значения постоянных времени  $\sigma_{\text{ин}}$  и  $T_{\text{зд1}}$  меньше  $T_{\text{ин}}$ , передаточную функцию (12) можно представить в упрощенном виде

$$W_{\text{н.м}}(p) = \frac{k_{\text{ин}}}{(T_{\text{ин}} p + 1)(T_1 p + 1)}, \quad (13)$$

где численное значение постоянной времени

$$T_1 = T_{\text{зд1}} + \sigma_{\text{ин}}. \quad (14)$$

В связи с этим заданную передаточную функцию системы регулирования по задающему воздействию целесообразно представить в виде инерционного звена второго порядка с одинаковыми постоянными времени  $T_{зд2}$  с учетом звена условного запаздывания

$$W_{зд2}(p) = \frac{e^{-\tau_y p}}{(T_{зд2} p + 1)^2}, \quad (15)$$

так как при этом переходный процесс в системе будет аperiodическим с максимальной скоростью изменения регулируемого параметра.

В результате после несложных преобразований с учетом передаточных функций (13), (15) оптимальная передаточная функция корректирующего регулятора упредителя Смита примет вид реального ПИД-регулятора

$$W_{p2}(p) = \frac{1}{W_{н.м}(p)} \times \frac{W_{зд2}(p)}{1 - W_{зд2}(p)} = \frac{(T_{ин} p + 1)(T_1 p + 1)}{k_{ин}} \times \\ \times \frac{1}{2T_{зд2} p \left( \frac{T_{зд2}}{2} p + 1 \right)} = \frac{k_p (T_i p + 1)(T_d p + 1)}{T_i p (T_2 p + 1)}, \quad (16)$$

где

$$T_i = T_{ин}; \quad T_d = T_1; \quad T_2 = \frac{T_{зд2}}{2}; \quad (17)$$

$$k_p = \frac{T_{ин}}{2k_{ин} T_{зд2}}. \quad (18)$$

В этом случае за целое в правиле золотого сечения целесообразно принять численное значение условного запаздывания  $\tau_y$ , коэффициент передачи (18) регулятора представить в виде

$$k_p = \frac{T_{ин}}{k_{ин} \tau_y \gamma}, \quad (19)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий долю  $\tau_y$  в заданном значении  $T_{зд2}$ , численную величину которого целесообразно выбирать из следующего ряда чисел золотого сечения [7]:

$$\gamma \in [1; 0,618; 0,56; 0,44; 0,382; 0,236; 0,146] \quad (20)$$

На рис. 1 приведена структурная схема моделирования каскадной САР с упредителем Смита на основе программы Simulink, опережающий участок объекта регулирования которой представлен передаточной функцией

$$W_{оп}^*(p) = \frac{k_{оп}}{T_{оп}^* p + 1} = \frac{12,6}{33,1 p + 1}, \quad (21)$$

инерционный соответственно

$$W_{ин}(p) = \frac{k_{ин} e^{-\tau_y p}}{(T_{ин} p + 1)(\sigma_{ин} p + 1)} = \frac{2,61 e^{-165 p}}{(160 p + 1)(63 + 1)}. \quad (22)$$

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения, приложенного к выходу объекта регулирования, имеет следующий вид:

$$W_b(p) = \frac{k_b}{T_b p + 1} = \frac{5}{30p + 1}, \quad (23)$$

где  $k_b$  – коэффициент передачи;  $T_b$  – постоянная времени крайнего внешнего возмущения.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов предлагаемой и типовой каскадной САР при обработке задающего сигнала. При этом типовая каскадная САР с корректирующим и стабилизирующим ПИ-регуляторами была оптимизирована по методике, приведенной в [3, 4]: стабилизирующий регулятор – по методу частичной компенсации, корректирующий – по методу полной компенсации в частном виде.

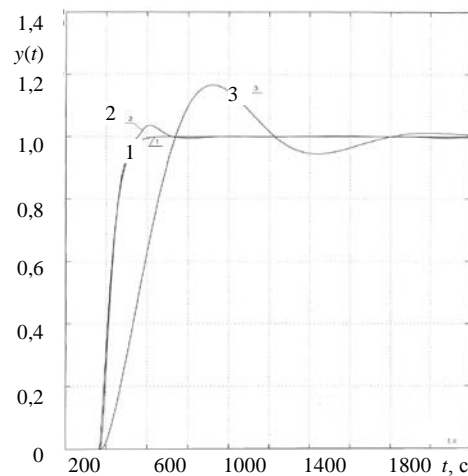


Рис. 2. График переходных процессов каскадной САР при обработке задающего сигнала: 1 – заданный эталонный переходный процесс, соответствующий передаточной функции (15) при  $\gamma = 0,382$ ,  $T_{зд2} = 31,5$  с; 2 – переходный процесс в предлагаемой каскадной САР с упредителем Смита; 3 – переходный процесс в типовой каскадной САР со стабилизирующим и корректирующим ПИ-регуляторами [5]

При моделировании переходных процессов в системе заданное значение критериев оптимальности внутреннего контура (4) принято равным  $T_{зд1} = 7$  с.

Из анализа графиков (рис. 2) следует, что график отработки скачка задания в предлагаемой САР (кривая 2) мало отличается от эталонной кривой 1. Типовая каскадная САР обрабатывает скачок задания с перерегулированием в 17 % и большой инерционностью (кривая 3). При этом полное время регулирования отработки задания типовой САР увеличивается в четыре раза.

На рис. 3 приведены графики переходных процессов сравниваемых САР при отработке крайнего внешнего возмущения. Полное время отработки крайнего внешнего возмущения предлагаемой САР не превышает величины двух запаздываний по каналу регулирующего воздействия (кривая 1, рис. 3), которые в три раза меньше, чем в типовой каскадной САР (кривая 2, рис. 3). При этом степень затухания переходного процесса типовой САР составляет 0,95, а предлагаемой – 0,99.

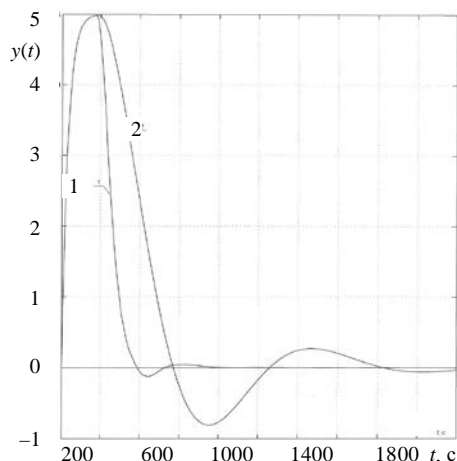


Рис. 3. Графики переходных процессов каскадной САР при обработке крайнего внешнего возмущения: 1 – в предлагаемой САР; 2 – в типовой САР

### ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований на базе модифицированного линейного упреждителя Смита предложена методика структурно-параметрической оптимизации каскадных САР технологических параметров теплоэнергетических процессов.

2. В качестве критериев оптимальности при расчете параметров динамической настройки стабилизирующего и корректирующего регуляторов каскадной САР предложено использовать заданные эталонные модели для внутреннего и внешнего контуров регулирования. При этом численные значения постоянных времени критериев оптимальности контуров следует выбирать на основе правила золотого сечения с учетом ограничений максимальной величины регулирующего воздействия.

3. Результаты численного моделирования переходных процессов в системах показали, что предлагаемая каскадная САР позволяет существенно улучшить качество регулирования по сравнению с типовой САР.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ротач, В. Я. Расчет настройки промышленных систем регулирования / В. Я. Ротач. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 344 с.
2. Стефани, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
3. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г. Т. Кулаков. – Минск: Вышэйш. шк., 1984. – 192 с.
4. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 136 с.
5. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010. – 574 с.
6. Смит, О. Дж. Автоматическое регулирование: пер. с англ. / О. Дж. Смит; под ред. Е. П. Попова. – М.: Физматгиз, 1962. – 848 с.
7. Сороко, Э. М. Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем: введение в общую теорию гармонизации систем / Э. М. Сороко. – М.: КомКнига, 2006. – 264 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 30.12.2011