

УДК 621.18-5

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА ПИТАНИЯ БАРАБАННОГО КОТЛА

Устинович В.В.

Научный руководитель – к.э.н., доцент Кравченко В.В.

От качественного поддержания уровня воды в барабане парового котла во многом зависит надежность работы котельного агрегата, так как упуск уровня воды в барабане приводит к разрыву экранных труб и останову котла. А перепитка приводит к появлению гидравлического и теплового удара, то есть также приводит к останову котла или энергоблока.

Уровень воды в барабане котла обычно поддерживается типовой трехимпульсной системой автоматического регулирования (САР) [1]:

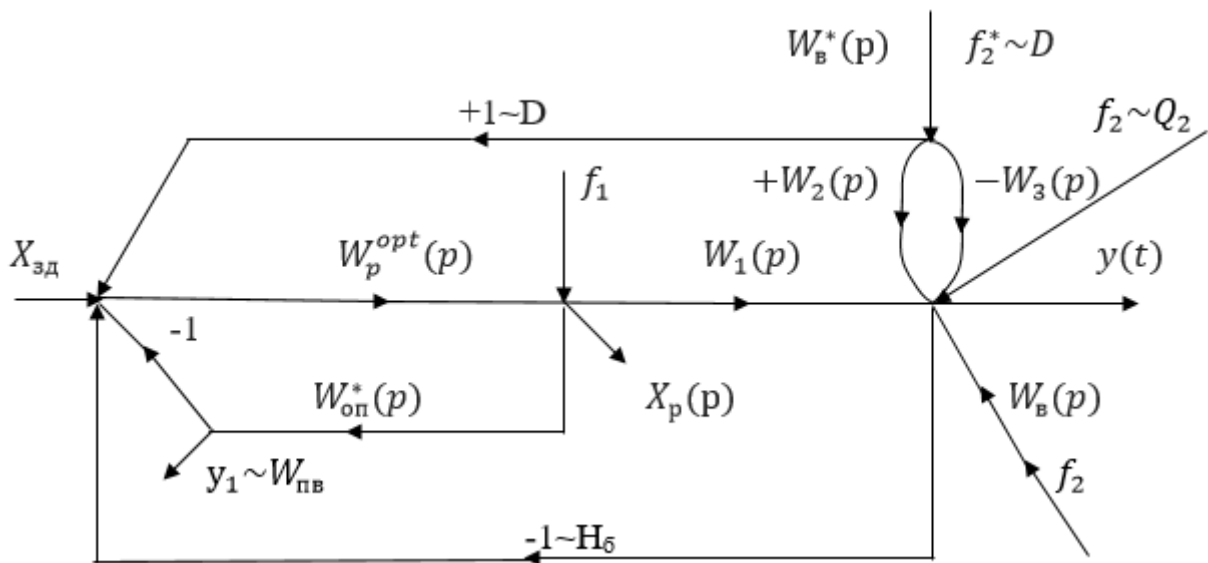


Рисунок 1. Структурная схема типовой трехимпульсной САР

На рисунке обозначено:  $x_{зд}$  – заданное значение основной регулируемой величины;

$y_1(t), y(t)$  – промежуточная и основная регулируемые величины;

$f_1(t)$  – внутреннее возмущение;

$f_2(t), f_2^*(t)$  – крайнее внешнее топочное возмущение и возмущение расходом пара (явление «набухания уровня»);

$x_p(p)$  – регулирующее воздействие.

### Расчет настройки типовой трехимпульсной САР

ПИ-регулятор настраивается по динамике внутреннего быстродействующего контура, которая в основном зависит от инерционности датчика расхода питательной воды и выражается с помощью инерционного звена I порядка с временем разгона  $T_{оп}^*$ .

$$T_i = T_{оп}^*, \text{ с} \quad (1)$$

$$K_p = \gamma T_{оп}^*, \quad (2)$$

где  $T_i$  – время интегрирования ПИ-регулятора;

$K_p$  – коэффициент передачи.

Численное значение  $\gamma$  выбираем по правилу «Золотого сечения»: 0,618; 0,382; 0,09.

Передаточная функция оптимального регулятора [2]:

$$W_p^{opt}(p) = \frac{T_{оп}p+1}{T_{зд}p}. \quad (3)$$

Передаточная функция опережающего участка:

$$W_{оп}^*(p) = \frac{1}{10p+1}. \quad (4)$$

Динамика объекта регулирования задана в виде передаточной функции реального интегрирующего звена:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1p(\tau_1p+1)}. \quad (5)$$

Передаточная функция внешнего возмущения  $f_2^*(t)$  расходом пара с явлением «набухания уровня» воды в барабане котлоагрегата:

$$W_B^*(p) = W_2(p) - W_3(p). \quad (6)$$

Передаточная функция инерционного звена первого порядка:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2p+1}. \quad (7)$$

Передаточная функция идеального интегрирующего звена:

$$W_3(p) = \frac{1}{T_3(p)}. \quad (8)$$

Передаточная функция топочного возмущения в виде инерционного звена первого порядка:

$$W_B(p) = \frac{k_B}{T_Bp+1}. \quad (9)$$

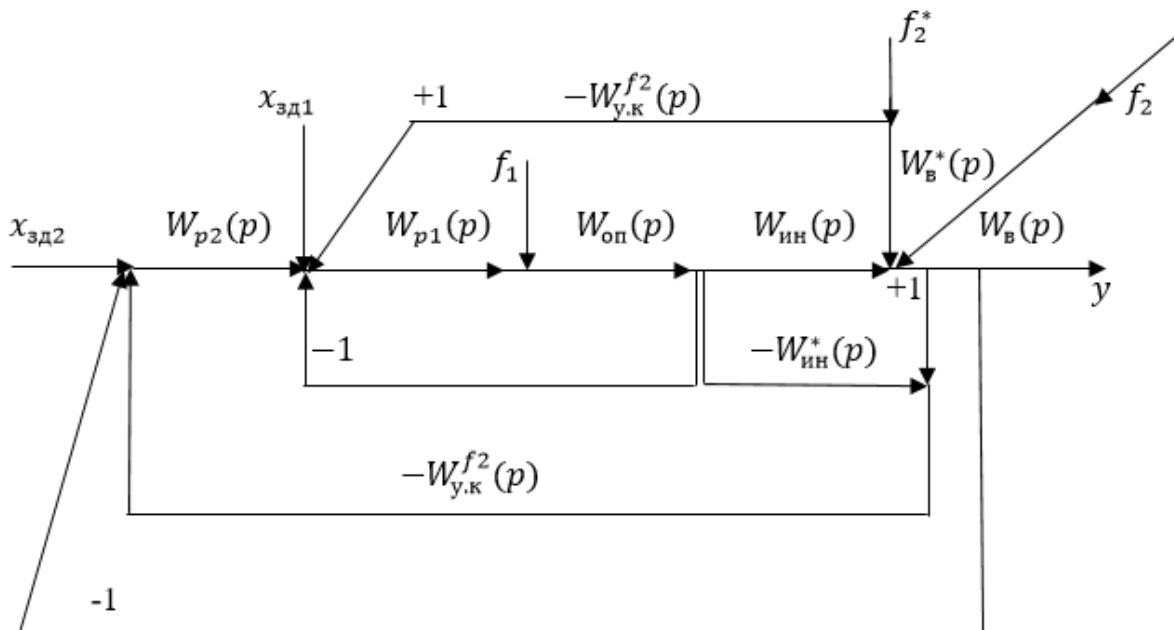


Рисунок 2. Структурная схема предлагаемой САР

Здесь:  $x_{зд1}, x_{зд2}$  – заданные значения промежуточной и основной регулируемых величин соответственно;

$y(t)$  – основная регулируемая величина;

$f_1(t)$  – внутреннее возмущение;

$f_2(t), f_2^*(t)$  – крайнее внешнее топочное возмущение и возмущение расходом пара (явление «набухания уровня»).

**Основные недостатки типовой трехимпульсной САР:**

- при обработке внешнего возмущения расходом пара  $f_2^*(t)$  в конце переходного процесса появляется статическая ошибка регулирования;
- большие изменения нагрузки приводят к сильным отклонениям уровня воды в барабане парогенератора, что иногда вызывает срабатывание защиты и отключение котла по причине упуска или перепитки.

Во избежание данных недостатков рекомендуется использовать инвариантную САР (ИСАР) с выделением эквивалентного внешнего возмущения без измерения  $f_2$  на базе каскадной САР (КСАР) [2]:

**Расчёт настройки инвариантной САР с выделением эквивалентного внешнего возмущения без измерения  $f_2$  на базе КСАР [2]:**

Стабилизирующий регулятор:

$$W_{p1}(p) = [W_{оп}^*(p)]^{-1} \cdot \frac{W_{зд}(p)}{1 - W_{зд}(p)} = \frac{T_{оп}^* p + 1}{T_{зд1} p + 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{T_{зд1} p + 1}} = \frac{T_{оп}^* p + 1}{T_{зд1} p} = \frac{10p + 1}{T_{зд1} p}; \quad (10)$$

$$W_{зд1}(p) = \frac{1}{T_{зд1} p + 1}; \quad (11)$$

$$T_{зд1} = \gamma \cdot T_{оп}^* = 0,618 \cdot 10 = 6,18 \text{ с}. \quad (12)$$

Так же возьмем  $T_{зд1} = \frac{T_1^2}{27\tau_1}$ , которое вывели из диаграммы Вышнеградского при условии  $A_1 = A_2 = 3$ .

Получаем

$$T_{зд1} = \frac{T_1^2}{27\tau_1} = \frac{34^2}{27 \cdot 18} = 2,38 \text{ с}. \quad (13)$$

Передаточная функция эквивалентного объекта регулирования:

$$W_{экр}(p) = W_{зд1}(p) \cdot W_1(p) = \frac{1}{T_{зд1} p + 1} \cdot \frac{1}{T_1 p (\tau_1 p + 1)}. \quad (14)$$

Корректирующий регулятор:

$$W_{p2}^{opt}(p) = [W_{экр}(p)]^{-1} \cdot W_{зд2}^{PC(n=3)}(p) = \frac{(T_{зд1} p + 1) T_1 p (\tau_1 p + 1)}{3 T_{зд2} p \left( \frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)}, \quad (15)$$

$$\text{где } W_{зд2}^{PC(n=3)}(p) = \frac{1}{3 T_{зд2} p \left( \frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)}. \quad (16)$$

$$W_{p2}^{opt}(p) = \frac{T_1 p (\tau_1 p + 1) (T_{зд1} p + 1)}{3 T_{зд2} p \left( \frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)} = \frac{34(18p + 1)(T_{зд1} p + 1)}{3 T_{зд2} p \left( \frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)}. \quad (17)$$

Условие инвариантности  $y(t)$  по отношению к эквивалентному внешнему возмущению:

$$W_{ук}(p) \cdot W_{зд2}(p) = 1 - W_{зд2}(p); \quad (18)$$

$$W_{ук}(p) = \frac{1 - W_{зд2}(p)}{W_{зд2}(p)} = \frac{1}{W_{зд2}^{PC(n=3)}(p)}; \quad (19)$$

$$W_{ук}(p) = \frac{3 T_{зд2} p \left( \frac{T_{зд2}^2}{3} p^2 + T_{зд2} p + 1 \right)}{(T_{зд2} p + 1)^3}, \quad (20)$$

где

$$T_{зд2} = \gamma\tau_1. \quad (21)$$

Прибегнув к некоторым сокращениям получаем реальный дифференциатор:

$$W_{ук}(p) = \frac{3T_{зд2}p}{T_{зд2}p+1}. \quad (22)$$

Графики переходных процессов САР при отработке основных воздействий:

- █ - типовая трехимпульсная САР (типовая САР);
- █ инвариантная САР с выделением эквивалентного внешнего возмущения без измерения  $f_2$  на базе КСАР (предлагаемая САР).

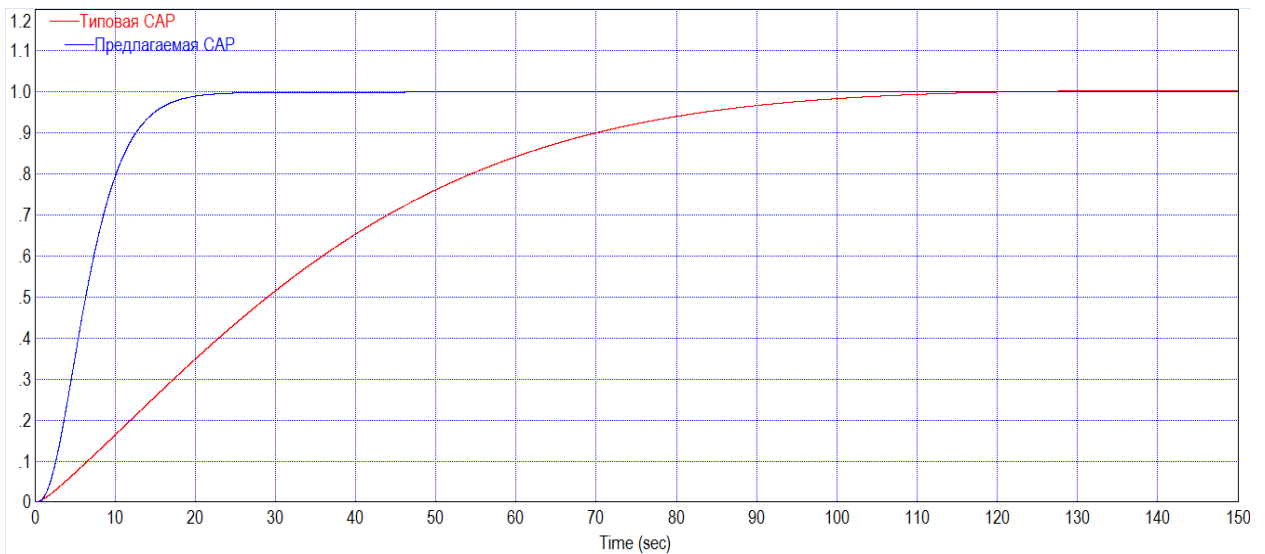


Рисунок 3. Отработка скачка задания  $x_{зд}$

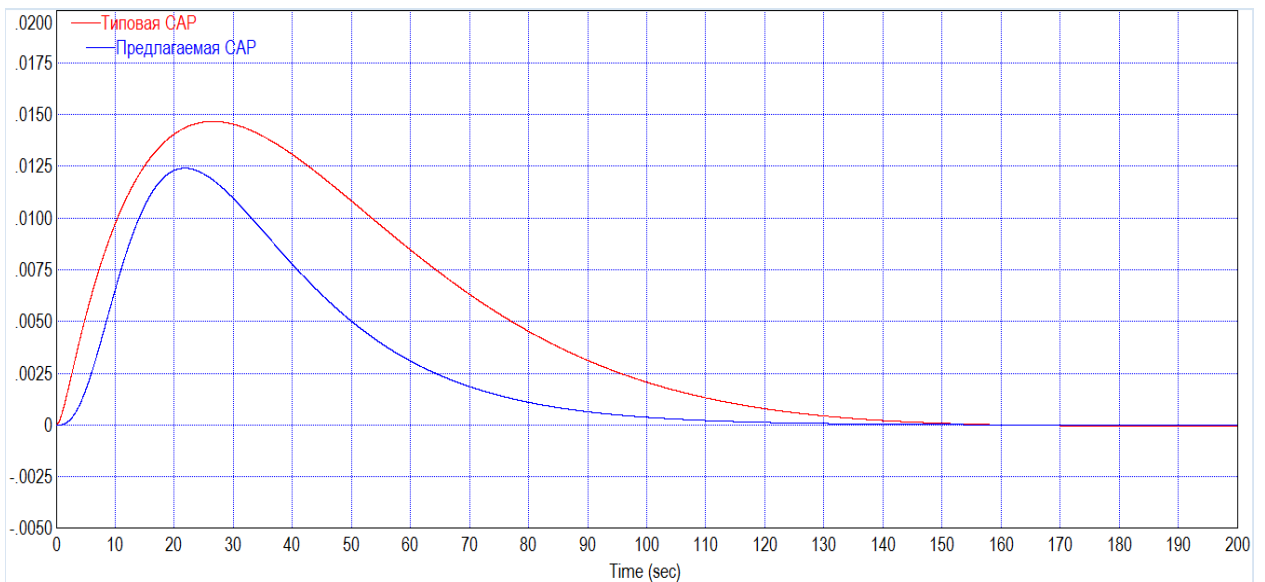


Рисунок 4. Отработка внутреннего возмущения  $f_1$

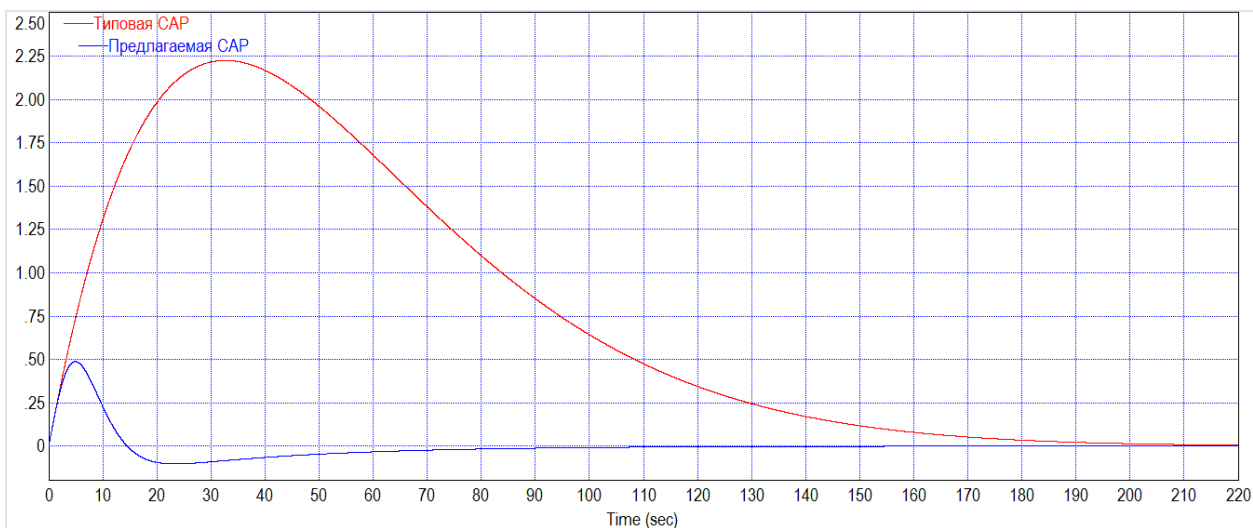


Рисунок 5. Отработка крайнего внешнего топочного возмущения  $f_2$

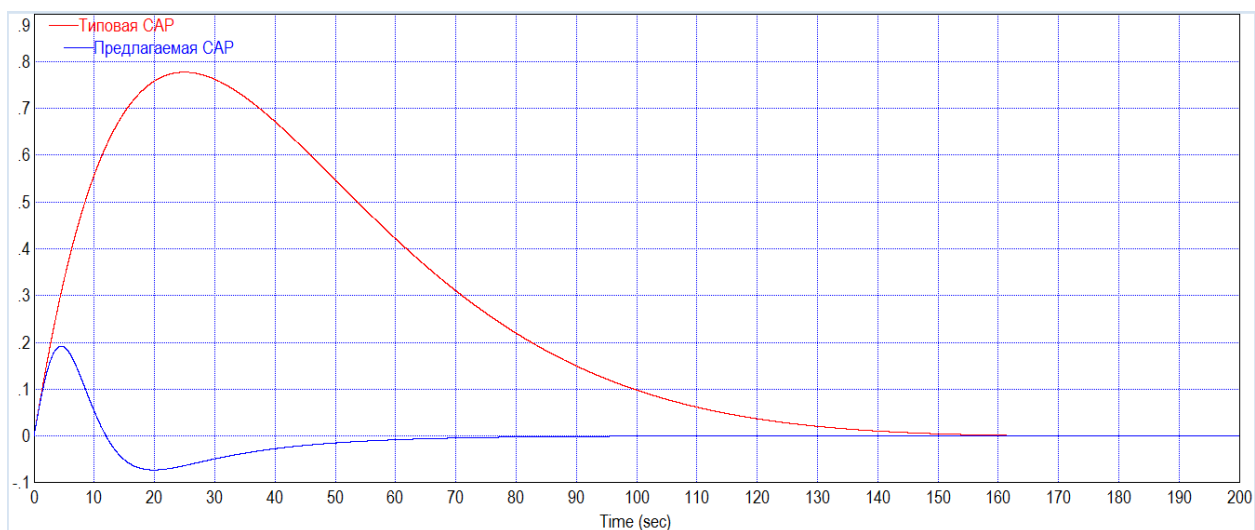


Рисунок 6. Отработка крайнего внешнего возмущения  $f_2$ \*расходом пара

Таблица 1

Прямые показатели качества типовой и предлагаемой САР

Наименования САР	$x_{зд}$			$f_1$		$f_2$		$f_2^*$	
	tp, с	$\sigma$ , %	$\psi$	tp, с	$A_1^+$ , %	tp, с	$A_1^+$ , %	tp, с	$A_1^+$
Типовая САР	188	0,4	1	150	0,015	192	2,22	130	0,777
Предлагаемая САР	18	0	1	120	0,012	75	0,487	45	0,192

В таблице 1, полученной из анализа графиков переходных процессов, видно, что предлагаемая САР в 10.4 раз повысила быстродействие при отработке скачка задания  $x_{зд}$ , а величина перерегулирования и вовсе уменьшилась с 0.4 % у типовой до 0 % у ИСАР на базе КСАР (рисунок 3).

Внутреннее возмущение  $f_1$  в 1.25 раз быстрее обрабатывается предлагаемой САР, а максимальная динамическая ошибка регулирования у неё меньше на 8 % (рисунок 4).

Время отработки внешнего топочного возмущения  $f_2$  уменьшилось в 2.6 раз, а максимальная динамическая ошибка регулирования – на 22 % по сравнению с типовой (рисунок 5).

Хорошие показатели ИСАР на базе КСАР продемонстрировала и при отработке внешнего возмущения расходом пара  $f_2^*$  с явлением «набухания уровня» – время регулирования уменьшилось в 2.9 раз, а максимальная динамическая ошибка регулирования на 25 % меньше, чем у типовой трехимпульсной САР (рисунок 6).

Использование инвариантной САР с выделением эквивалентного внешнего возмущения без измерения  $f_2$  на базе каскадной САР позволяет существенно улучшить качество регулирования при отработке основных возмущающих воздействий.

#### Литература

1. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике: учебник для студентов и вузов / Г.П. Плетнев. – 4-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 352 с.: ил.
2. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г.Т. Кулаков [и др.]; под редакцией Г.Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.: ил.