

УДК 621.184.61

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ САР РЕГУЛЯТОРА ПИТАНИЯ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА

Степанов М.А.

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

В прямоточном котле в отличие от барабанного расход питательной воды оказывает непосредственное воздействие на расход, температуру и давление пара на выходе. В нем тесно связаны регулирование теплового и материального балансов. Существенно усложнится и регулирование температуры перегретого первичного пара. На нее одновременно влияют изменения расхода питательной воды и подачи топлива. Это приводит к необходимости увеличения впрысков до 3 - 4 и расхода воды на впрыск до 10% общего количества выработанного пара.

САР регулятора питания прямоточного котла обеспечивает:

1. Выработку пара строго в соответствии с его потреблением турбиной и поддержание ряда качественных показателей работы оборудования;
2. В установившемся режиме заданную точность регулирования.

Предоставлено два варианта реализации данной системы управления:

- 1 – в виде типовой каскадной САР; 2 – в виде инвариантной САР при внеплановом изменении нагрузки.

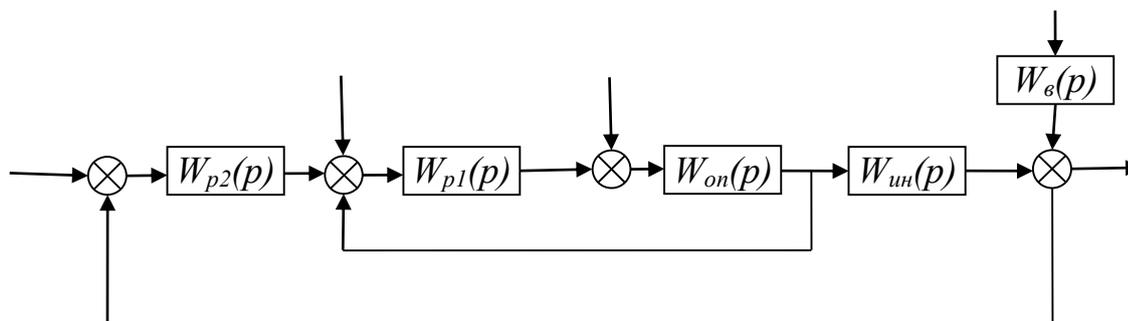


Рисунок 1. Структурная схема каскадной САР

1. Стабилизирующий регулятор:

$$W_{p1}(p) = \frac{K_{p1}(T_{и1}p + 1)}{T_{и1}p} = \frac{4.86(4.103p + 1)}{4.103p}. \quad (1)$$

2. Корректирующий регулятор:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_{p2}(T_{и2}p + 1)}{T_{и2}p} = \frac{0.04(86p + 1)}{86p}. \quad (2)$$

3. Опережающий участок объекта регулирования:

$$W_{оп}(p) = \frac{K_{оп}}{(T_{оп}p + 1)(\sigma_{оп}p + 1)} = \frac{1.5}{(10p + 1)(1.1p + 1)}. \quad (3)$$

4. Инерционный участок объекта регулирования:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин}e^{-\tau_y p}}{(T_{ин}p + 1)(\sigma_{ин}p + 1)} = \frac{14e^{-70p}}{(60.2p + 1)(25.8p + 1)}. \quad (4)$$

5. Крайнее внешнее возмущение:

$$W_B(p) = \frac{K_B e^{-\tau_B p}}{T_B p + 1} = \frac{16e^{-60p}}{70p + 1}. \quad (5)$$

Стабилизирующий регулятор настраиваем по МЧК:

$$I = \int_0^{t_p} \varepsilon^2(t) dt = \min \quad \text{со С.З. } \psi = 0.95. \quad (6)$$

Корректирующий регулятор настраиваем по МПК в ЧВ

$$\left(\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}; \xi = 1 \right).$$

Расчет настройки стабилизирующего регулятора:

1. Относительная постоянная времени:

$$T = \left(\frac{T_{оп}}{\sigma_{оп}} \right) = \frac{10}{1.1} = 9.1. \quad (7)$$

2. Относительный коэффициент передачи:

$$K = (k_{p1} k_{оп}) = 0.7395T \left(1 + \frac{1}{T} \right)^2 - 1 = 7.29. \quad (8)$$

3. Абсолютное значение k_{p1} :

$$k_{p1} = \frac{K}{k_{оп}} = \frac{7.29}{1.5} = 4.86 \text{ Т/Ч/}^\circ\text{С}. \quad (9)$$

4. Относительное время интегрирования:

$$I = \left(\frac{T_{и1}}{\sigma_{оп}} \right) = \frac{6.36K}{T \left(1 + \frac{1}{T} \right)^3} = 3.73. \quad (10)$$

5. Абсолютное время интегрирования:

$$T_{и1} = I \sigma_{оп} = 3.73 \cdot 1.1 = 4.103 \text{ с}. \quad (11)$$

Расчет настройки корректирующего регулятора:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин} e^{-\tau_y p}}{T_k p + 1} = \frac{14 e^{-70p}}{86p + 1}; \quad (12)$$

$$T_k = T_{ин} + \sigma_{ин} = 60,2 + 25,8 = 86 \text{ с.} \quad (13)$$

Для $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$:

$$T_{и2} = T_k = 86 \text{ с.} \quad (14)$$

$$K_{p2} = \frac{T_k}{2K_{ин}\tau_y} = \frac{86}{2 \cdot 14 \cdot 70} = 0,04 \text{ Т/ч/}^\circ\text{С.} \quad (15)$$

Для $\xi = 1$:

$$K_{p2}^* = \frac{T_k}{4K_{ин}\tau_y} = \frac{86}{4 \cdot 14 \cdot 70} = 0,02 \text{ Т/ч/}^\circ\text{С.} \quad (16)$$

Для сравнения с ИСАР в дальнейшем будем использовать ТКСАР при $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

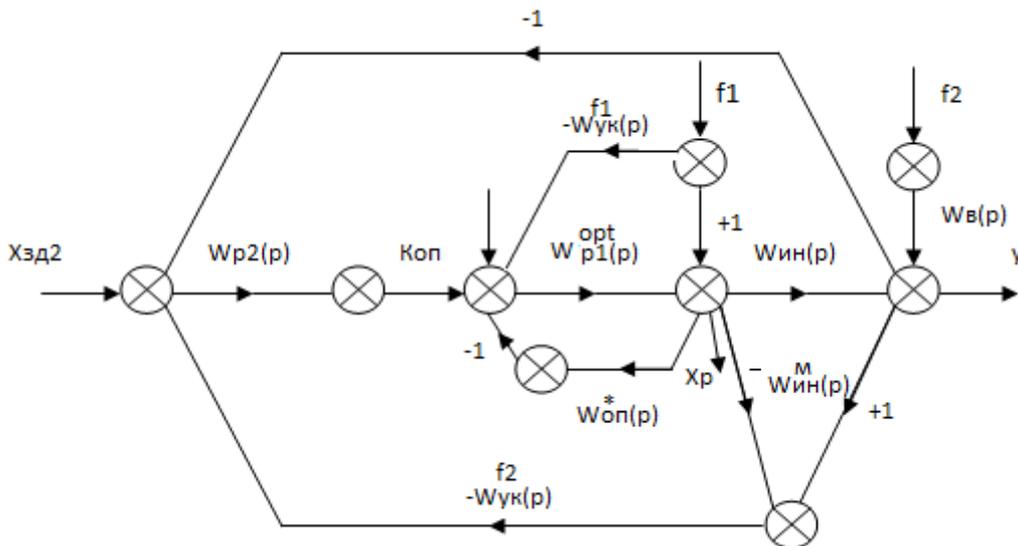


Рисунок 2. Структурная схема ИСАР при ВИН без измерения f_2

Передаточная функция крайнего внешнего возмущения:

$$W_B(p) = \frac{K_B \cdot e^{-\tau p}}{T_B p + 1} = \frac{16 \cdot e^{-60p}}{70p + 1}. \quad (17)$$

Опережающий участок объекта регулирования:

$$W_{оп}^*(p) = \frac{K_{оп}}{T_{оп}^* p + 1} = \frac{1,5}{11,1p + 1}. \quad (18)$$

Инерционный участок объекта регулирования:

$$W_{ин}(p) = \frac{K_{ин} e^{-\tau_y p}}{(T_{ин} p + 1)(\sigma_{ин} p + 1)} = \frac{14 e^{-70p}}{(60.2p + 1)(25.8p + 1)}. \quad (19)$$

Передаточная функция СР оптимального регулятора:

$$W_{p1}^{opt}(p) = [W_{оп}^*(p)]^{-1} \cdot W_{зд}^{pc(n=1)}(p) = \frac{T_{оп}^* p + 1}{K_{оп} \cdot T_{зд1} p} = \frac{11.1p + 1}{1.5 \cdot 11.1p}, \quad (20)$$

$$T_{зд1} = T_{оп}^* = 11.1 \text{ с.}; \quad (21)$$

$$W_{x_p, x_{зд}}(p) = \frac{W_{p1}^{opt}(p)}{1 + W_{p1}^{opt}(p) \cdot W_{оп}^*(p)} \cdot \frac{W_{оп}^*(p)}{W_{оп}^*(p)} = \frac{T_{оп}^* p + 1}{K_{оп} \cdot (T_{зд1} p + 1)} = \frac{1}{K_{оп}}. \quad (22)$$

Нахождение передаточной функции устройства компенсации $W_{ук}^{f1}(p)$:

$$W_{ук}^{f1}(p) \cdot W_{p1}^{opt}(p) = 1; \quad (23)$$

$$W_{ук}^{f1}(p) = \frac{1}{W_{p1}^{opt}(p)} = \frac{K_{оп} \cdot T_{оп}^* p}{T_{оп}^* p + 1} = \frac{1.5 \cdot 11.1p}{11.1p + 1}. \quad (24)$$

Передаточную функцию КР ПИД регулятора настраиваем по МПК в ЧВ.

Расчетная ПФ объекта в виде инерционного звена первого порядка с запаздыванием:

$$W_{ин}^{расч.}(p) = \frac{K_{ин} \cdot e^{-\tau_y p}}{T_k p + 1}, \quad (25)$$

$$T_k = T_{ин} + \sigma_{ин} = 60.2 + 25.8 = 86 \text{ с.} \quad (26)$$

Тогда

$$W_{ин}^{расч.}(p) = \frac{14 \cdot e^{-70p}}{86p + 1}. \quad (27)$$

Примем $\xi = 1$, тогда находим абсолютные значения:

$$T_i = T_{ин} = 60.2 \text{ с}; T_d = \sigma_{ин} = 25.8 \text{ с.} \quad (28)$$

Находим абсолютное значение коэффициента усиления регулятора:

$$K_p = \frac{T_{ин}}{2 \cdot K_{ин} \cdot \tau_y} = \frac{60.2}{2 \cdot 14 \cdot 70} = 0.03. \quad (29)$$

Записываем передаточную функцию РПИД регулятора:

$$W_{p2}(p) = \frac{K_p (T_i p + 1)(T_d p + 1)}{T_i p (T_6 p + 1)}. \quad (30)$$

T_6 рассчитываем:

$$T_6 = \frac{T_d}{N}, \quad (31)$$

где $N = 10$;

$$T_6 = \frac{25.8}{10} = 2.58 \text{ с.} \quad (32)$$

Записываем передаточную функцию РПИД регулятора с численными значениями:

$$W_{p2}(p) = \frac{0.03(60.2p + 1)(25.8p + 1)}{60.2p(2.58p + 1)}. \quad (32)$$

Нахождение передаточной функции устройства компенсации $W_{ук}^{f_2}(p)$.

$$W_{ук}^{f_2}(p) \cdot W_{зд2}(p) = [1 - W_{зд2}(p)]; \quad (33)$$

$$T_{зд2} = \gamma \cdot \tau_y = 0.09 \cdot 70 = 6.3 \text{ с}; \quad (34)$$

$$W_{ук}^{f_2}(p) = \frac{[1 - W_{зд2}(p)]}{W_{зд2}(p)} = [W_{зд2}^{pc(n=2)}(p)]^{-1} = \frac{2T_{зд2}p \left(\frac{T_{зд2}}{2}p + 1 \right)}{(T_{зд3}p + 1)^2} = \frac{2T_{зд2}p}{\frac{T_{зд2}}{2}p + 1}; \quad (35)$$

$$T_{зд3} = \frac{T_{зд2}}{2}; \quad (36)$$

$$W_{ук}^{f_2}(p) = \frac{12.6p}{3.15p + 1}. \quad (37)$$

Результаты переходных процессов, исследуемых САУ РП ПК при основных воздействиях

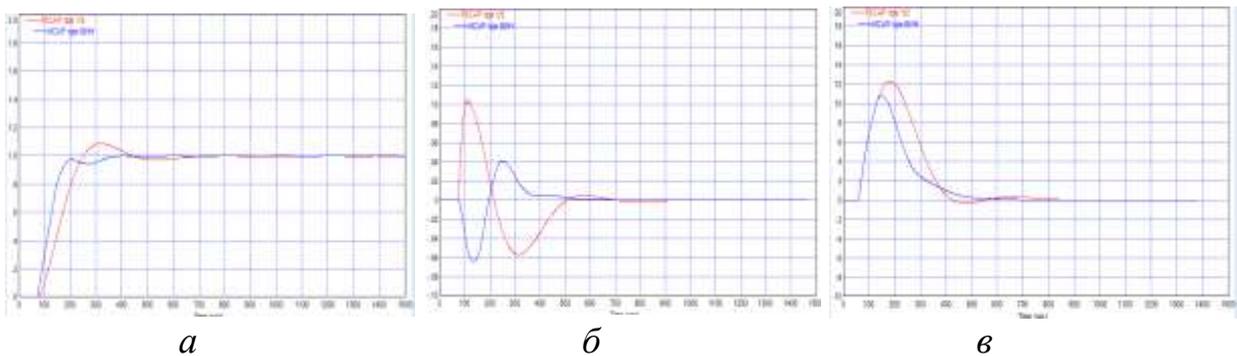


Рисунок 3. Графики переходных процессов, исследуемых САУ РП ПК при основных воздействиях:

a - переходного процесса при обработке скачка задания $x_{зд}$; *б* - переходного процесса при обработке внутреннего возмущения f_1 ; *в* - переходного процесса при обработке крайнего внешнего возмущения f_2

Сравнение показателей различных вариантов реализации САУ РП ПК сведены в таблицу:

Таблица 1-ППК ТКСАР и ИСАР

	$x_{зд}$			f_1			f_2		
	t_p, c	$\sigma, \%$	ψ	t_p, c	A_1^+	ψ	t_p, c	A_1^+	ψ
ТКСАР	600	11.3	1	440	1.72	1	950	12.1	1
ИСАР	335	0	0	310	1.55	1	690	10.7	1

Вывод:

отработка скачка задания $x_{зд}$: как видно из таблицы, время регулирования t_p в ИСАР является минимальным и составляет 335 с., что в 1.79 раза меньше, чем в ТКСАР;

отработка внутреннего возмущения f_1 : из таблицы следует, что максимальная динамическая ошибка регулирования A_1^+ наименьшая в ИСАР при ВИН и составляет 1.55, что в 1.11 меньше, чем в ТКСАР;

время регулирования t_p в ИСАР является минимальным и составляет 440с., что в 1.42 меньше, чем в ТКСАР;

отработка внешнего возмущения f_2 : на основании таблицы, минимальное время регулирования в ИСАР составляет 690 с., что в 1.38 раза меньше, чем в ТКСАР.

Литература

1. Кулаков Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчёта промышленных систем регулирования. – М.: Высшэйшая школа, 1984. – 192 с.
2. Кулаков Г.Т. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Высшэйшая школа, 2017. – 238 с.