УДК 621.181

ОПТИМИЗАЦИЯ КАСКАДНОЙ САУ УРОВНЯ ВОДЫВ БАРАБАНЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Иванов Д.А., Цыганкова С.Д.

Научные руководители – д.т.н., профессор Кулаков Г.Т., к.э.н., доцент Кравченко В.В.

Парогенераторы АЭС являются одним из самых ответственных элементов надежности работы, которых зависит безопасность станции, ОТ всей энергетической установки. Основными управляемыми параметрами В парогенераторе (ПГ) являются уровень и расход питательной воды и пара, к стабилизации которых предъявляют жесткие требования. Неточное этих параметров в барабане парогенератора поддержание приводит повышению влажности пара, повышает износ лопаточного аппарата турбины и снижает мощность энергоблока.

Управление уровнем воды в барабане ПГ АЭС традиционно осуществляется трехимпульсной САУ [1].



Рисунок 1. Структурная схема типовой трехимпульсной САУ уровня воды в барабане парогенератора: x_{3д} – заданное значение основной регулируемой величины; y(t) – основная регулируемая величина, H₀ – уровень воды в барабане парогенератора; f₁ – внутреннее возмущение; y₁(t) – промежуточная регулируемая величина, W_{пв} – расход питательной воды; x_p(t) – регулирующее воздействие; f₂ – крайнее внешнее возмущение, D – расход пара.

Передаточная функция объекта регулирования при возмущении расхода питательной воды представлена в виде реального интегрирующего звена:

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1 p(\tau_1 p + 1)'}$$
(1)

где T_1 – постоянная времени идеального интегрирующего звена, с;

 τ_1 – постоянная времени инерционного звена первого порядка, численно равная величине запаздывания по каналу регулирующего воздействия, с.

Передаточная функция оптимального ПИ-регулятора имеет вид [2]:

$$W_p^{opt}(p) = [W_{on}(p)]^{-1} \cdot W_{3\mathcal{A}}^{PC(n=1)}(p) = \frac{T_{on}^* \cdot p + 1}{k_{on} \cdot T_{3\mathcal{A}} \cdot p'}$$
(2)

где $W_{3d}^{PC(n=1)}(p)$ – заданная передаточная функция разомкнутой системы при n=1, равная:

$$W_{3\mathcal{A}}^{PC(n=1)}(p) = \frac{1}{(T_{3\mathcal{A}} \cdot p + 1)^{n} - 1} = \frac{1}{T_{3\mathcal{A}} \cdot p},$$
(3)

 T_{on}^{*} – постоянная времени опережающего участка, с;

 k_{on} – коэффициент передачи опережающего участка объекта; T_{3d} – параметр динамической настройки регулятора, равный [2]:

$$T_{\rm 3d} = \gamma \cdot T_{\rm on}^*. \tag{4}$$

Передаточная функция опережающего участка имеет вид:

$$W_{0\Pi}^{*}(p) = \frac{k_{0\Pi}}{T_{0\Pi}^{*} p + 1},$$
(5)

Передаточная функция инерционного звена первого порядка:

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1},\tag{6}$$

где k₂ – коэффициент усиления инерционного звена;

T₂ – постоянная времени инерционного звена, с.

Передаточная функция идеального интегрирующего звена:

$$W_3(p) = \frac{1}{T_3 p'},$$
(7)

где T₃ – постоянная времени идеального интегрирующего звена, с.

Передаточная функция явления "набухания" уровня воды в барабане парогенератора при возмущении расходом пара:

$$W_{\rm B}(p) = W_2(p) - W_3(p).$$



Рисунок 2. Структурная схема моделирования переходных процессов типовой трехимпульсной САУ уровня воды в барабане ПГ, смоделированная в программе VisSim

Из приведенных на рисунке 7 графиков переходных процессов видно, что при отработке внешнего возмущения появляется статическая ошибка регулирования. Лучшие прямые показатели качества обеспечиваются при численном значении $\gamma = 0.382$: уменьшается время регулирования И максимальная величина перерегулирования.

Чтобы убрать статическую ошибку регулирования и улучшить все прямые показатели качества при отработке типовых возмущений, рекомендуем использовать каскадную САУ (рисунок 3), применив передаточные функции оптимальных регуляторов [2], схема моделирования переходных процессов приведена на рисунке 4.



Рисунок 3. Структурная схема каскадной САУ уровня воды в барабане парогенератора

Передаточная функция оптимального стабилизирующего регулятора (СР) имеет вид:

$$W_{p1}^{opt}(p) = [W_{on}(p)]^{-1} \cdot W_{3\mathcal{A}}^{PC(n=1)}(p) = \frac{T_{on}^* \cdot p + 1}{k_{on} \cdot T_{3\mathcal{A}^1} \cdot p}$$
(8)

Передаточная функция реального корректирующего ПИД-регулятора (КР) имеет вид [2]:

$$W_{p2}^{P\Pi M \mathcal{A}}(p) = [W_1(p)]^{-1} \cdot W_{3\mathcal{A}}^{PC(n=2)}(p) = \frac{(T_1p+1) \cdot (\tau_1p+1)}{2T_{3\mathcal{A}^2} p \left(\frac{T_{3\mathcal{A}^2}}{2} p+1\right)},$$
(9)

где $T_{3\pi^2}$ – параметр динамической настройки регулятора, равный:

$$T_{3\pi^2} = \gamma \cdot \tau_1. \tag{10}$$



Рисунок 4. Структурная схема моделирования переходных процессов каскадной САУ уровня воды в барабане парогенератора, смоделированная в программе VisSim

Из приведенных на рисунке 7 графиков переходных процессов следует, что в предлагаемой каскадной САУ исчезла статическая ошибка регулирования при отработке внешнего возмущения. Лучшие прямые показатели качества регулирования обеспечиваются при численном значении $\gamma = 0,382$. Из недостатков предлагаемой каскадной САУ можно выделить перерегулирование при отработке скачка задания $x_{3д2}$. Для устранения этого недостатка в цепь задания корректирующего регулятора добавляют корректор задания с передаточной функцией $W_{\kappa3}(p)$ (рисунок 5).



Рисунок 5. Структурная схема каскадной САУ уровня воды в барабане парогенератора с корректором задания

Передаточная функция корректора задания:

$$W_{\rm K3}(p) = \frac{1}{T_{\rm K3}p+1'}$$
(11)

где Т_{к3} – постоянная времени корректора задания, с.



Рисунок 6. Структурная схема моделирования переходных процессов каскадной САУ уровня воды в барабане парогенератора с корректором задания, смоделированная в программе VisSim

Результаты переходных процессов, исследуемых САУ уровня воды в барабане парогенератора при основных воздействиях:



Рисунок 7. Графики переходных процессов исследуемых САУ уровня воды в барабане парогенератора: *a* – отработка скачка задающего воздействия x_{зд}; *б* – отработка внутреннего возмущения f₁; *в* – отработка внешнего возмущения расходом пара f₂; *г* – изменения регулирующего воздействия x_p(t) при отработке внешнего возмущения расходом пара; *д* – изменения регулирующего воздействия по расходу питательной воды *W*_{пв}(x_p) при отработке внешнего возмущения расходом пара.

Из приведенных на рисунке 7 графиков переходных процессов следует, что в каскадной САУ с корректором задания, исчезает перерегулирование при отработке задающего воздействия. Лучшие прямые показатели качества регулирования обеспечиваются при численном значении $\gamma = 0,382$.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. СНТК-75 Теплоэнергетика

Таблица 1

Сравнение прямых показателей качества (ППК) САУ различных структур

	х _{зд2}			f_1			f_2			x_n^m
γ	<i>t</i> _p , с	σ,%	ψ	<i>t</i> _p , с	ψ	A_1^+	<i>t</i> _p , с	ψ	Δст	p
Типовая трехимпульсная САУ уровня воды в барабане парогенератора										
0.382	647	40.8	0.24	275	0.85	0.08	285	0.05	0.77	2.2
Каскадная САУ уровня воды в барабане парогенератора										
0.382	175	29	1	250	-	0.02	250	0.17	-	2
Каскадная САУ уровня воды в барабане парогенератора с корректором										
задания										
0.382	130	-	1	250	-	0.02	250	0.17	-	2.2

Здесь приняты следующие обозначения ППК: t_p – время регулирования, с; σ – перерегулирование, %; ψ – степень затухания; A_1^+ – максимальная динамическая ошибка регулирования; $\Delta c \tau$ – статическая ошибка регулирования; $\Delta c \tau$ – статическая ошибка

Вывод:

Проанализировав графики переходных процессов и таблицу прямых показателей качества, можно сделать вывод, что применение каскадной САУ регулирования уровня воды в барабане парогенератора с корректором задания позволяет улучшить качество регулирования относительно типовой трехимпульсной САУ:

1. Отработка скачка задающего воздействия x_{3d2} осуществляется без перерегулирования. При этом время регулирования каскадной САУ регулирования уровня воды в барабане парогенератора с корректором задания уменьшилось с 647 до 130 с.

2. Отработка внешнего возмущения осуществляется без статической ошибки регулирования Δст, а время регулирования уменьшилось с 275 до 250 с.

3. Максимальная динамическая ошибка регулирования при возмущении расходом пара уменьшилась в 4 раза.

4. При этом максимальное изменение регулирующего воздействия x_p^m соизмеримо с типовой.

Литература

1. Демченко, В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС: учебное пособие/ В.А. Демченко. – Одесса: Астропринт, 2001. – 301 с.

2. Кулаков, Г.Т. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Г.Т. Кулаков [и др.]; – под ред. Г.Т. Кулакова Минск: Вышэйшая школа, 2017. – 238 с.