

УДК 621.1.: 681.51.01

Оптимизация системы автоматического регулирования температуры перегретого пара

Кель А.

Научный руководитель – д.т.н, профессор КУЛАКОВ Г.Т.

К регулированию температуры перегретого пара предъявляют высокие требования:

– поддержание заданного значения температуры перегретого пара на выходе из котла при номинальной нагрузке с максимальным отклонением менее 1% номинального значения температуры;

– протекание переходных процессов при 10% скачкообразном изменении нагрузки с максимальным отклонением температуры перегретого пара на выходе из котла 10°C и значениями интегрального квадратичного критерия качества соответственно 5000 и 10000 $(^{\circ}\text{C})^2 \text{ с}$. При этом снижение температуры пара на 10°C эквивалентно перерасходу топлива на 0,2%, а в термодинамическом цикле давлением 10,0 Мпа и температурой 540°C повышает влажность пара на выходе из последней ступени турбины на 0,7%; повышение температуры пара на 10°C снижает долговечность (срок службы) пароперегревателя из стали марки 12Х1МФ на 30%.

Широкое распространение в странах СНГ получили системы автоматического регулирования (САР) температуры перегретого пара с дифференцированием сигнала по температуре пара за местом впрыска, хотя в зарубежной практике нашли применение САР температуры перегретого пара с корректирующим и стабилизирующим регуляторами (каскадные САР). В динамическом отношении каскадные системы (КСАР) подобны САР с исчезающим импульсом из промежуточной точки, хотя в некоторых случаях КСАР могут иметь значительные преимущества. В связи с этим оптимизация САР температуры перегретого пара проведем на примере КСАР.

Качество регулирования во многом определяется принятым методом расчета параметров оптимальной динамической настройки системы. Широкое распространение в области автоматизации теплоэнергетических процессов получили методы расчета параметров динамической настройки двухконтурных САР [1÷6].

Структурная схема типовой КСАР приведена на рисунке 1.

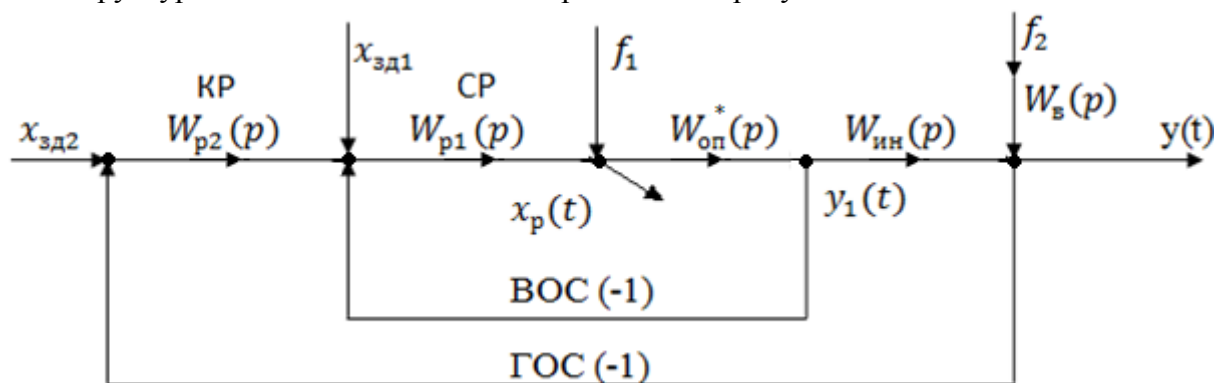


Рисунок 1 – Структурная схема типовой КСАР:

$y(t)$ - основная регулируемая величина (выход системы регулирования или выходная переменная);

$y_1(t)$ - промежуточная регулируемая величина;

$x_{зд1}, x_{зд2}$ - заданные значения регулируемых параметров $y_1(t)$ и $y(t)$;

x_k – корректирующее значение задания стабилизирующему регулятору;

$f_1(t)$ - внутреннее возмущение;

$f_2(t)$ - крайнее внешнее возмущение;

$x_p(t)$ - регулирующее воздействие.

Передаточные функции элементов структурной схемы ТКСаР следующие:

1. Стабилизирующий регулятор (СР):

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{u1}p + 1)}{T_{u1}p} = \frac{0,204(16,22p + 1)}{16,22p}, \quad (1)$$

где K_{p1} – коэффициент передачи СР, $^0C/т/ч$;

T_{u1} – время регулирования СР.

2. Корректирующий регулятор (КР):

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p} = \frac{0,944(111p + 1)}{111p}, \quad (2)$$

где K_{p2} – коэффициент передачи КР, $^0C/т/ч$;

T_{u2} – время регулирования КР.

3. Опережающий участок (ОУ) объекта регулирования:

$$W_{on}^*(p) = \frac{K_{on}}{(T_{on}^*p + 1)} = \frac{15,1}{(15,2p + 1)}, \quad (3)$$

где K_{on} – коэффициент передачи ОУ, $^0C/т/ч$;

T_{on}^* – сумма постоянных времени T_{on} и σ_{on} передаточной функции ОУ.

4. Инерционный участок (ИУ) объекта регулирования:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин}e^{-\tau_y p}}{(T_{ин}p + 1)(\sigma_{ин}p + 1)} = \frac{1,47e^{-40p}}{(101p + 1)(10p + 1)}, \quad (4)$$

где $K_{ин}$ – коэффициент передачи ИУ;

$T_{ин}$ и $\sigma_{ин}$ – большая и меньшая постоянные времени передаточной функции ОУ.

5. Крайнее внешнее возмущение (КВВ):

$$W_{\epsilon}(p) = \frac{K_{\epsilon}}{T_{\epsilon}p + 1} = \frac{5}{20p + 1}, \quad (5)$$

где K_{ϵ} – коэффициент передачи КВВ, $^0C/т/ч$;

T_{ϵ} – постоянная времени передаточной функции КВВ.

Расчет параметров оптимальной динамической настройки КСаР приведем по методике, приведенной в [4]. При этом СР настроим по методу частичной компенсации (МЧК) на оптимальную обработку внутренних возмущений по численным значениям передаточной функции (3) ОУ. Динамическая настройка КР рассчитана по методу полной компенсации в частном виде (МПК в ЧВ) по передаточной функции ИУ объекта на оптимальную обработку крайнего внешнего возмущения, которое заменяем обработкой скачка задания по основной регулируемой величине.

Схема моделирования переходных процессов типовой КСаР при основных воздействиях приведена на рисунке 2.

*

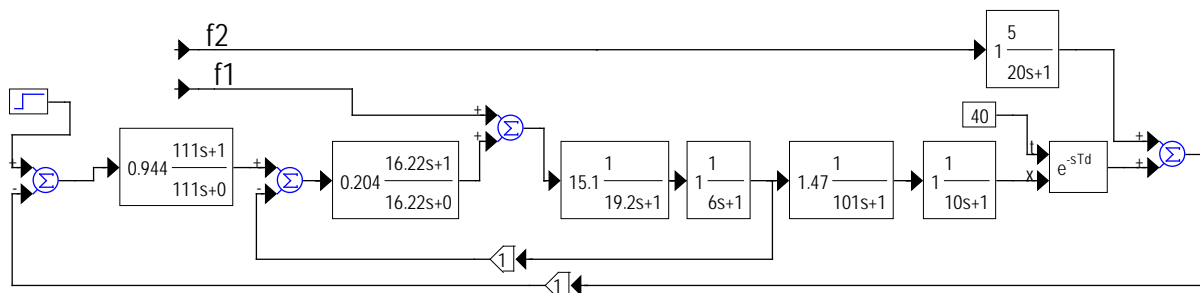


Рисунок 2 – Структурная схема моделирования типовой КСАР

Графики оптимальных переходных процессов типовой КСАР при основных воздействиях приведены на рисунке 3.

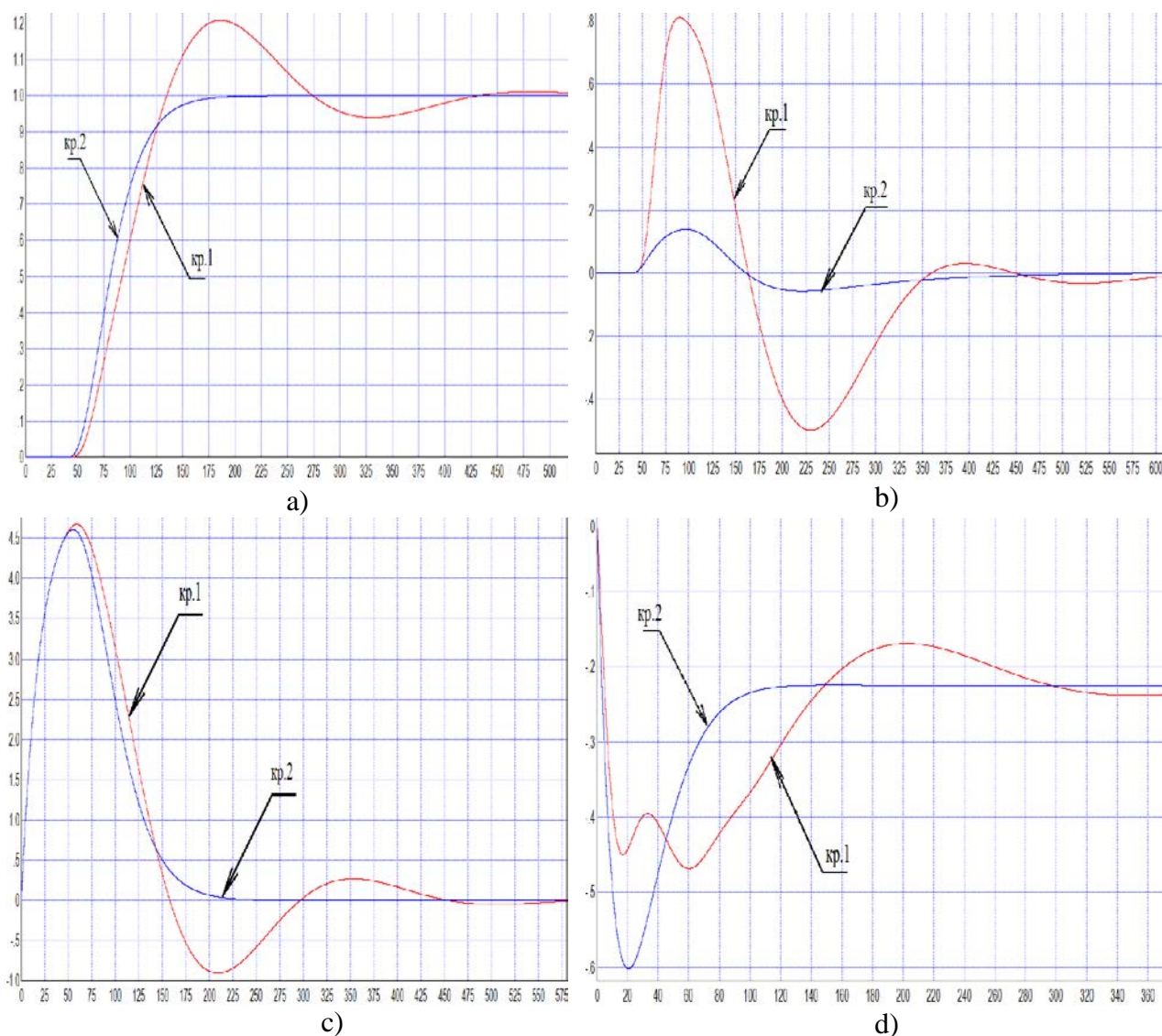


Рисунок 3 – Графики переходных процессов КСАР и предлагаемой САР при основных воздействиях:

- а) при обработке задающего воздействия ($x_{зд}$); б) при обработке внутреннего возмущения (f_1);
- в) при обработке крайнего внешнего возмущения (f_2); д) изменение регулирующего

воздействия (x_p) при обработке f_2 .

кр.1– типовая каскадная САР; кр.2– предлагаемая САР.

Предлагаемая структурная схема КСАР температуры перегретого пара за котлом приведена на рисунке 4.

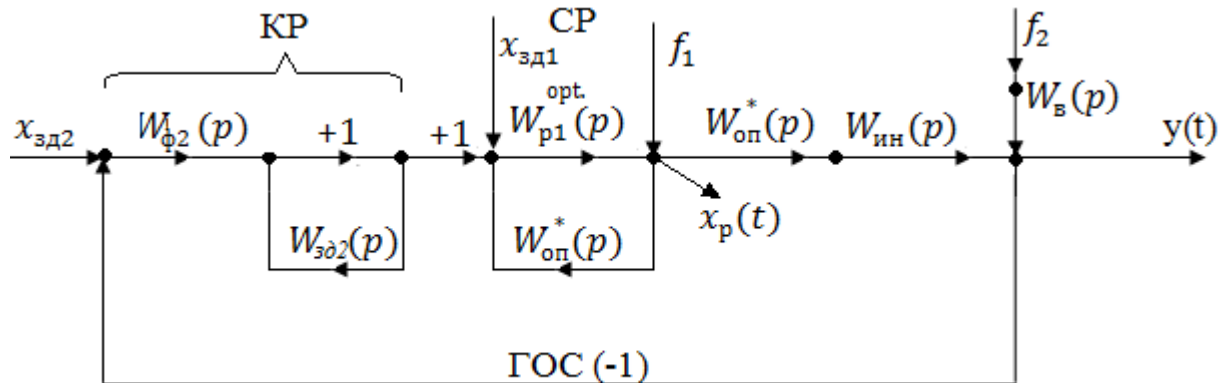


Рисунок 4 – Структурная схема предлагаемой КСАР температуры перегретого пара за котлом:

$W_{\phi 2}(p)$ – передаточная функция фильтра КР;

$W_{зд2}(p)$ – заданная передаточная функция критерия оптимальной обработки скачка задания $x_{зд2}$; остальные обозначения приведены на рисунке 1.

Выбор структуры СР производим по передаточной функции ОУ на основе передаточной функции оптимального регулятора [6]:

$$W_{p1}^{opt}(p) = W_{\phi 1}(p) * \frac{1}{1 - W_{зд}^{3C}(p)}, \tag{6}$$

где $W_{зд}(p)$ – заданная передаточная функция системы

Критерий оптимальности СР при обработке скачка задания:

$$W_{зд}^{3C}(p) = \frac{1}{T_{зд1}p + 1}; \tag{7}$$

$$W_{\phi 1}(p) = \frac{W_{зд}^{3C}(p)}{W_{оп}^*(p)} = \frac{(T_{оп}^* + 1)}{K_{он} (T_{зд1} + 1)}, \tag{8}$$

где $T_{оп}^* = T_{он} + \sigma_{он}$, \tag{9}

$T_{зд1}$ – постоянная времени критерия оптимальности как единственный параметр оптимальной динамической настройки СР, которую определяют по формуле:

$$T_{зд1} = \frac{T_{оп}^*}{K_{он} * X_p^M}, \tag{10}$$

где x_p^M – максимальная допустимая величина регулирующего воздействия.

Подставляя формулы (7) и (8) в (6) получаем передаточную функцию СР:

$$W_{p1}^{opt}(p) = \frac{T_{он}^* p + 1}{K_{он} (T_{зд1} p + 1)} * \frac{1}{1 - \frac{1}{T_{зд1} p + 1}} = \frac{T_{он}^* p + 1}{K_{он} T_{зд1} p} \tag{11}$$

Передаточная функция КР равна [12]:

$$W_{p2}(p) = [W_{\text{экв}}(p)]^{-1} * \frac{1}{1 - W_{\text{зд2}}^{\text{ЗС}}(p)} \quad (12)$$

Здесь $W_{\text{экв}}(p)$ – передаточная функция эквивалентного объекта регулирования, учитывающая динамику внутреннего контура:

$$W_{\text{экв}}(p) = W_{\text{зд1}}(p) \cdot W_{\text{ин}}(p) = \frac{K_{\text{ин}} e^{-\tau_y p}}{(T_{\text{ин}} p + 1) \cdot (\sigma_{\text{ин}} p + 1) \cdot (T_{\text{зд2}} p + 1)}; \quad (13)$$

где $W_{\text{зд2}}(p)$ – заданная передаточная функция внешнего контура системы с учетом передаточной функции (13) [6]:

$$W_{\text{зд2}}(p) = \frac{1 \cdot e^{-\tau_y p}}{(T_{\text{зд2}} p + 1)^3}, \quad (14)$$

где $T_{\text{зд2}}$ – параметр динамической настройки КР, равный:

$$T_{\text{зд2}} = \gamma \cdot \tau_y,$$

а весовой коэффициент γ выбираем из ряда чисел правила золотого сечения [6], например при $\gamma = 0,382$ параметр динамической настройки КР будет равен:

$$T_{\text{зд2}} = 0,382 \cdot \tau_y = 15,28 \text{ с} \quad (15)$$

Графики переходных процессов предлагаемой КСАР приведены на рисунке 3 (кривая 2), где представлены также переходные процессы типовой КСАР. Прямые показатели качества (ППК) переходных процессов систем сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – ПК переходных процессов сравниваемых САР

Наименование САР	Хзд2			f1		f2		
	t_p , с	σ_m , %	ψ	t_p , с	A_1^+	t_p , с	A_1^+	x_p^M
ТКСАР	502	21	0,9	580	0,8	550	4,8	-0,43
Оптимальная САР	168	-	-	360	0,16	209	4,6	-0,6

Здесь приняты следующие обозначения:

t_p – время регулирования;

σ_m – максимальная величина перерегулирования при обработке задания;

ψ – степень затухания переходного процесса ;

A_1^+ – максимальная динамическая ошибка регулирования.

Из анализа данных таблицы 1 можно сделать следующие выводы:

1. При обработке скачка задания время регулирования предлагаемой САР уменьшается в 3 раза по сравнению с типовой. При этом величина перерегулирования исчезает.
2. При обработке внутреннего возмущения максимальная динамическая ошибка регулирования уменьшилась в 2 раза, время регулирования сократилось на 61,1%.
3. При обработке крайнего внешнего возмущения время регулирования сократилось в 2,63 раза. При этом максимальная динамическая ошибка регулирования в предлагаемой САР уменьшилась на 1,5%. Причем максимальное изменение регулирующего воздействия увеличилось всего на 30%.

Таким образом предлагаемая САР существенно повышает качество регулирования температуры перегретого пара за котлом.

Литература

1. Стефани, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. – М., 1972.
2. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Роточ. – М., 2008.
3. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования / Г. Т. Кулаков. Минск, 1984.
4. Кулаков, Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования / / Г. Т. Кулаков. Минск, 2003.
5. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск, 2010.
6. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: Высшэйшая школа, 2017. – 238 с.