

УДК 621-55.001.24

НАСТРОЙКА КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ВНУТРЕННЕГО КОНТУРА  
SETTING UP THE CASCADE SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION TAKING INTO ACCOUNT THE DYNAMICS OF THE INTERNAL LOOP

Кулаков Г. Т., д-р тех. наук, профессор, Кулаков А. Т., к-т тех. наук, доцент,  
Воюш Н. В., ст. преподаватель,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь  
G. Kulakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, A. Kulakov, Candidate of  
Technical Sciences, Associate Professor, N. Voyush, Senior Lecturer  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Аннотация. В энергетике широкое распространение получили двухконтурные системы автоматического регулирования: системы с дифференцированием промежуточного сигнала и каскадные. Расчет параметров динамической настройки таких систем обычно основан на том, что переходные процессы внутреннего контура системы не оказывают влияния на динамику внешнего контура. Однако в большинстве случаев взаимное влияние переходных процессов контуров присутствует. Так как переходные процессы каскадной системы автоматического регулирования (КСАР) при основных воздействиях практически адекватны, то далее изложена методика расчета параметров КСАР с учетом динамики внутреннего контура со стабилизирующим регулятором.*  
*Abstract. Two-circuit automatic control systems are widely used in the power industry: systems with intermediate signal differentiation and cascade systems. The calculation of dynamic tuning parameters of such systems is usually based on the fact that transients of the internal circuit of the system do not affect the dynamics of the external circuit. However, in most cases, the mutual influence of the transients of the contours is present. Since the transients of the cascade automatic control system (CACS) under the main influences are practically adequate, the following is a method for calculating the parameters of the CACS, taking into account the dynamics of the internal circuit with a stabilizing regulator.*

*Ключевые слова: система, регулирование, оптимизация, учет динамики контуров*

*Key words: system, regulation, optimization, taking into account the dynamics of contours*

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование переходных процессов КСАР теплоэнергетических объектов при основных воздействиях показало, что при большой инерционности опережающего участка объекта регулирования динамика внутреннего контура со стабилизирующим регулятором (СР) оказывает влияние на качество переход-

ных процессов внешнего контура. В связи с этим актуальным является проблема повышения качества регулирования КСАР с учетом динамики внутреннего контура.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Структурная схема каскадной системы автоматического регулирования на базе переходных функций оптимальных регуляторов с учетом динамики внутреннего контура приведена на рис. 1.

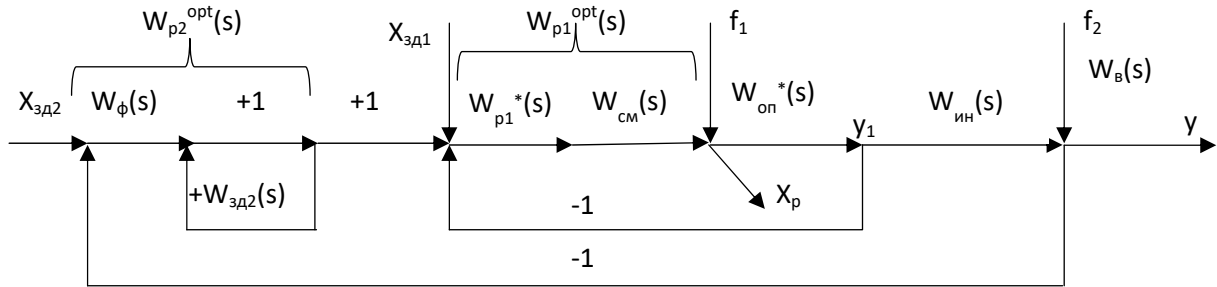


Рисунок 1 – Структурная схема предлагаемой каскадной системы автоматического регулирования на базе передаточных функций оптимальных регуляторов с учетом динамики внутреннего контура:

$y, y_1$  – соответственно основная и промежуточная регулируемые величины;  
 $x_{зд2}, x_{зд1}$  – заданные значения основной и промежуточной регулируемых величин;  
 $W_{см}(s)$  – сервомотора,  $W_{оп}^*(s)$  – опережающего участка объекта регулирования;  
 $W_{ин}(s)$  – инерционного участка объекта регулирования;  $W_{в}(s)$  – крайнего внешнего возмущения;  $W_p^*(s)$  – та часть передаточной функции стабилизирующего регулятора, которая не содержит передаточной функции сервомотора;  $W_{p1}^{opt}(s)$  – оптимального стабилизирующего регулятора;  $W_{\phi}(s)$  – компенсатора той части передаточной функции эквивалентного объекта с учетом динамики внутреннего контура, которая не содержит запаздывания по каналу регулирующего воздействия;  $W_{зд2}(s)$  – заданная передаточная функция критерия оптимальной отработки скачка задания  $x_{зд2}$ ;  $x_p$  – регулирующее воздействие;  $f_1, f_2$  – соответственно внутреннее и внешнее возмущения

Структурная схема типовой каскадной САР без учета динамики внутреннего контура (ТКСАР) приведена на рис. 2.

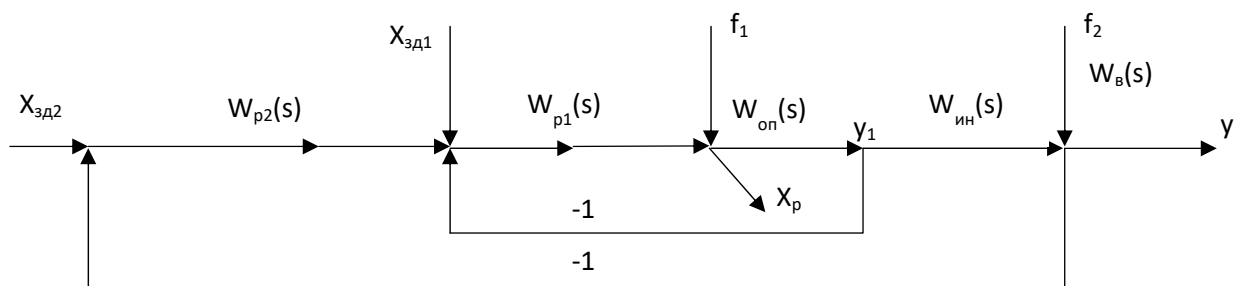


Рисунок 2 – Структурная схема ТКСАР:

$W_{p1}(s), W_{p2}(s)$  – соответственно передаточная функция стабилизирующего и корректирующего регуляторов; остальные обозначения как на рис. 1

Расчет параметров оптимальной динамической настройки стабилизирующего регулятора (СР) производят по методу частичной компенсации (МЧК) на отработку внутренних возмущений по передаточной функции опережающего участка [1]:

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{k_{\text{оп}}}{(T_{\text{оп}}s + 1)(\sigma_{\text{оп}}s + 1)} = \frac{1,8}{(0,24s + 1)(0,065s + 1)}. \quad (1)$$

Передаточная функция СР ТКСаР равна:

$$W_{p1}(s) = \frac{k_{p1}(T_{\text{и1}}s + 1)}{T_{\text{и1}}s}, \quad (2)$$

где  $k_{p1} = 1,9 \text{ T/Ч} / \text{°C}$  – коэффициент передачи СР;

$T_{\text{и1}} = 0,186$  мин – время интегрирования СР.

Передаточная функция корректирующего регулятора (КР) ТКСаР:

$$W_{p2}(s) = \frac{k_{p2}(T_{\text{и2}}s + 1)}{T_{\text{и2}}s}, \quad (3)$$

где  $k_2 = 0,47$  – коэффициент передачи КР;

$T_{\text{и2}} = 1,4$  мин – время интегрирования, рассчитанные по методу полной компенсации в частном виде при коэффициенте демпфирования  $\xi = 1/\sqrt{2}$  [1].

Передаточная функция эквивалентного объекта внутреннего контура предлагаемой КСаР (рис. 1) будет представлена реальным интегрирующим звеном:

$$W_{\text{эки}}(s) = W_{\text{СМ}}(s)W_{\text{оп}}^*(s) = \frac{k_{\text{оп}}}{T_{\text{СМ}}s(T_{\text{оп}}^*s + 1)} = \frac{1,8}{0,42s(0,305s + 1)}. \quad (4)$$

Так как передаточная функция эквивалентного объекта (4) второго порядка, то передаточная функция оптимального регулятора для этого объекта примет вид [2]:

$$W_{p1}^*(s) = [W_{\text{эки}}(s)]^{-1} W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s) = \frac{T_{\text{СМ}}s(T_{\text{оп}}^*s + 1)}{k_{\text{оп}} 2T_{\text{зд1}}s \left( \frac{T_{\text{зд1}}}{2}s + 1 \right)} = \frac{T_{\text{СМ}}}{2k_{\text{оп}}T_{\text{зд1}}} \cdot \frac{T_{\text{оп}}^*s + 1}{\frac{T_{\text{зд1}}}{2}s + 1}, \quad (5)$$

который представляет собой реальный ПД-регулятор.

При  $T_{\text{зд1}} = 0,09 \cdot T_{\text{оп}}^* = 0,027$  мин коэффициент передачи ПД-регулятора будет равен  $k_{p1} = 4,3$ , а заданная передаточной функцией внутреннего контура КСаР при обработке скачка задания СР будет равна [2]:

$$W_{зд1}(s) = \frac{1}{(T_{зд1}s + 1)^2}. \quad (6)$$

С учетом передаточной функции (6) передаточная функция эквивалентного объекта внешнего контура примет вид:

$$W_{экив2}(s) = W_{зд1}(s)W_{ин}(s) = \frac{k_{ин} e^{-\tau_y s}}{(T_{зд1}s + 1)^2 (T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)}. \quad (7)$$

где  $T_{ин}$ ,  $\sigma_{ин}$  – соответственно большая и меньшая постоянные времени передаточной функции инерционного участка объекта:

$$W_{ин}(s) = \frac{k_{ин} e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)}. \quad (8)$$

С учетом передаточной функции (7) передаточная функция оптимального корректирующего регулятора примет следующий вид [2]:

$$W_{p2}^{opt}(s) = W_{\phi}^0(s) = \frac{1}{1 - W_{зд2}^0(s)e^{-\tau_y s}} \quad (9)$$

где  $W_{\phi}^0(s) = \frac{W_{зд2}^0(s)}{W_{экив}^0(s)}$  – передаточная функция компенсатора динамики той части

эквивалентного объекта регулирования (7), которая не содержит запаздывания;

$W_{зд2}^0(s) = W_{зд2}^0(s)e^{-\tau_y s}$  – заданная передаточная функция критерия оптимальной отработки скачка задания корректирующего регулятора, равная с учетом передаточной функции (7) [2]:

$$W_{зд2}(s) = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{зд2}s + 1)^3} = \frac{e^{-1,15s}}{(0,17s + 1)^3}. \quad (10)$$

Здесь  $T_{зд2}$  – единственный параметр оптимальной динамической настройки корректирующего регулятора, рассчитанный по формуле:

$$T_{\gamma 2}(s) = \gamma \cdot \tau_y = 0,146 \cdot 1,15 = 0,17 \text{ мин}, \quad (11)$$

где  $\gamma$  – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, если за целое принимаем  $\tau_y$  [2].

При этом передаточная функция компенсатора с учетом (7) и (10) будет равна:

$$W_{\phi 2}(s) = \frac{W_{\text{зд}2}^0(s)}{W_{\text{эКВ}2}^0(s)} = \frac{(T_{\text{ин}}s + 1)(\sigma_{\text{ин}}s + 1)(T_{\text{зд}1}s + 1)^2}{k_{\text{ин}}(T_{\text{зд}2}s + 1)^4}. \quad (12)$$

Схемы моделирования типовой и предлагаемых САР приведены на рис. 3, а графики переходных процессов при основных воздействиях – на рис. 4.

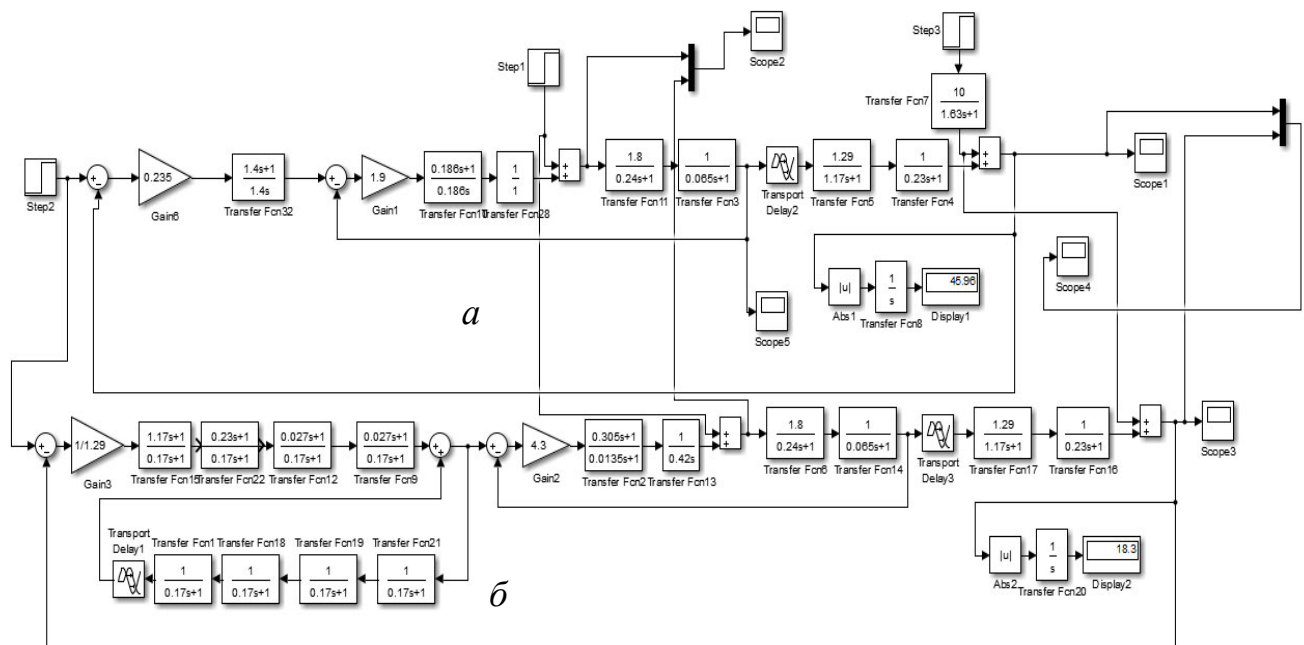


Рисунок 3 – Схемы моделирования типовой каскадной САР (а) и предлагаемой (б) на базе передаточных функций оптимальных регуляторов в пакете Simulink

Из анализа графиков переходных процессов следует, что при отработке скачка задания время регулирования предлагаемой САР в 2,8 раза меньше, чем у типовой (рис. 4а). При отработке внутреннего возмущения время регулирования уменьшается в 2 раза, а площади модуля ошибки регулирования ( $S_1 \cong S_2$ ) примерно одинаковы (рис. 4в).

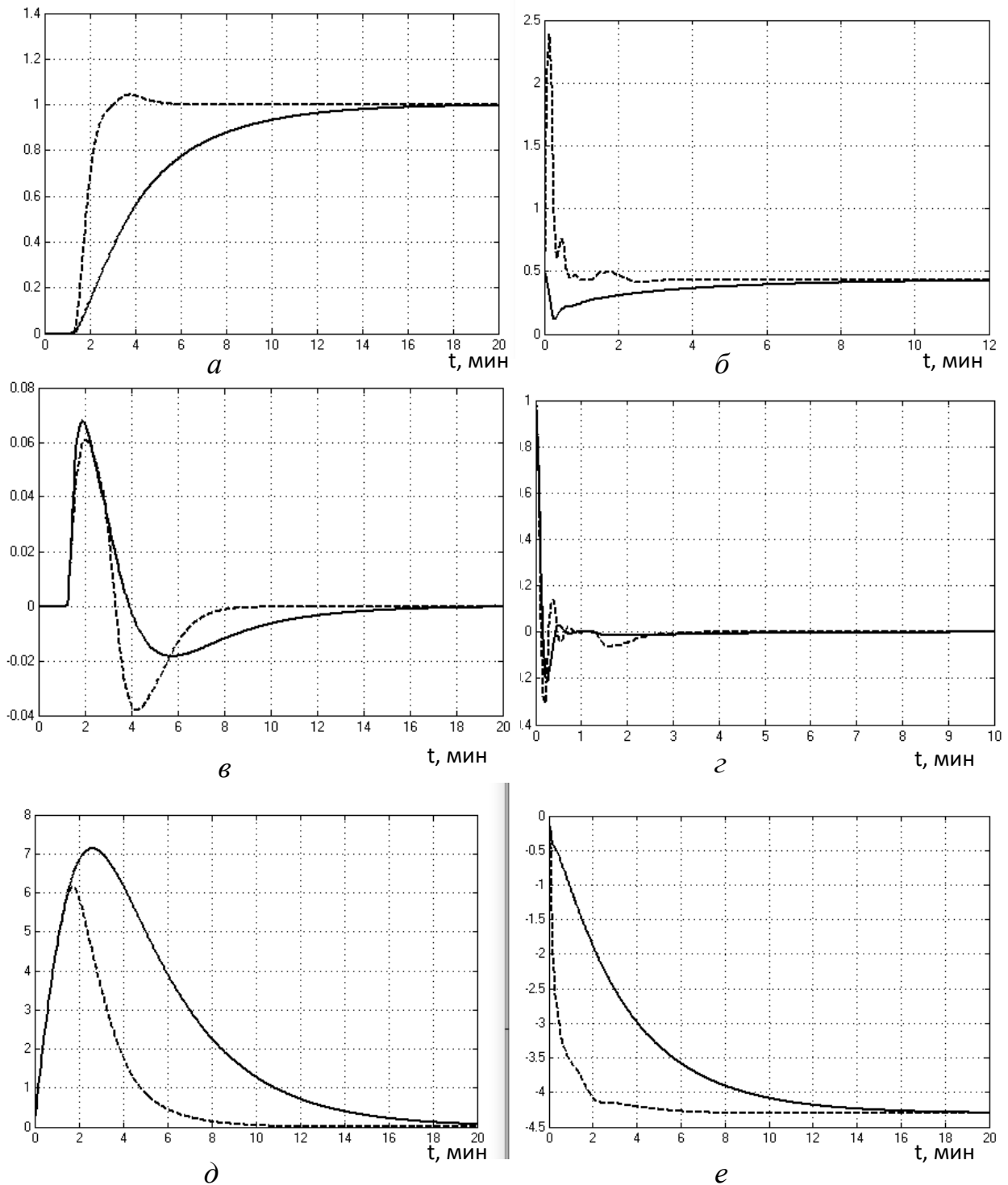


Рисунок 4 – Графики переходных процессов типовой и предлагаемой САР при основных воздействиях:

сплошные линии – типовая каскадная САР; пунктирные линии – предлагаемая каскадная САР на базе передаточных функций оптимальных регуляторов

При обработке скачка крайнего внешнего возмущения (рис. 4д) время регулирования предлагаемой КСАР сокращается также в 2 раза по сравнению с типовой.

При этом площадь ошибки регулирования уменьшается в 2,5 раза, а максимальная динамическая ошибка регулирования сокращается всего на 16,3 %.

Графики изменения регулирующих воздействий предлагаемых САР при отработке скачка задания  $x_{зд2}$  (рис. 4б), внутреннего возмущения  $f_1$  (рис. 4г) и внешнего возмущения  $f_2$  (рис. 4е) отличаются от соответствующих графиков типовой КСАР увеличенной скоростью изменения регулирующего воздействия  $x_p$  и меньшим временем переходного процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования, а также результаты моделирования переходных процессов в пакете Simulink позволили утверждать, что разработанная на базе передаточных функций оптимальных регуляторов с учетом динамики сервомотора стабилизирующего регулятора и внутреннего контура каскадная САР (КСАР) позволяет существенно улучшить качество регулирования при основных воздействиях. В результате чего предложенный метод настройки КСАР и выбора структуры реализации регуляторов можно рекомендовать для широкого внедрения на тепловых электрических станциях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств», «Автоматизация паротурбинных установок и ядерных реакторов АЭС», «Информационные технологии и управление в технических системах» / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2010 – 574 с.
2. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебное пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: Вышэйшая школа, 2017 – 238 с.